

## СЕКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

### ПЕРЕЧЕНЬ ДОКЛАДОВ

#### **ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ЭНЕРГЕТИКЕ**

Астошонок В.С.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Булойчик Е.В.

#### **СРАВНЕНИЕ КАБЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ПВХ И СШЭ ИЗОЛЯЦИЕЙ**

Васильев Т.С.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Дерюгина Е.А.

#### **КОММУНИКАЦИИ НА ПОДСТАНЦИИ ПО СТАНДАРТУ МЭК 61850**

Жданович Е.А.  
Научный руководитель – к.т.н. Ломан М.С.

#### **ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ГИБКИХ ШИН ОТКРЫТЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 330 КВ**

Зарихта К.С.  
Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.

#### **ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ**

Асрятян Г.А.  
Научный руководитель – к.т.н., профессор Силюк С.М.

#### **СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ «БРЕСЛЕР»**

Кокаш А.В.  
Научный руководитель – Климкович П.И.

#### **РЕЖЕКТОРНЫЕ АКТИВНЫЕ РС-ФИЛЬТРЫ**

Науменко В.И., Никитин Е.А.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.

#### **ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ SCADA**

Плешко Д.Ю.  
Научный руководитель – Сапожникова А.Г.

#### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

Харунжа Д.А.  
Научный руководитель – доцент Бобко Н.Н.

#### **ЦИФРОВЫЕ ДИСТАНЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

Шмельков А.С.  
Научный руководитель – к.т.н. Ломан М.С.

#### **МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Хорошко Д.И., Волов Р.А.  
Научный руководитель – Баран А.Г.

#### **МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ В ТРЕХФАЗНЫХ КОМПЛЕКТНЫХ ПОФАЗНО-ЭКРАНИРОВАННЫХ ТОКОПРОВОДАХ**

Матяс Т.В.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Булат В.А.

#### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ НА БЛОКАХ «РЕГИСТР ЗАДЕРЖКИ»**

Мильный А.Г.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Румянцев В.Ю.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ ЕЕ ВКЛЮЧЕНИИ И ОБРЫВЕ НЕЙТРАЛЬНОГО ПРОВОДА В КОММУТАЦИОННЫЙ ПЕРИОД**

Русецкий К.И.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.

**О ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЯХ ПО ЗАЩИТЕ АСУ ТП АЭС ОТ КИБЕРАТАК**

Федосевич Э.А.  
Научный руководитель – Сапожникова А.Г.

**УСТАНОВКИ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА СУШКИ БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

Антонов И.И.  
Научный руководитель – Гурьянчик О.А.

**ИСПЫТАНИЯ МАСЛА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Иванов А.А.  
Научный руководитель – Климкович П.И.

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ГИБКИХ ПРОВОДОВ АНКЕРНЫХ ПРОЛЕТОВ ОТКРЫТЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 330 КВ БЕЗ ОТПАЕК К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ АППАРАТАМ**

Зарихта К.С., Баран А.Г.  
Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.

**УСТАНОВКИ МОНИТОРИНГА ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ МАШИН**

Журович Н.В., Волон Р.А.  
Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

**УНИВЕРСАЛЬНАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ/ДИАГНОСТИКИ ПЕРВИЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА OMIKRON**

Смоляков Е.А.  
Научный руководитель – Климкович П.И.

**ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА И ПОСТРОЕНИЯ ЗОН МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Соленик Г.Л.  
Научный руководитель – Климкович П.И.

**АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НЕЙТРАЛЕЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ЭНЕРГОСИСТЕМЫ БЕЛАРУСИ**

Францкевич А.И.  
Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ГИБКИХ ШИН ОРУ 110 КВ МИНСКОЙ ТЭЦ-3**

Плешко Д.Ю.  
Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.

**ТОКОВАЯ НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА**

Конохов М.С.  
Научный руководитель – Гурьянчик О.А.

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ГИБКИХ ПРОВОДОВ АНКЕРНЫХ ПРОЛЕТОВ ОТКРЫТЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 330 КВ С ОТПАЙКОЙ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ АППАРАТАМ**

Зарихта К.С., Баран А.Г.  
Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЗАМКНУТЫХ ЦИКЛОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

Рабушко П.С., Чуприков Т.А.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА ПРИ РАБОТЕ НА АКТИВНУЮ НАГРУЗКУ В СИСТЕМЕ MATLAB**

Ходорик В.С., Русецкий К.И.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.

**СОБСТВЕННЫЕ НУЖДЫ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ**

Карпушонок К.А., Башаркевич Я.В.  
Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

**РЕТРОФИТ ЯЧЕЕК КРУ И КСО**

Максименко С.Ю.  
Научный руководитель – Климкович П.И.

**ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ЭНЕРГЕТИКЕ**

Баран Ю.Г.  
Научный руководитель – Романович С.М.

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕРМИНАЛОВ СЕРИИ «БРЕСЛЕР-0107»**

Волчецкий П.Д.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Булойчик Е.В.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПОФАЗНО-ЭКРАНИРОВАННЫХ ТОКОПРОВОДОВ**

Ильковский И.Н.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Булат В.А.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕКЛОУЗЕРОВ 6–10 КВ**

Крапивин С.В.  
Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

**СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЩИТОВ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Дядюк Н.В.  
Научный руководитель – Климкович П.И.

**СИСТЕМЫ ПОЖАРОТУШЕНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Марфель Г.М.  
Научный руководитель – Кисляков А.Ю.

**УЯЗВИМОСТИ НИЗКОУРОВНЕВЫХ ПРОТОКОЛОВ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ АТАКИ НА АСУ ТП**

Плешко Д.Ю.  
Научный руководитель – Сапожникова А.Г.

**МОДУЛИ ИНДИКАЦИИ МНЕМОСХЕМ**

Русецкий К.И.  
Научный руководитель – Климкович П.И.

**АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ЗАЩИТЫ БАЗ ДАННЫХ МЕТОДАМИ СОВРЕМЕННОЙ КРИПТОГРАФИИ**

Федосевич Э.А.  
Научный руководитель – Сапожникова А.Г.

**ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПРОЛЕТОВ ТИПОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОРУ 110–330 КВ**

Шкловский И.С., Зарихта К.С.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Пономаренко Е.Г.

**ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ**

Юсенис Я.И.  
Научный руководитель – Климкович П.И.

**АККУМУЛИРУЮЩИЕ ПЛИТЫ**

ПЛЕХОВ П.Ю., ЧУСОВИТИН Д.С., ЯРОМЕНОК А.Е.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – К.Т.Н., ДОЦЕНТ НОВАШ И.В.

**ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИХ РЕАКТОРОВ**

ПОЗНЯК Д.О., ВОЙТОВИЧ А.В.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – ДОЦЕНТ БОБКО Н.Н.

**ПАКЕТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕХНИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ МАТЛАВ**

ЖУРКЕВИЧ В.В.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – КЛИМКОВИЧ П.И.

**ПРОБЛЕМА ВНЕДРЕНИЯ АЭС В БЕЛАРУСИ**

СМОЛЯКОВ Е.А.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – К.Т.Н., ДОЦЕНТ НОВАШ И.В.

**ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ**

ШАВЛЮКЕВИЧ Р.В.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – БАРАН А.Г.

**КОНСТРУКЦИИ ПОФАЗНО-ЭКРАНИРОВАННЫХ ТОКОПРОВОДОВ**

МАТЯС Т.В., ИЛЬКОВСКИЙ И.Н.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – К.Т.Н., ДОЦЕНТ БУЛАТ В.А.

**ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СИСТЕМЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД**

БАШАРКЕВИЧ Я.В., БАШАРКЕВИЧ Е.К.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – ГАВРИЕЛОК Ю.В.

**ИНДИКАТОРЫ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

ЖУК А.Д.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – КЛИМКОВИЧ П.И.

**ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ**

МАЗАНОВИЧ М.Е.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – КЛИМКОВИЧ П.И.

**УСТАНОВКИ МОНИТОРИНГА ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

САВИЦКИЙ П.Ю.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – БАРАН А.Г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ ЕЕ ВКЛЮЧЕНИИ И ОБРЫВ НЕЙТРАЛЬНОГО ПРОВОДА В ПЕРИОД ПОСЛЕ КОММУТАЦИИ**

РУСЕЦКИЙ К.И., ЖУРКЕВИЧ В.В.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – К.Т.Н., ДОЦЕНТ НОВАШ И.В.

**ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТКZ15**

ДЕДЮЛЬ Ю.И.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – ДОЦЕНТ БОБКО Н.Н.

**ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ**

БАРАН Ю.Г., ВОЙТОВИЧ А.В.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – РОМАНОВИЧ С.М.

**АНАЛИЗ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

ЧУПРИКОВ Т.А.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – К.Т.Н., ДОЦЕНТ НОВАШ И.В.

**УКАЗАТЕЛИ ПОВРЕЖДЕННОГО НАПРАВЛЕНИЯ**

Доливайло А.А.  
Научный руководитель – Климкович П.И.

**ПРИЕМНИКИ СОБСТВЕННЫХ НУЖД**

Башаркевич Я.В., Башаркевич Е.К.  
Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

**ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЦП 9010**

Киянко А.С., Григорчук А.А.  
Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ**

Москалёв Н.В.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Дерюгина Е.А.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ НАГРУЗКИ 6–10 КВ**

Самцова Н.Ю.  
Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

**ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

Шакаров А.В.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Пономаренко Е.Г.

**ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ТЕРМИНАЛОВ MICOM**

Ермоленко А.Г.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Булойчик Е.В.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ КИХ-ФИЛЬТРОВ**

Камбалов Е.Ю.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Румянцев В.Ю.

**НАНОРОБОТЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ**

Лафюк А.В.  
Научный руководитель – Климкович П.И.

**ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ГЕНЕРАТОРНЫХ ТОКОПРОВОДОВ**

Томашевский Р.В.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Булат В.А.

**ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПО ЧАСТИЧНЫМ РАЗРЯДАМ**

Кирилюк Н.И., Волов Р.А.  
Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ГИБКИХ ШИН РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

Плешко Д.Ю.  
Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.

**SMART GRIDS – УМНЫЕ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Пузиновский В.Д.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Булойчик Е.В.

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОР НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Косьян А.М.  
Научный руководитель – Артёменко К.И.

**ТЕРМИНАЛЫ ЗАЩИТ ТРАНСФОРМАТОРОВ 35–110 КВ**

Крицкий А.С.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Булойчик Е.В.

**ЩИТОВЫЕ ПРИБОРЫ**

БЕРТОШ Е.С.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – КЛИМКОВИЧ П.И.

**ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

СЕМЕНОВИЧ Н.В.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – К.Т.Н., ДОЦЕНТ ПОНОМАРЕНКО Е.Г.

**РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТА SMART GRID НА ПРИМЕРЕ ОСТРОВА ГОТЛАНДА**

АСТОШОНОК В.С.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – К.Т.Н., ДОЦЕНТ БУЛОЙЧИК Е.В.

**ВЫСОКОТОЧНАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА И КАЛИБРАТОР ПРОИЗВОДСТВА OMIKRON**

ЛАЗАРЕВ Н.В.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – БАРАН А.Г.

**УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА**

ГУРНОВИЧ М.С.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – БАРАН А.Г.

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ВИБРАЦИИ**

ГЕДРОВЕЦ Ю.Е.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – К.Т.Н., ДОЦЕНТ ПОНОМАРЕНКО Е.Г.

**МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ**

ГОРБАЧЕВСКАЯ К.И.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – ГУРЬЯНЧИК О.А.

**УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА РЕЖИМА САМОЗАПУСКА ГРУППЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД**

БАШАРКЕВИЧ Я.В., БАШАРКЕВИЧ Е.К.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – ДОЦЕНТ БОБКО Н.Н.

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА С РЕЛЕ ТИПА ДЗТ-21**

ФАДЕЕВ Е.А.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – К.Т.Н., ДОЦЕНТ БУЛОЙЧИК Е.В.

**ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА**

ЧИЛИКИН А.Д.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – ГУРЬЯНЧИК О.А.

**МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ**

САМОХВАЛОВ А.С.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – ГУРЬЯНЧИК О.А.

**РЕТРОФИТ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ**

БРИТИКОВ Е.С.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – КЛИМКОВИЧ П.И.

**СОВРЕМЕННЫЕ ВИДЫ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

БЕЛОВ П.С.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – ТЕРЕРИНА Л.В.

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОГРАНИЧЕНИЯ УРОВНЕЙ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

БОЯРОВСКИЙ Н.В.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – К.Т.Н., ПРОФЕССОР СИЛЮК С.М.

**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ**

ЛУКАШЕВИЧ Р.В.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – ГАВРИЕЛОК Ю.В.

**МЕЖСЕТЕВЫЕ ЭКРАНЫ КАК МЕРА ЗАЩИТЫ ОТ КИБЕРАТАК**

Федосевич Э.А.  
Научный руководитель – Сапожникова А.Г.

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ВЫВОДАХ  
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В СИСТЕМЕ ИМИТАЦИОННОГО БЛОЧНОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ SIMULINK**

Дударев А.В., Русецкий К.И.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.

**ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ САРИ  
РЕТОМ**

Райчук В.О.  
Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

**ДИАГНОСТИКА ИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ СПЕКТРОСКОПИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК**

Короткевич В.Б.  
Научный руководитель – Гурьянчик О.А.

**ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ GPS-ТЕХНОЛОГИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ**

Баран Ю.Г., Войтович А.В.  
Научный руководитель – Романович С.М.

**ПРОФИЛАКТИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Давыденко А.Г.  
Научный руководитель – Климович П.И.

**ИНДИКАТОРЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ**

Полонский И.П.  
Научный руководитель – Климович П.И.

**УСТАНОВКИ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ**

Волов Р.А.  
Научный руководитель – Климович П.И.

**ПОВЕРОЧНЫЕ УСТАНОВКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ**

Вакульчик Е.В.  
Научный руководитель – Баран А.Г.

**ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ  
ВОССТАНОВЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Телущенко А.А.  
Научный руководитель – Климович П.И.

**УСТРОЙСТВА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ВВОДА РЕЗЕРВА**

Щербо А.Ю.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Булойчик Е.В.

**РЕЗОНАНСНОЕ СМЕЩЕНИЕ НЕЙТРАЛИ В СЕТЯХ 6–35 КВ**

Верташенок В.В.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Дерюгина Е.А.

**СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ**

Бетанов И.А., Волов Р.А.  
Научный руководитель – Климович П.И.

**ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА В РЕАЛЬНОМ  
ВРЕМЕНИ**

Рабушко П.С., Чуприков Т.А.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВЫРАБОТКИ, ПЕРЕДАЧИ И ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Стасенок Р.М.  
Научный руководитель – Потачиц Я.В.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ГИЛЬБЕРТА**

Горячко В.А.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Румянцев В.Ю.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И ТОКОВЫХ ЦЕПЕЙ ЗАЩИТЫ**

Ламеко К.П.  
Научный руководитель – Артёменко К.И.

**КОНФИГУРАЦИЯ ТЕРМИНАЛОВ SIEMENS**

Гайдук К.Д.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Булойчик Е.В.

**СОБСТВЕННЫЕ НУЖДЫ ПОДСТАНЦИЙ 35–330 КВ**

Карпушонок К.А.  
Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

**ИНДИКАТОРЫ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

Русакович А.И.  
Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

**ПЛЯСКА ПРОВОДОВ И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЕЕ ОГРАНИЧЕНИЮ**

Кулак Н.С.  
Научный руководитель – Потачиц Я.В.

**АППАРАТУРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ**

Мильий А.Г., Жиркова К.Ю.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Румянцев В.Ю.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ОШИНОВКИ КРУ 10 КВ**

Алехнович А.С.  
Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.

**ИСТОЧНИКИ ОПЕРАТИВНОГО ТОКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПОДСТАНЦИЙ**

Рубина У.В.  
Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ГИБКОЙ ОШИНОВКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

Васильева А.А., Баран А.Г., Зарихта К.С., Umedzhoni A.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Пономаренко Е.Г.

**МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОТДЕЛЬНО СТОЯЩИХ МОЛНИЕОТВОДОВ**

Соленик Г.Л., Туманов П.С.  
Научный руководитель – Климкович П.И.

**БЛОКИ КОЛЬЦЕВОЙ МАГИСТРАЛИ**

Лисовский А.Д.  
Научный руководитель – Климкович П.И.

**СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПО ЧАСТИЧНЫМ РАЗРЯДАМ**

Савицкий П.Ю., Волов Р.А.  
Научный руководитель – Климкович П.И.

**ВЫЯВЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ**

Кондратеня В.А.  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Пономаренко Е.Г.

**ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**

ИСМАИЛ АБДАЛЛАХ  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – КЛИМКОВИЧ П.И.

**ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ФАКТОР КАК ОСНОВОПОЛАГАЮЩАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ В  
РАЗРАБОТКЕ КОНЦЕПЦИИ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ  
СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ**

ДРОБЫШЕВ С.А.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – САПОЖНИКОВА А.Г.

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТОКОВ  
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПРОЛЕТОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ  
УСТРОЙСТВ ПО УСЛОВИЮ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО СБЛИЖЕНИЯ ФАЗ**

БАРАН А.Г., БАРАН Ю.Г.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – КЛИМКОВИЧ П.И.

**ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ТОК  
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ОШИНОВКИ ПРОЛЕТОВ  
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 110 КВ БЕЗ УЧЕТА СПУСКОВ К АППАРАТАМ**

БАРАН А.Г.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – К.Т.Н., ДОЦЕНТ ПОНОМАРЕНКО Е.Г.

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ГИБКОЙ ОШИНОВКИ ШИННЫХ ПРОЛЕТОВ  
ТИПОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 110 КВ**

БАРАН А.Г., ВАСИЛЬЕВА А.А.  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – К.Т.Н., ДОЦЕНТ ПОНОМАРЕНКО Е.Г.

УДК 621.311

## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Астошонок В.С.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Булойчик Е.В.

Нейронные сети (НС) – это раздел искусственного интеллекта, в котором для обработки сигналов используются явления, аналогичные происходящим в нейронах живых существ. Важнейшая особенность сети, свидетельствующая о её широких возможностях и огромном потенциале, состоит в параллельной обработке информации всеми звеньями. Другое, не менее важное свойство – способность к обучению и обобщению накопленных знаний.

Искусственные нейронные сети (ИНС) представляют собой простейшие математические модели мозга. Математическая модель нейрона представляет собой суммирующий пороговый элемент. Входные сигналы искусственного нейрона умножаются на веса связей, суммируются и сравниваются с порогом. Пороговые суммирующие элементы объединяются в сеть.

Любой нейрон характеризуется следующими параметрами:

- вектор входов  $X = (X_1, \dots, X_n)$ ;
- вектор выходов  $O = (O_1, \dots, O_m)$ ;
- вектор весов  $W = (W_1, \dots, W_n)$ ;
- порог срабатывания  $P$ ;
- функция активации  $F$ .

Энергетика небольшими, но уверенными шагами идет в «зелёное» будущее. В ближайшее время искусственный интеллект существенно автоматизирует процесс преобразования энергии ветра и солнца. Однако постоянной проблемой с возобновляемыми источниками энергии, такими как ветер и солнечная энергия, является их ненадежность, т. к. эти источники зависят от погоды. Учёные из разных корпораций стараются решить эту проблему внедрением искусственного интеллекта. Благодаря новому методу интеллектуального анализа данных компания Xcel смогла получить доступ к отчетам о погоде с более высоким уровнем точности и детализации. Для обеспечения этих подробных метеорологических отчетов система искусственного интеллекта использует данные из местных спутниковых отчетов, метеорологических станций, а также ветропарков в окрестностях. Алгоритмы, управляющие системой, обучаются выявлять шаблоны в этих наборах данных и делать прогнозы на их основе.

Компания Nnergix использует прогноз погоды с высоким разрешением, создаваемый на базе спутниковых изображений, на основе которых формируются крупные и малые погодные модели. Анализ этих данных позволит алгоритмам обучения машин предсказывать состояние атмосферы для определённой области.

С целью сбора данных о производстве и потреблении электроэнергии был придуман новый термин – Smart Grid, которое дословно переводится как умные сети электроснабжения.

Smart Grid – это система передачи электроэнергии от производителя к потребителю, которая самостоятельно отслеживает и распределяет потоки электричества для достижения максимальной эффективности использования энергии. Толчком в развитии умных сетей стало масштабное применение возобновляемых источников энергии, которые характеризуются непостоянством выработки электроэнергии как по времени, так и по мощности. Поэтому была необходима новая концепция электрических сетей, способная обеспечить повышение потребительских свойств и эффективность использования энергии с учетом всех факторов развития электроэнергетики в будущем. Такой концепцией и стала Smart Grid.

Хорошим примером применения новых технологий является проект Smart Grid Gotland, направленный на разработку стратегии создания и эксплуатации крупномасштабных

интеллектуальных сетей с большой долей непостоянной энергии ветра в общем энергобалансе и реализованный на острове Готланд в Швеции. Это важный шаг и один из ключевых элементов развития современной устойчивой экономики, который может быть воплощен в масштабах всей Швеции и других стран мира. Со временем этот проект сможет служить международной моделью интеллектуальных электрических сетей.

На данный момент в США и Европе формируется широкая система стандартов и требований к функциям, элементам, устройствам, системе взаимодействий Smart Grid.

Использование искусственного интеллекта позволит снизить потери, улучшить качество электроэнергии, снизит общую стоимость распределения электроэнергии и т. д.

В настоящее время существует немало проблем, замедляющих развитие искусственного интеллекта:

- потенциальные инвесторы в системы искусственного интеллекта испытывают недостаток информации в современных трендах в этой области;

- нехватка экспертов по искусственному интеллекту в руководстве технологических компаний;

- в странах СНГ существует нехватка учебных центров, которые готовят специалистов в области Data Science;

- отечественные корпорации в экосистеме рынка искусственного интеллекта раскрывают меньше информации при сравнении с международными компаниями, что осложняет процесс машинного обучения на основе больших данных;

- отечественные компании и эксперты слабо интегрированы в международный академический научный обмен в этой сфере;

- в СНГ стартапы сталкиваются с сложностями при наборе специалистов по машинному обучению.

Многие государства уже внедряют системы Smart Grid и строят распределенные энергосистемы вместо классических централизованных. Распределенные системы легко интегрируют в себя узлы производства, передачи и распределения, при этом частью сети становятся даже обычные электросчетчики и домашние бытовые приборы. При создании интеллектуальных энергосистем инженеры должны решать задачи управления энергией, передачи данных и анализа информации.

Развитие «умных сетей» в Беларуси находится на самом начальном уровне, вероятнее всего, пока обсуждаются возможности и аспекты внедрения данной технологии. Мировой опыт в реализации пилотных проектов и многочисленные исследования показывают, что применение интеллектуальных сетей перспективно и экономически оправдано. На сегодняшний момент Smart Grid системы – это закономерный этап развития электроэнергетики с учетом мировых технических достижений, и Беларусь ни в коем случае не должна его игнорировать, двигаясь вперед совместно с ведущими державами. Стоит отметить, что перед нашей страной не стоит вопрос о разработке основных концепций, ведь уже сейчас накоплен огромный опыт в этой сфере. Возможно, внедрение «умных сетей» позволило бы решить проблемы с интеграцией Белорусской АЭС в энергосистему страны.

#### Литература

1. Круглов, В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Борисов, В.В. Круглов. – М. : Горячая линия-Телеком, 2002. – 383 с.

2. Аксёнов, С.В. Организация и использование нейронных сетей (методы и технологии) / В.С. Аксёнов, Б.В. Новосельцев : под ред. В.Б. Новосельцева. – Томск : Изд-во НТЛ, 2006. – 128 с.

3. Smart Grid или умные сети электроснабжения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://www.eneca.by/ru\\_smartgrid/](https://www.eneca.by/ru_smartgrid/). – Дата доступа : 03.03.2018.

4. Wallnerstrom J.C. Analys av smartaelnatsteknologier inom kategorin elnatslosningar / С.С. Wallnerstrom, Р. Hilber, S. Babu and J.H. Jurgensen. – Stockholm : Sammordningsradet for smartaelnat, 2014. – 115 p.

УДК 620.9

## СРАВНЕНИЕ КАБЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ПВХ И СШЭ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Васильев Т.С.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Дерюгина Е.А.

Система энергетики любого современного государства – это фундамент для обеспечения его экономической независимости и развития. Эффективное использование природных энергетических ресурсов и всего потенциала энергетического сектора ведет к устойчивому росту экономики и качества жизни населения страны и содействует укреплению ее внешнеэкономических позиций. Поэтому грамотный подход к выбору оборудования используемого в производстве и доставке электроэнергии – один из основных приоритетов в системе энергетики Республики Беларусь.

Кабель – конструкция из одного или нескольких изолированных друг от друга проводников (жил), или оптических волокон, заключённых в оболочку. Кроме жил и изоляции кабель может содержать экран, сердечник, наполнитель, стальную или проволочную броню, металлическую оболочку, внешнюю оболочку.

Каждый конструктивный элемент нужен для работоспособности кабеля в определённых условиях среды. Также конструктивные элементы кабеля отличают его от провода.

Оболочка кабеля предназначена для защиты проводников и изоляторов от внешних воздействий, прежде всего от влаги, которая приводит к нарушению изоляции электрических кабелей, а также помутнению оптических волокон.

Оболочка кабеля может состоять из одного и более герметизирующих и армирующих слоёв, в качестве этих слоёв могут применяться различные материалы: ткань, пластмассы, металл, резина и проч. Кабели для передачи электрических сигналов могут быть снабжены экраном из металлической сетки, листового металла (фольги) или полимерной плёнки с тонким металлическим покрытием.

В настоящее время на смену традиционным маслonaполненным кабелям и кабелям с бумажной пропитанной изоляцией приходят кабельные линии нового поколения. На современном этапе в ближайшей перспективе к ним можно отнести кабели с пластмассовой изоляцией и кабели с изоляцией из поливинилхлорида.

Оконцовки кабельной продукции, как правило, нуждаются в подготовке перед монтажом. Процесс подготовки кабеля к подключению называют разделкой кабеля. Чаще всего подразумевается удаление изоляции на требуемую длину, монтаж разъемов или кабельных наконечников, маркировка проводов, электро- и гидроизоляция окончков. Физическая модель загорания в металлическом коробе с крышкой:

– происходит короткое замыкание в одном из кабелей, выделяется значительное количества тепла, кабель нагревается до температуры 900–1000 °С и загорается;

– прогреваются близлежащие кабели до температур пиролиза 280–900 °С, это приводит к выделению теплоты и вовлечения в процесс горения близлежащих кабелей по мере их прогрева;

– выделяющиеся при пиролизе газы разогревают верхнюю крышку короба, и она под действием термических напряжений деформируется и смещается, давая доступ кислороду.

При воздействии тока перегрузки происходит разогрев токопроводящей жилы, изоляции, оболочки кабеля. При достижении предельной температуры начинаются химические реакции термического разложения и газификации материала изоляции и оболочки кабеля. Образующиеся при этом продукты термического разложения нагреваются и смешиваются с воздухом, происходит термическое окисление. При достижении критических значений концентрации продуктов термического разложения в воздухе и температуры газовой смеси происходит воспламенение.

В химическом составе оболочек кабелей с маркировкой «нг» присутствуют элементы галогенового ряда. Кабель имеет повышенную устойчивость к распространению горения и возгоранию от коротких замыканий. Однако горение его в условиях пожара, когда он сам подвергается воздействию пламени, может привести к повышению уровня токсичности продуктов горения. Поэтому их применение в метрополитенах Западной Европы было запрещено в конце 1970-х годов.

Запрещена открытая прокладка кабелей с оболочкой, распространяющей горение. Общим для всей электротехнической продукции является требование о том, что в случае, когда изделия сами подвергаются пожарной опасности от внешнего источника, важно, чтобы они не способствовали распространению пожара в большей степени, чем строительные материалы или конструкции, являющиеся источником зажигания.

Кабели и кабельная арматура, к которым предъявляются требования пожарной безопасности, должны удовлетворять требованию по нераспространению горения.

Для кабелей, проложенных пучком, каждый из которых удовлетворяет требованиям по нераспространению горения только при одиночной прокладке, необходимо применение дополнительных мер, обеспечивающих нераспространение горения.

Поливинилхлоридные пластикаты, применяемые в кабельных изделиях, делятся на три основные группы:

- изоляционные – имеют высокие электрические характеристики;
- шланговые – применяемые для защиты элементов кабельных изделий;
- полупроводящие – используемые для изготовления экранов.

Твёрдый поливинилхлорид имеет высокое содержание хлора (около 57 %) и воспламеняется с трудом. Один килограмм твёрдого поливинилхлорида выделяет 350 литров газообразного хлороводорода, который при растворении может дать более 2 литров концентрированной (25 %) соляной кислоты.

Для изоляции кабелей применяется мягкий поливинилхлорид или кабельный пластикат. Этот материал содержит 50 % различных добавлений (пластификаторов и др.), которые сильно изменяют горючие свойства полимера. Пластификаторы начинают улетучиваться уже при температуре 200 °С и загораются. Содержание хлора уменьшается примерно до 35 %, и его не хватает, чтобы препятствовать распространению огня. Однако при сильном выделении хлороводорода твёрдый поливинилхлорид, удалённый от очага, не загорается, и пожар гаснет.

Благодаря перепаду температур, тяге, создаваемой в кабельных шахтах, газы, содержащие хлороводород, уносятся от очага пожара, проникают в щитовые и аппаратные помещения и оседают на оборудовании.

В настоящее время кабели с пластмассовой изоляцией активно заменяют кабели с бумажной изоляцией в классах среднего и высокого напряжения (10–220 кВ).

Среди пластмассовых изолирующих материалов наиболее современным является сшитый полиэтилен (СПЭ), отличающийся хорошими диэлектрическими свойствами и высокой термической стойкостью.

Для изоляции и оболочки кабеля используют полимерные материалы, обладающие большим диапазоном рабочих температур, малой гигроскопичностью, прочностью и легкостью. Эти качества обусловили преимущественное применение кабелей с изоляцией из СПЭ в странах Европы и Америки.

Пластмасса как изоляционный материал упрощает технологию изготовления, прокладку и монтаж силовых кабелей. Пластмассовую изоляцию кабеля чаще всего выполняют из ПВХ либо СПЭ (сшитого полиэтилена).

Полиэтилен хорошо подходит для изолирования высоковольтных кабелей. Такой изоляционный вид имеет ряд достоинств:

- диапазон рабочих температур больше, чем у проводов с другим типом изоляции;
- экологическая безопасность (кабель можно прокладывать на любых объектах, практически без техобслуживания использовать кабельные линии);

- стойкость к воздействию кислот, щелочей и влаги;
- работы по монтажу и прокладке данных кабелей могут выполняться без дополнительного подогрева с радиусом изгиба до 15 наружных диаметров и при однократном изгибе – до 7,5 при температуре от  $-15$  до  $-20$  °С;
- одинаковая легкость прокладки в разных зонах (и на сложных трассах, и в кабельных сооружениях);
- прочность (повреждаемость на несколько порядков ниже, если сравнивать с бумажной изоляцией);
- кабель можно прокладывать по пересеченной местности.

Диэлектрические свойства СПЭ довольно высокие. От метода изготовления зависит плотность полиэтилена. Так, высокоплотный СПЭ обладает хорошей механической стойкостью и высокой температурой плавления. Он теряет эластичность при температуре от  $140$  °С, в то время как низкоплотный - всего при  $105$  °С.

Кабель с поливинилхлоридной изоляцией обычно прокладывают в зданиях, а не под открытым небом, поскольку он не рассчитан на сильные морозы и вредное воздействие ультрафиолета. Тем не менее, разработан ряд модификаций, которые способны выдерживать температуру до  $-60$  °С. Для защиты от солнца кабель прокладывают в трубах.

Данные силовые кабели с пластмассовой изоляцией обладают высокой устойчивостью к повреждениям, а также не возгораются. Добавление таких пластификаторов, как тальк, карбонат кальция и каолин повышают их эластичность и стойкость к морозам.

Кабель с ПВХ-изоляцией отличается рядом достоинств:

- отличная пропускная способность;
- высокий допустимый ток нагрузки (по сравнению с аналогами с бумажной изоляцией – на 30 % выше);
- экологическая безопасность;
- малый вес, средний диаметр и большой радиус изгиба позволяют эксплуатировать кабель на сложных трассах;
- высокий ток термической стойкости при коротком замыкании (до  $250$  °С);
- незначительный показатель потерь в изоляции (0,001).

Из недостатков необходимо выделить два:

- под действием ультрафиолетовых лучей активизируется процесс старения;
- отсутствует стойкость к воздействию высоких температур.

Кабели СПЭ имеют несколько преимуществ перед кабелями с ПВХ изоляцией. Их предпочтительно использовать если требуется проложить линию на пересеченной местности, т. к. они более стойкие к воздействию ультрафиолета и мороза по сравнению с ПВХ изоляцией.

Однако кабели с ПВХ изоляцией лучше выдерживают перегрев при коротком замыкании и более легкие, чем кабели с СПЭ.

### Литература

1. Смелков, Г.И. Пожарная безопасность электропроводок / Г.И. Смелков. – М., 2009. – 328 с.

УДК 621.311

**КОММУНИКАЦИИ НА ПОДСТАНЦИИ ПО СТАНДАРТУ МЭК 61850**

Жданович Е.А.

Научный руководитель – к.т.н. Ломан М.С.

За последнее десятилетие резко возросло использование «цифровых» данных. Распределительные подстанции, электростанции, промышленные, коммерческие и даже бытовые потребители выражают различные аспекты своей жизнедеятельности в цифровом виде. В следствии чего возникла необходимость новой информационной модели коммуникации для управления большим количеством устройств и связи различных устройств друг с другом. Такая модель была разработана и стандартизована как стандарт МЭК 61850 (Системы и сети связи подстанций).

Работа над стандартом МЭК 61850 началась в 1995 году двумя независимыми, параллельно работающими группами. Позднее, в 1997 году, работы обеих групп были объединены под эгидой рабочей группы 10 ТК 57 МЭК и вошли в основу стандарта МЭК 61850.

В основе стандарта лежат три положения:

- он должен быть технологически независимым, то есть вне зависимости от технологического прогресса стандарт должен подвергаться минимальным изменениям;
- он должен быть гибким, то есть допускать решение различных задач с использованием одних и тех же стандартизованных механизмов;
- он должен быть расширяемым.

На сегодняшний день МЭК 61850 состоит из 25 различных документов, которые охватывают широкий круг вопросов и делают его гораздо больше, чем просто спецификацией ряда коммуникационных протоколов. При работе с МЭК 61850 необходимо учитывать, что стандарт не описывает конкретные методики внедрения, требования к конкретным продуктам, не стандартизирует функциональность и алгоритмы устройств, сфокусирован на описании возможностей первичного и вторичного оборудования, функций защиты, управления и автоматизации, видимых извне. К недостаткам стандарта часто относят неконкретность описания требований и слишком большую свободу при реализации, что, по мнению разработчиков, как раз является одним из его главных достоинств.

Достаточно большая часть стандарта МЭК 61850 посвящена определению требований к описанию информации внутри устройства. Так, седьмая глава стандарта МЭК 61850 определяет иерархическую структуру хранения данных внутри устройства и способы обращения к ним.

Чтобы рассмотреть структуру организации данных внутри устройства в соответствии с МЭК 61850, полезно начать рассмотрение с «логических узлов». Согласно стандарту Логический узел (Logical Node) является наименьшим элементом, способным обмениваться данными. Логический узел удобно рассматривать как одну из составных функций устройства. Отдельно следует упомянуть о так называемых «общих логических» узлах, класс которых имеет наименование GGIO. Общие логические узлы предназначены для моделирования узлов данных, не подпадающих под описание ни одной из остальных функциональных групп. В сервере может быть реализовано одно или несколько так называемых «логических устройств». Основным назначением логических устройств является группировка логических узлов.

Протокол GOOSE, описанный главой МЭК 61850-8-1, является одним из наиболее широко известных протоколов, предусмотренных стандартом МЭК 61850. Дословно расшифровку аббревиатуры GOOSE – Generic Object-Oriented Substation Event – можно перевести как «общее объектно-ориентированное событие на подстанции».

Наборы данных используются для группировки данных, которые будут отправляться устройством с использованием механизма GOOSE-сообщения. Следует отметить, что в рамках одного GOOSE-сообщения может отправляться как одно значение (например, сигнал

пуска МТЗ), так и одновременно несколько значений (например, сигнал пуска и сигнал срабатывания МТЗ и т. д.). Устройство-получатель, при этом, может извлечь из пакета лишь те данные, которые ему необходимы. Передаваемый пакет GOOSE-сообщения содержит все текущие значения атрибутов данных, внесённых в набор данных. При изменении какого-либо из значений атрибутов, устройство моментально инициирует посылку нового GOOSE-сообщения с обновлёнными данными. По своему назначению GOOSE-сообщение призвано заменить передачу дискретных сигналов по сети оперативного тока.

В 1980 году протокол MMS (Manufacturing Message Specification) был разработан для автоматизации автомобильного производства компанией General Motors. Однако широкое распространение протокол получил лишь после того, как был существенно переработан компанией Boeing, после чего получил широкое распространение в автомобильной и аэрокосмической отраслях и стал активно использоваться производителями программируемых логических контроллеров (Siemens, Schneider, Daimler, ABB). В 1990-м MMS был стандартизован как ИСО/МЭК 9506. На сегодняшний день существует вторая редакция этого стандарта от 2003 года.

Задачи, решавшиеся при разработке протокола MMS были в целом схожи с задачами, которые решаются стандартом МЭК 61850:

– обеспечение типовой процедуры передачи данных с контроллеров различных типов вне зависимости от их производителя;

– считывание и запись данных должны осуществляться с использованием стандартных сообщений.

MMS не определяет прикладных сервисов, которые определены стандартом МЭК 61850. Кроме того, протокол MMS сам по себе не является коммуникационным протоколом, он лишь определяет сообщения, которые должны передаваться по определенной сети. В качестве коммуникационного протокола в MMS используется стек TCP/IP. Одной из основных идей, заложенных в стандарт МЭК 61850, является его неизменность со временем. MMS не определяет прикладных сервисов, которые определены стандартом МЭК 61850. Кроме того, протокол MMS сам по себе не является коммуникационным протоколом, он лишь определяет сообщения, которые должны передаваться по определенной сети.

В настоящее время разработан стандарт МЭК 61850 для промышленности, являющийся международным стандартом. Этот стандарт отвечает на большинство вопросов, которые возникают в связи с цифровыми преобразованиями. Стандарт отражает функциональную совместимость оборудования от разных производителей с установленными процессами сертификации на соответствие. Обсуждается возможность использования стандарта МЭК 61850 в качестве протокола связи подстанции с центром управления. Стандарт МЭК 61850 становится предпочтительным, потому что сетевые компании всего мира переходят к решениям на основе вычислительных сетей для подстанций.

### Литература

1. Аношин, А.О. Стандарт МЭК 61850. Протокол GOOSE / А.О. Аношин, А.В. Головин // Новости ЭлектроТехники. – 2012. – № 6. – С 78.
2. Аношин, А.О. Стандарт МЭК 61850. Информационная модель устройства / А.О. Аношин, А.В. Головин // Новости ЭлектроТехники. – 2012. – № 5. – С 77.
3. Баглейбтер, О.И. Трансформатор тока в сетях релейной защиты. Противодействие насыщению ТТ апериодической составляющей тока КЗ / О.И. Баглейбтер // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – № 5. – С 53.
4. Шевцов М.В. Передача дискретных сигналов между УРЗА по цифровым каналам связи / М.В. Шевцов // Релейщик. – 2009. – № 1. – С 34.

УДК 620.9

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ГИБКИХ ШИН ОТКРЫТЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 330 кВ

Зарихта К.С.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.

В распределительных устройствах высокого напряжения электростанций и подстанций в Республике Беларусь применяются преимущественно токоведущие конструкции с гибкими проводниками. Благодаря особенностям конструкции гибкие шины способны принимать форму, обусловленную внешними нагрузками. Электродинамические воздействия больших токов короткого замыкания приводят к необходимости разработки методов расчета динамики гибких проводов при КЗ, с помощью которых можно было бы определить критерии электродинамической стойкости проводов: максимальные отклонения и тяжения.

В открытых распределительных устройствах (ОРУ) с напряжением 330 кВ в качестве токоведущих частей рекомендуются гибкие проводники тех же марок и сечений, что и для воздушных линий электропередачи ЛЭП. В проектной и эксплуатационной практике для системы подвешенных проводов распределительных устройств (РУ) применяется термин «гибкая ошиновка». Широкое применение гибкой ошиновки в ОРУ напряжением 330 кВ объясняется ее универсальностью, простотой монтажа, высокой механической прочностью.

Основными элементами гибкой ошиновки являются многопроволочные сталеалюминиевые провода с номинальными сечениями 70–1000 мм<sup>2</sup>. В ОРУ напряжением 330 кВ крупных электростанций с целью обеспечения пропускной способности и экономической плотности тока применяется ошиновка с двумя проводниками в фазе сечением 300–600 мм<sup>2</sup> при расстоянии между проводниками фазы, которое называют «шагом расщепления», – 0,12 м. Расщепление проводов при данном напряжении обусловлено также необходимостью ограничения коронного разряда. Так, в ОРУ напряжением 330 кВ принимается ошиновка из двух проводов в фазе. Шаг расщепления фазы равен 0,4–0,6 м. Между проводниками расщепленной фазы через 8–10 м по длине пролета, а также на спусках и шлейфах устанавливаются дистанционные распорки. Однако указанное расстояние не является нормированной величиной и может изменяться при проектировании. Типы дистанционных распорок выбираются в зависимости от марки провода и расстояний между проводниками в фазе. Как правило, применяются парные распорки, т. е. распорки, скрепляющие между собой два провода. Так, в случае трех проводов в фазе распорки устанавливаются «кустами» по три распорки в кусте, а при четырех проводах – по пять штук в кусте: четыре по сторонам квадрата и одна по диагонали.

Провода гибкой ошиновки подвешиваются к несущим конструкциям порталного типа, называемым порталами, посредством подвесных гирлянд изоляторов. Как правило, применяются натяжные гирлянды изоляторов. В отдельных случаях используются поддерживающие гирлянды. Гирлянды собираются из стеклянных изоляторов типа ПС. Все соединения в гирлянде, а также крепление гирлянды к порталам выполняются шарнирно. Таким образом, гирлянда изоляторов представляет собой гибкую цепь элементов. Провода в ОРУ с напряжением 330 кВ подвешиваются на двухцепных с отдельным креплением цепей. Гибкая ошиновка вместе с порталами образует расположенные рядами пролеты ячеек, куда подключены ЛЭП, трансформаторы и другие присоединения. В схемах со сборными шинами перпендикулярно пролетам ячеек располагаются шинные пролеты, ошиновка которых проходит ярусом ниже. Они служат для создания электрической связи присоединений между собой. Связь между соседними пролетами выполняется с помощью шлейфов. Соединение гибких шин и электрических аппаратов РУ выполняется посредством отпайек. Отпайки крепятся к шинам с помощью ответвительных зажимов практически без натяжения. В пролетах типовых ОРУ имеется не более трех спусков к электрическим аппаратам. Минимальные и максимальные длины пролетов в типовых ОРУ 330 кВ приняты 48–78 м.

В соответствии с правилами устройства электроустановок (ПУЭ) [3] порталы для подвески гибкой ошиновки ОРУ должны выполняться сборными железобетонными или из стали. В отдельных случаях стойки порталов выполняются железобетонными, а траверсы (верхние части порталов) – металлическими.

Гибкость шин распределительных устройств позволяет им принимать форму, обусловленную внешними нагрузками. При протекании по ним токов КЗ проводники соседних фаз начинают взаимодействовать: вначале они отталкиваются, затем сближаются. В результате может произойти их сближение на недопустимо малое расстояние по условию электрической прочности изоляционного промежутка. Наибольшее сближение соседних проводников наблюдается, как правило, при двухфазном КЗ. Таким образом, более вероятное КЗ на отходящих воздушных ЛЭП может сопровождаться вторичным КЗ на шинах РУ из-за их недопустимого сближения с последующим отключением всех присоединений. При схлестывании большие токи КЗ ведут к перегосу проволок проводов, что может явиться причиной их обрыва. На электрические аппараты РУ и опорные конструкции при КЗ воздействуют ударные нагрузки.

Под электродинамической стойкостью гибких шин понимают их способность противостоять электродинамическому действию токов КЗ до и после автоматического отключения цепи КЗ без повреждений. ПУЭ указывает на ток КЗ в 20 кА, по достижении которого необходимо производить расчет гибких шин на электродинамическую стойкость. С возрастанием токов КЗ их электродинамическое действие становится ключевым фактором, определяющим габариты и механические характеристики токоведущих конструкций с гибкими проводами при проектировании.

Анализ и обобщение результатов экспериментальных исследований позволяет составить подробную картину поведения гибких проводов при КЗ. В траекториях движения проводов выделяют два участка. На первом провода движутся с ускорением под действием электродинамических усилий (ЭДУ). Началом второго участка является положение провода в момент отключения КЗ. После отключения движение провода определяется сочетанием действия инерционных и упругих сил и тяжения провода. Из-за влияния температурных удлинений проводов, податливости опор, а также изменения формы проводов и гирлянд изоляторов траектории движения гибких проводников приобретают более сложную форму. С увеличением токов траектория становится сложнее, достигая в итоге предельной круговой формы. Минимальное расстояние между проводниками соседних фаз в процессе сближения, очевидно, будет зависеть от максимального отклонения у обоих проводников.

Ударные нагрузки на аппараты и опорные конструкции определяются тяжениями, возникающими в гибких шинах при их движении.

Согласно ГОСТ оценка электродинамической стойкости гибких проводов должна производиться по двум условиям:

$$S_{\max} \leq S_{\text{доп}};$$

$$T_{\max} \leq T_{\text{доп}},$$

где  $S_{\max}$ ,  $T_{\max}$ ,  $S_{\text{доп}}$ ,  $T_{\text{доп}}$  – соответственно максимальные расчетные и допустимые отклонения и тяжения гибких проводов при КЗ.

Максимальные расчетные отклонения проводов  $S_{\max}$  определяются из траекторий их движения при КЗ в точках максимального размаха колебаний

Наиболее слабыми по механической прочности элементами являются опорные конструкции и аппараты РУ. Поэтому для них динамические усилия при КЗ наиболее опасны.

Если любое из неравенств не выполняется, то происходит нарушение электродинамической стойкости гибких шин, и минимальное значение тока КЗ, при котором это происходит, называется током электродинамической стойкости гибкой ошиновки  $I_{\text{дин}}$ .

Токи электродинамической стойкости гибкой ошиновки  $I_{\text{дин}}$  возрастают с увеличением сечения проводника. Это объясняется большей инерционностью тяжелых проводников. Однако это увеличение не столь значительно, поэтому выбор проводника большего сечения

во вновь сооружаемых РУ приведет к росту затрат и не даст желаемого эффекта в долгосрочном периоде с учетом вероятно роста токов КЗ. В существующих РУ такое решение вообще неприемлемо из экономических и технических соображений. Одним из мероприятий, ограничивающих размах колебаний, может стать уменьшение стрелы провеса. Однако это приводит к дополнительным нагрузкам на опорные и изоляционные конструкции. Наиболее действенным решением, не требующим больших материальных и временных затрат, является установка междуфазных распорок. Их можно применять как во вновь сооружаемых, так и в существующих РУ.

#### Литература

1. Васильев, А.А. Электрическая часть станции и подстанций / А.А. Васильев. – М. : Энергия, 1980. – 608 с.
2. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
3. Сергей, И.И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент / И.И. Сергей, М.И. Стрелюк. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.

УДК 621.3

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Асрятян Г.А.

Научный руководитель – к.т.н., профессор Силюк С.М.

Под оптимальным режимом понимается такое распределение нагрузки между параллельно работающими генерирующими источниками, при котором обеспечивается минимальный расход энергоресурсов на выработку требуемого количества энергии. В зависимости от постановки задачи оптимизации энергоресурсами могут быть расходы топлива, тепла, водных ресурсов. Оптимизация может проводиться и в целях минимизации затрат на энергоресурсы.

Основой расчетов оптимальных режимов нагрузки оборудования электростанций, являются его характеристики, т. е. зависимости расхода первичной энергии (энергоресурсов) от нагрузки агрегатов.

Одной из важнейших задач эксплуатации является оптимальное распределение электрической нагрузки между электростанциями энергосистемы и их отдельными блоками, и агрегатами.

Для определения оптимальных нагрузок используются различные методы, в том числе методы математического моделирования.

Метод математического моделирования является более оптимизированным методом, для данных задач.

Электрическая нагрузка, заданная тепловой электростанции, должна быть распределена между конденсационными турбоагрегатами или энергоблоками таким образом, чтобы при полном выполнении поставленных производственно-технических задач расход топлива был минимальным. При этом топливная составляющая себестоимости производства электроэнергии также будет минимальна.

Распределяется электрическая нагрузка между конденсационными турбоагрегатами турбинного цеха при цеховой структуре ТЭС, если все агрегаты однотипны и равновелики.

Если варианты распределения нагрузки различаются числом работающих турбоагрегатов, т. е. распределение нагрузки по различным вариантам связано с включением и выключением отдельных из них, то влияние холостых расходов уже не может быть исключено из расчетов, и метод относительных приростов требует соответствующих коррективов.

### Литература

1. Цоколаев, И.Б. Наивыгоднейшее распределение нагрузок между агрегатами тэц со сложной тепловой схемой / И.Б. Цоколаев, Г.М. Павлов // Энергетика. (Ленинградский ордена Ленина политехнический институт им. М. И. Калинина). – 1975. – 20 с.
2. Васильев, А.А. Электрическая часть станций и подстанций : учеб. пособие для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков. – 2-е изд., доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

УДК 621.3

**СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ «БРЕСЛЕР»**

Кокаш А.В.

Научный руководитель – Климкович П.И.

На практике ОМП стало интенсивно развиваться в послевоенные годы, начиная с работ М.П. Розенкнопа, который занимался не только теоретическими разработками методов ОМП, но и их практической реализацией, внедряя первые, еще очень несовершенные, фиксирующие приборы с механической фиксацией стрелки амперметра. По мере развития цифровой техники, и она стала использоваться в устройствах ОМП и осциллографах. Открылись широкие возможности переработки большого количества исходной информации для одной цели – определить, рассчитать и сказать – где, на каком расстоянии от подстанции (ПС) или электростанции (ЭС) повредилась ВЛ.

Основным критерием сравнения различных методов и устройств определения расстояния до места повреждения (ОМП) линии электропередачи (ЛЭП) является их точность. Сегодня в устройствах, находящихся в эксплуатации, используются два основных метода ОМП: по параметрам аварийного режима (ПАР); волновые.

ОМП по ПАР в качестве исходной информации для расчёта использует токи и напряжения ЛЭП. Следует сразу разделить методы и устройства ОМП на односторонние и двухсторонние. Последние одновременно используют информацию с обоих концов ЛЭП, за счёт чего они имеют погрешность ОМП в разы, а иногда и на порядок меньше.

Формульные методы ОМП основаны на анализе симметричных составляющих сигналов, возникающих в момент замыкания на линии электропередачи, поскольку их величины зависят от места повреждения. Достоинством метода является сравнительная простота настройки (адаптации) устройства ОМП на конкретную линию, которая заключается в выборе участков однородности и задании их параметров. Последние, как правило, представляют собой удельные параметры ЛЭП. Модельные методы ОМП основаны на математическом моделировании ЛЭП. В момент короткого замыкания (КЗ) записывается аварийная осциллограмма, и на основе её анализа применительно к модели линии ищется расстояние до точки повреждения. Основное достоинство метода – возможность учёта особенностей ЛЭП любой сложности. По мере эксплуатации модель адаптируется к конкретной линии, проходя несколько итераций до получения устраиваемой точности ОМП.

Волновое ОМП. С развитием спутниковой техники синхронизации времени резко возрос интерес к методам ОМП, основанным на измерении времени пробега электромагнитных волн по ЛЭП. Волны бывают искусственного и естественного происхождения. Искусственные волны создаются зондирующими импульсами, посылаемыми в ЛЭП специальным устройством. Естественные волны возникают в ЛЭП при электромагнитных возмущениях: коммутации выключателей, коротких замыканиях, обрывах линии и т. д.

Аппаратная часть волнового ОМП (рисунок 1) состоит из двух микропроцессорных терминалов (двух полукомплектов), двух устройств спутниковой синхронизации (GPS/ГЛОНАСС) и аппаратуры связи между терминалами. Аппаратура определяет разрешающую способность метода.

Аппаратный комплекс локации места повреждения состоит из двух терминалов серии «Бреслер-0107.090», расположенных по концам ЛЭП и канала связи. Синхронизация устройств дает возможность определения места аварии волновым методом, который исключает влияние неточного описания параметров ЛЭП на результат расчета.

Алгоритмы ОМП и варианты устройств (X – количество контролируемых ЛЭП):

- *Бреслер-0107.090.ОХ\** – односторонний метод по параметрам аварийного режима;
- *Бреслер-0107.090.ДХ\** – двухсторонний метод по параметрам аварийного режима;
- *Бреслер-0107.090.ВХ\** – волновой метод.



Рисунок 1. К определению волновой длины линии

Терминал «БРЭСЛЕР-0107.090.ОХ». Принцип работы устройства основан на методе с односторонним замером параметров аварийного режима. Ключевую роль в данном алгоритме играет модель ЛЭП, от точности описания которой зависит погрешность ОМП. Оценка расстояния до места повреждения  $X_f$  и необходимой зоны обхода линии осуществляется на основе информации о параметрах линии электропередачи и режиме сети.

Терминал «БРЭСЛЕР-0107.090.ДХ». Предназначен для использования в качестве устройства ОМП параметрическим методом с двухсторонним замером. Алгоритм учитывает неоднородность линии, ответвления и не требует расчета эквивалентных сопротивлений систем, учета параллельных линий, режима заземления грозозащитного троса и т. д. Для организации двухстороннего ОМП требуется два полукомплекта (терминала), установленных по концам линии, на которые заведены соответствующие токи и напряжения, и канал связи для обмена данными с противоположным концом.

Терминал «БРЭСЛЕР-0107.090.ВХ». Дополнен специальным модулем, позволяющим наряду с параметрическими методами реализовать ОМП на волновом принципе. Он основан на измерении интервалов времени между моментами, в которые электромагнитные волны, возникающие в месте повреждения, достигают шин подстанции справа и слева линии.

Терминал «БРЭСЛЕР-0107.090.ВХ». Терминалы, синхронизированные посредством глобального времени, следят за электрическими величинами по концам ЛЭП. Пусковые органы в момент возникновения повреждения выделяют отрезок высокочастотного сигнала, включающий участки, как нормального режима, так и режима повреждения. Далее происходит обработка ВЧ-сигнала и нахождение меток времени  $t_1$  и  $t_2$ , которыми полукомплекты обмениваются. Каждый из них определяет величину  $\Delta t$  и расстояние до места повреждения  $x_f$ .

Особенности аппаратного комплекса ОМП:

- расчет полностью автоматизирован – результат ОМП выводится на дисплеи терминалов и передается диспетчеру, дополнительная подготовка персонала для работы с терминалами не требуется;

- пусковые органы реализованы на анализе сигналов промышленной частоты, и только в момент возникновения аварии выделяется отрезок высокочастотного сигнала;

- поиск метки времени возникновения переходного режима осуществляется с помощью математических функций анализа высокочастотного сигнала;

- помимо волнового метода в терминале реализованы двухсторонние и односторонние параметрические алгоритмы ОМП, увеличивающие надежность устройства;

- в терминалах предусмотрено резервирование канала связи с противоположным концом, диагностика каналов связи, светодиодная индикация потери связи со спутником и неудачного соединения с терминалом противоположной ПС;

– возможность использования волнового принципа ОМП на комбинированных кабельно-воздушных ЛЭП с учетом дифференцированной скорости распространения волн в различных средах приводит к повышению точности ОМП.

Повреждения линий электропередачи наносят ущерб электросетевым компаниям. Один из предпочтительных путей снижения ущерба лежит в сокращении суммарного времени отыскания и устранения повреждений за определённый эксплуатационный период. Особенно важную роль в этом играют средства определения места повреждения (ОМП).

#### Литература

1. Козлов, В.Н. О точности современных устройств ОМП / В.Н. Козлов, Ю.В. Бычков, К.И. Ермаков // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 1. – С. 42–46.
2. Беляев, Ю.С. Актуальные вопросы определения мест повреждения воздушных линий электропередачи / Ю.С. Беляев. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2010. – 76 с.
3. Терминал определения места повреждения Бреслер 0107.090. Руководство по эксплуатации / ООО «НПП Бреслер». – Чебоксары, 2016. – 147 с.
4. Козлов, В.Н. Перспективные разработки ООО «НПП БРЕСЛЕР» Развитие систем определения места повреждения линий электропередачи / В.Н. Козлов, Ю.В. Бычков, К.И. Ермаков. – Режим доступа : <http://kka-rntoee.ru/images/docs/20-conference-2017/2-Kozlov-Perspektivye-razrabotki-NPP-Bresler.pdf>. – Дата доступа : 24.04.2018.

УДК 621.3

**РЕЖЕКТОРНЫЕ АКТИВНЫЕ RC-ФИЛЬТРЫ**

Науменко В.И., Никитин Е.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.

В радиотехнике и электронике электрические фильтры подразделяют на пассивные и активные. Схемы пассивных фильтров содержат только пассивные элементы: резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности. В схемы активных фильтров помимо указанных элементов входят такие активные изделия, как транзисторы или интегральные микросхемы. Фильтрующие свойства устройства определяются его амплитудно-частотной характеристикой, которой называется зависимость коэффициента усиления этого устройства от частоты сигнала. В некоторой области частот, которая называется полосой пропускания или полосой прозрачности, электрические колебания передаются фильтром с входа на выход практически без ослабления. Вне полосы прозрачности расположена полоса затухания или задерживания, в пределах которой частотные составляющие сигнала ослабляются. Между полосой прозрачности и полосой задерживания находится частота, называемая граничной. В связи с тем, что существует плавный переход между полосой прозрачности и полосой затухания, граничной обычно считается частота, на которой ослабление сигнала оказывается равным  $-3$  дБ – то есть по напряжению в  $\sqrt{2}$  раз меньше, чем в полосе прозрачности.

Полосно-заграждающий фильтр (режекторный фильтр, фильтр-пробка) – это и есть тот самый электронный фильтр, который не пропускает колебания определенной полосы частот. Заграждающий фильтр, предназначенный для подавления одной определённой частоты, называется узкополосным заграждающим фильтром (рисунок 1) или фильтром-пробкой (англ. notch filter).

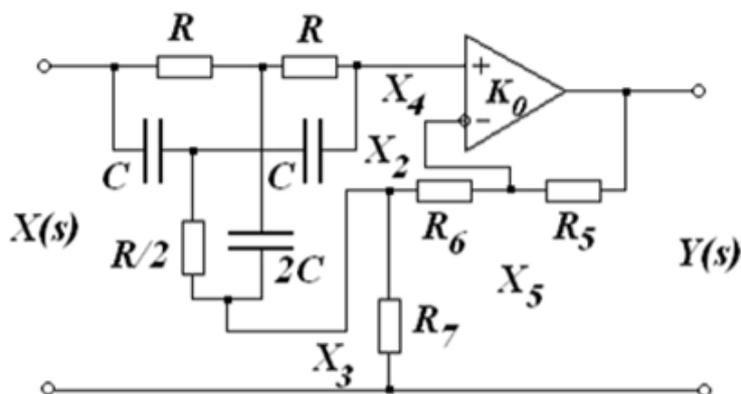


Рисунок 1. Режекторный активный RC-фильтр

АЧХ и ФЧХ. Применили оболочку MatLab Simulink [1]. Чтобы выполнить это необходимо запрограммировать оболочку на корректное отображение точек разрыва (рисунок 2 и 3).

Полоса режекции определяется величиной  $Q$  и оказывается тем более узкой, чем больше  $Q$ . Существенно, что при любых значениях  $K$  фильтр остается устойчивым, т. к. всегда  $Q$  больше нуля.

АЧХ и ФЧХ для сбалансированного и несбалансированного моста [2, 3]. Описывая схему, мы предполагали, что Т-образный мост не нагружен. Поэтому, чтобы моделирование согласовывалось с теоретическими результатами, выходное сопротивление Т-образного моста должно быть много меньше входного сопротивления усилителя и одновременно много больше сопротивления  $R7$ , через которое средняя точка подключена к земле. Если мост не сбалансирован (не точно выполняются соотношения между  $R$  и  $C$  вертикальных и горизонтальных плечах моста), то режекция не является полной. На рисунке 4 изображены характеристики для сбалансированного (пунктирная линия) и несбалансированного (сплошная линия) моста.

```

w=logspace(0, 4, 1000);      %диапазон частот

Kr=10;
w0=100;

Q=10;
b=[Kr 0 Kr*w0^2];
a=[1 w0/Q w0^2];
h1 = freqresp(tf(b,a),w);

Q=3;
a=[1 w0/Q w0^2];
h2 = freqresp(tf(b,a),w);

Q=1;
a=[1 w0/Q w0^2];
h3 = freqresp(tf(b,a),w);

H(1:3,:) = [h1(1,1,:); h2(1,1,:); h3(1,1,:)];
subplot(2,1,1),
semilogx(w, abs(H)), legend('Q=10','Q=3','Q=1')
subplot(2,1,2), semilogx(w, angle(H))

```

Рисунок 2. Пример кода программы

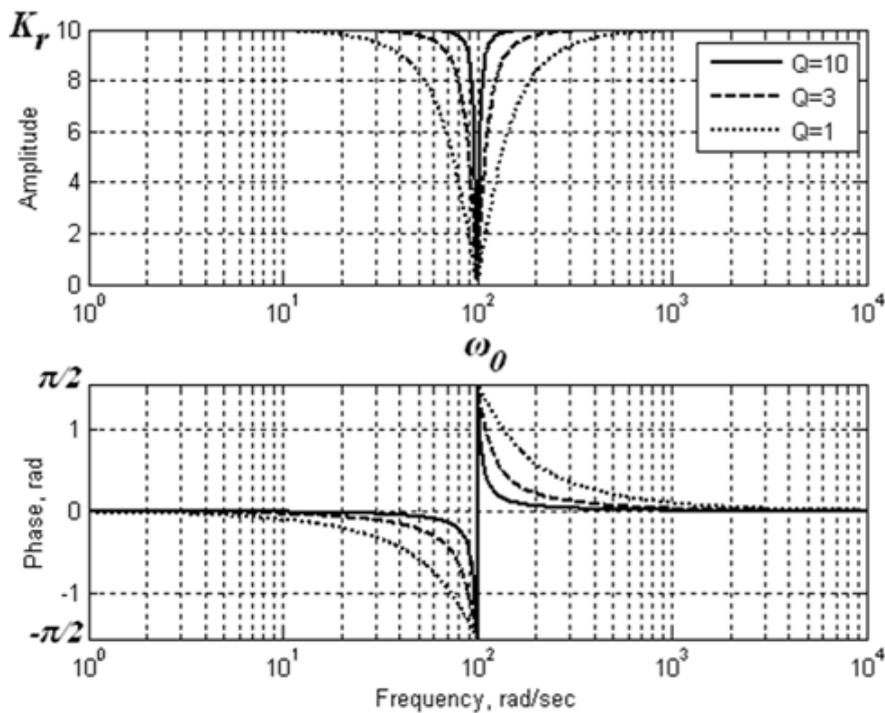


Рисунок 3. АЧХ и ФЧХ режекторного активного RC-фильтр

Таким образом, переходной процесс имеет характер затухающих колебаний. Причем с ростом коэффициента  $Q$  затухание уменьшается, а частота осцилляций приближается к частоте режекции (рисунок 5).

Устройство относится к технике сверхвысоких частот и предназначено для селекции СВЧ-сигнала. Техническим результатом является получение высокой крутизны склонов полосы заграждения на частоте  $\omega_0$  и сдвиг паразитной полосы заграждения дальше чем  $3 \cdot \omega_0$ . Предполагаемые фильтры разрабатываются для использования в настраиваемых фильтрах, малозумящих усилителях, усилителях мощности, комплексно интегрирующее оборудование, которое идеально для решения проблем коммуникации, вызванных различными видами интерференции высокочастотных сигналов. Фильтры могут работать в диапазоне от 1,5 МГц до 1 ГГц.

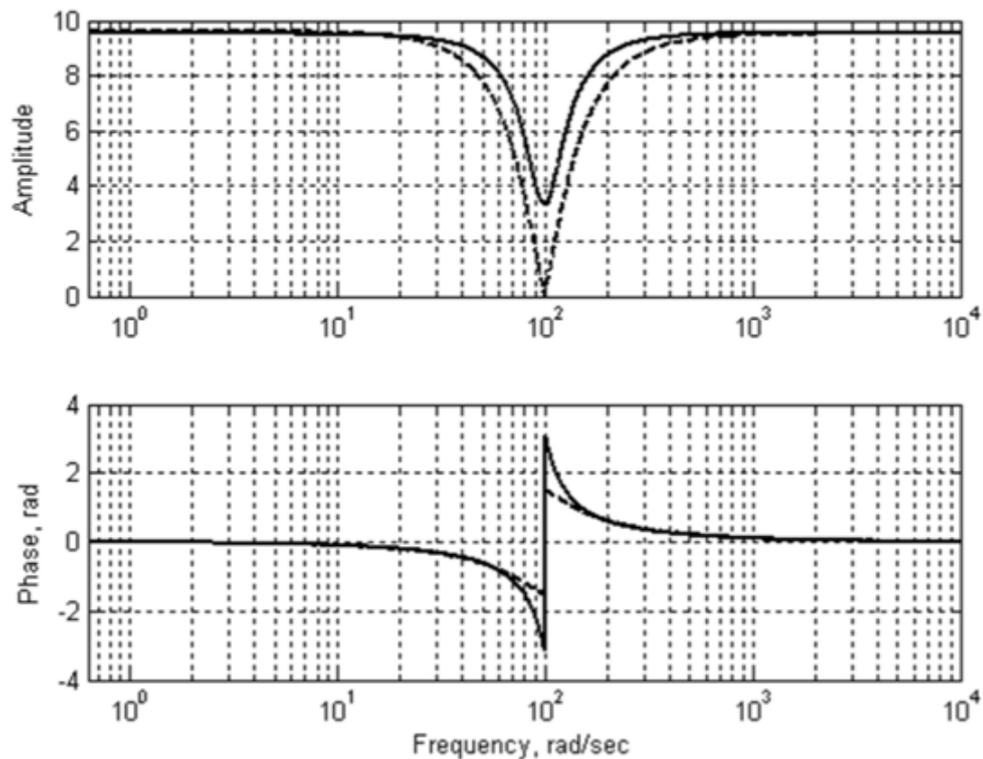


Рисунок 4. АЧХ и ФЧХ режекторного активного RC-фильтр

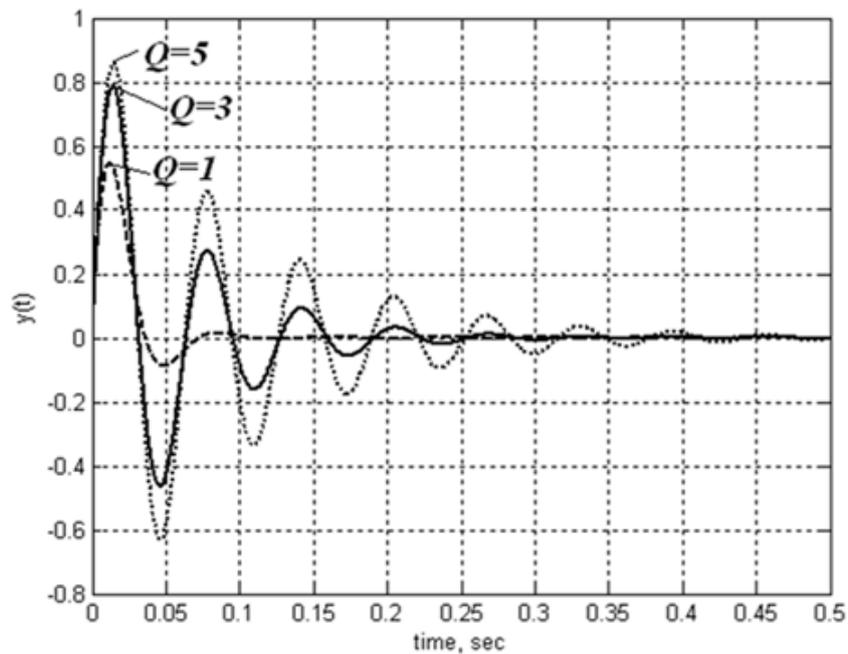


Рисунок 5. Реакция на включение синусоидального сигнала единичной амплитуды

### Литература

1. Моделирование работы электрических схем в Simulink // Павлейно, Ромаданов.
2. Полосно-заграждающий фильтр [Электронный ресурс] // Википедия. – Режим доступа : [https://ru.wikipedia.org/wiki/Полосно-заграждающий\\_фильтр](https://ru.wikipedia.org/wiki/Полосно-заграждающий_фильтр). – Дата доступа : 21.04.18.
3. Полосно-заграждающий фильтр [Электронный ресурс] // FindPatent. – Режим доступа : <http://www.findpatent.ru/patent/249/2498464.html>. – Дата доступа : 21.04.18.

УДК 621.3

## ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ SCADA

Плешко Д.Ю.

Научный руководитель – Сапожникова А.Г.

*SCADA* (*Supervisory Control And Data Acquisition*) – программный пакет, предназначенный для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления. *SCADA* может являться частью АСУ ТП, АСКУЭ, системы экологического мониторинга, научного эксперимента, автоматизации здания и т. д. *SCADA*-системы используются во всех отраслях хозяйства, где требуется обеспечивать операторский контроль за технологическими процессами в реальном времени. Данное программное обеспечение устанавливается на компьютеры и, для связи с объектом, использует драйверы ввода-вывода или *OPC/DDE* серверы. Программный код может быть, как написан на одном из языков программирования, так и сгенерирован в среде проектирования.

В основе большинства из ныне существующих *SCADA*-систем лежит платформа *Microsoft Windows*, так как подобного рода системы предлагают наиболее гибкие, полные и расширяемые решения в области *HMI*. Усиление позиций *Microsoft* на рынке ОС АСУ ТП влечёт соответствующую реакцию со стороны разработчиков *SCADA*-систем (например, *Siemens*) для множества различных платформ, которая заключается в приоритизации дальнейшего развития именно платформы *Windows NT*. Таким образом, основу глобального рынка программного обеспечения *SCADA*-систем на данный составляет ОС *MS Windows NT*, тогда как её предшественники, такие как *MS DOS*, стремительно вытесняются. Использованию *Windows* также способствует отлаженный механизм коммуникаций с драйверами оборудования различных производителей, определяющий универсальность ОС.

Первоначально АСУ ТП имели мало сходства с *IT*-системами. Различие заключалось в том, что АСУ ТП являлись изолированными системами, использовавшими свои собственные протоколы управления, специализированное оборудование и программное обеспечение. Сегодня относительно дешёвые и доступные устройства, использующие для связи протокол *IP*, вытесняют специализированное оборудование. Данный факт ведёт к увеличению вероятности возникновения уязвимостей и инцидентов в области информационной безопасности.

Уязвимости в АСУ ТП могут возникать в результате недостатков, неправильного или ненадлежащего технического обслуживания технических платформ, включая аппаратную часть, операционные системы и приложения, а также благодаря неполным, несоответствующим или попросту несуществующим руководящим документам и политикам в области ИБ. Данные уязвимости могут быть уменьшены благодаря различного рода средств контроля безопасности, таких как проведение обновлений ОС и приложений, контроль физического доступа, специализированное ПО в области информационной безопасности (например, антивирусное ПО).

Корпоративная политика безопасности может уменьшить число уязвимостей определяя обязательное использование парольной защиты или, например, регламентируя параметры обслуживания или требования в отношении подключения модемов к компонентам АСУ ТП. Факторы риска современных АСУ ТП (*SCADA*-систем) базируются на необходимости поддержки их конкурентоспособности на рынке ПО (расширяемость, адаптируемость и т. д.). Также на факторы риска *SCADA*-систем влияет опасность осуществления их аудита и реализации необходимых изменений.

Таким образом, среди факторов риска современных *SCADA*-можно выделить следующие: внедрение стандартизованных протоколов и технологий со списком известных уязвимостей, связанность сети системы управления с другими сетями (например, сетью ИТ-системы), широкая доступность и распространение технической информации и документации о системах управления, высокие риски проведения аудита, высокие риски

внесения исправлений. Актуальные сценарии проведения современных атак на SCADA-системы включают атаку при помощи эксплойта, атаку злоумышленным служащим, а также управление посредством внедрения вируса.

Сетевая архитектура современных предприятий объединяет компоненты корпоративной сети и компоненты АСУ ТП, что обуславливает уязвимость SCADA-систем перед атаками с использованием эксплойтов. В данной схеме для корпоративной, внутренней и управляющей сети используются свои собственные межсетевые экраны. Однако, зачастую, на практике межсетевые экраны заменяются простыми маршрутизаторами (сетевыми коммутаторами), таблицы маршрутизации которых могут дополнительно быть неправильно настроены с точки зрения ИБ. В некоторых небезопасных случаях все три сети (корпоративная, внутренняя и управляющая) могут быть объединены воедино без использования каких-либо сетевых инструментов.

Одной из проблем практически всех АСУ ТП и SCADA-систем является невысокая защищённость от злонамеренных действий конечных пользователей – управляющего и обслуживающего персонала (например, инженеров, операторов, администраторов и т. д.). Под понятием «инсайдер» подразумевается сотрудник компании, имеющий непосредственный доступ к конфиденциальным данным, системе безопасности, управляющему, сетевому или производственному оборудованию. Негативные действия инсайдера могут иметь как случайный характер, вызванный ошибкой или невнимательностью персонала, так и преднамеренный, обусловленный сознательным желанием вывести из строя АСУ ТП предприятия или создать чрезвычайное происшествие.

Современные вирусы используют уязвимости ОС, позволяющие производить повышение уровня привилегий до уровня администратора. Они используют специальные методы загрузки ПО, позволяющие не быть замеченными антивирусами, программами анализа поведения и программами для предотвращения вторжений.

Вирусное ПО может самостоятельно осуществлять вредоносную деятельность или создавать скрытый канал для последующей атаки системы злоумышленником. Первым шагом злоумышленника при атаке эксплойтом, как правило, является взлом и взятие под контроль некоторого элемента корпоративной сети, с которого впоследствии производится последующая атака элемента внутренней сети.

Примером может служить атака через сервер системы системного анализа и разработки программ (SAP) к серверу логирования, расположенному во внутренней сети. Взлом может быть осуществлён во время приёма/передачи данных системных журналов, дневной статистики, данных о текущих заказах, данных о текущем спросе и др. Имея в распоряжении сервер логирования (как правило, устройство класса *Windows Server*), злоумышленник может вывести его из строя, скрыть предыдущие атаки, получить доступ к чтению и редактированию конфиденциальных данных.

Следующим шагом атаки злоумышленника является попытка взлома одного из элементов управляющей сети (SCADA-системы), выполняемая с использованием ранее захваченного элемента внутренней сети. Атакующий продвигается от сервера логирования к станции HMI, расположенной внутри управляющей сети. Проникновение может быть осуществлено во время обмена данными системных журналов и системной статистики, а также посредством протокола OPC и сервисов домена (*domain services*). Захват станции HMI (как правило, устройство класса *Windows Workstation*) позволяет злоумышленнику управлять настройками, манипулировать данными о текущем технологическом процессе в целях обмана сотрудников. Необходимо отметить, что для создания мнимой картины функционирования технологического процесса необходим захват и синхронизированное управление всех станций HMI, что предполагает наличие межпрограммного взаимодействия.

Далее атака может идти в направлении сервера приложений, обслуживающего управляющие рабочие станции, посредством информационного обмена в рамках чтения/записи текущих параметров процесса и настроек, аварийных оповещений, диагностики управляющей шины. Управление сервером приложений (как правило,

устройством класса *Windows Server*) позволяет осуществлять фальсификацию данных о технологическом процессе для вышестоящих компонентов (например, сервера логирования), нарушать синхронизацию отдельных компонентов *SCADA*-системы или продолжить атаку в направлении управляющих рабочих станций или *PLC*. Захват управляющей рабочей станции (как правило, устройства класса *Windows Server* или *Windows Workstation*) позволяет злоумышленнику получить доступ к *PLC*.

Доступность *PLC* позволяет управлять его работой, просматривать, модифицировать и обновлять ПО для *PLC*.

Наиболее вероятный сценарий запланированной атаки инсайдером на АСУ ТП включает в себя несколько этапов. На первом этапе происходит создание дополнительного контура управления системой для перехвата управления и вызова аварийной ситуации. Как правило, подобные действия совершаются от имени подставного пользовательского (операторского) аккаунта в целях сокрытия следов действий инсайдера. После проведения атаки управляющий контур самоуничтожается, стирая максимально возможно количество информации в системных журналах. Выполнение данных действий может включать необходимость изменения ПО контроллеров (например, контроллера ПАЗ), что может быть осуществлено при помощи программного скрипта, выполняющего записанные ранее действия.

На втором этапе ключевые элементы АСУ ТП заражаются вредоносным ПО, позволяющим в нужный момент вывести оборудование из строя или нарушить работоспособность компьютера, имитирую атаку устройства злоумышленником. Дальнейшие действия инсайдера могут развиваться по следующей схеме. В запланированное сотрудником-инсайдером время начинается имитация атаки компьютеров АСУ ТП злоумышленниками.

Нормальная работа станций управления нарушается, сотрудники предприятия оказываются в замешательстве. Критически важное управляющее оборудование самостоятельно отключается, аварийные блокировки не срабатывают, производственное оборудование остаётся без управления. Выполнение технологического процесса нарушается, возникает существенный риск создания ЧП. Во время процедуры расследования подобного инцидента будет выявлено заражение станций вредоносным ПО, отмечены действия операторов по созданию аварийной ситуации, а также выявлен отказ системы противоаварийной защиты.

Таким образом, вина в произошедшем событии ложится на плечи неизвестного злоумышленника, заразившего систему вирусом и атаковавшего её. Злоумышленник-инсайдер остаётся вне подозрений.

Для примера атаки вирусом-червём рассмотрим классического представителя данной категории вирусов – *Stuxnet*. В качестве первого из аргументов в пользу его сложности необходимо отметить факт того, что вирус способен распространяться тремя совершенно разными путями, а именно:

- посредством инфицированных отчуждаемых носителей данных (например, *USB*-флеш-накопитель);
- посредством трафика внутри локальной сети;
- посредством инфицированных файлов проекта *Siemens*.

Вирус инфицирует компьютеры посредством *USB*-флеш-накопителей (даже в случае выключенного автозапуска) путём ранее неизвестной уязвимости (*MS10-046*), связанной с ярлыками (файлами с расширением *\*.lnk*). Версии *Stuxnet*, выпущенные до марта 2010, распространялись при помощи *USB*-флеш-накопителей путём уязвимости, связанной с автозапуском, нежели с расширением *\*.lnk*. Вирус распространяется по локальной сети на компьютеры с наличием сетевых ресурсов в общем доступе путем регистрации всех учетных записей пользователей компьютера и домена. Затем программа пытается использовать все доступные сетевые ресурсы для того, чтобы скопировать и выполнить себя на удалённом ресурсе, тем самым заражая удалённый компьютер.

Вирус распространяется по локальной сети, предоставляя сервис печати с помощью уязвимости нулевого дня в *Windows Print Spooler* (MS10-061). Вирус распространяется по локальной сети посредством уязвимости *MS08-067 Windows Server Service Vulnerability* (MS08-067). Вирус инфицирует компьютеры, использующие базу данных *Siemens WinCC*, с помощью внутренних неизменяемых системных паролей, подключаясь к *SQL*-серверу в целях передачи и исполнения копии вируса. Вирус распространяется, копируя себя в любые найденные файлы проектов *Siemens STEP 7* (файлы с расширением *\*.S7P*, *\*.MCP* и *\*.TMP*), а затем исполняясь автоматически при открытии проекта.

#### Литература

1. Матвейкин, В.Г. Применение SCADA-систем при автоматизации технологических процессов / В.Г. Матвейкин. – М. : Машиностроение, 2000. – 272 с.
2. Чичкарёв, Е.А. Системный анализ сложных систем управления / Е.А. Чичкарёв. – Пермь : ПГТУ, 2005. – 59 с.

УДК 621.311

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Харунжа Д.А.

Научный руководитель – доцент Бобко Н.Н.

Актуальным решением проблемы экономии энергоресурсов, повышения надежности электроснабжения и качества электроэнергии является сооружение в непосредственной близости от потребителей мини-ТЭЦ, вырабатывающей электрическую и тепловую энергию. Использование мини-ТЭЦ в системе электроснабжения сопровождается необходимостью проведения трудоемких расчетов, необходимых для оценки ее влияния на параметры режима системы. Мини-ТЭЦ, скорость вращения роторов первичных двигателей, которых не превышает 1500 об/мин, комплектуются явнополюсными синхронными генераторами. Загрузка генераторов станции, работающих на распределительную сеть, может изменяться от минимально допустимой до номинальной, при этом напряжение сети также может меняться под действием различных факторов. Изменение условий эксплуатации генераторов влияет на его параметры, что приводит к необходимости учета многих факторов при моделировании переходных и установившихся режимов работы синхронных явнополюсных генераторов.

Модель – некоторый объект, с помощью которого исследуются свойства оригинала и находящегося во взаимозначном соответствии с ним и более доступном для изучения.

Моделирование – исследование свойств объекта методом изучения свойств другого объекта, находящегося в определенном соответствии с первым объектом и более удобным для исследования.

Под моделью понимают некоторые технические устройства, процесс, схемы замещения, мысленные образы, математические формулы.

Модель должна удовлетворять трём условиям:

- достоверно отображать некоторые свойства оригинала, подлежащие изучению;
- должно быть определённое соответствие, т. е. правила, позволяющие осуществить переход от свойств модели к оригиналу и наоборот;
- должна быть наглядной, простой и доступной для изучения.

Виды моделей:

- структурная – показывает структуру объекта и взаимную связь между элементами этого объекта;
- модели прямой аналогии. В них процессы совпадают с процессами оригинала;
- физические модели. Они имеют одну и ту же физическую природу с оригиналом;
- математические модели, которые имеют одинаковое математическое описание с оригиналом. Эти модели бывают аналоговые и цифровые.

Предложена математическая модель явнополюсного синхронного генератора мини-ТЭЦ, основанная на полных уравнениях Парка-Горева, представленных во взаимной системе относительных единиц. Насыщение машины учитывается с помощью метода частичных характеристик намагничивания, позволяющего наиболее точно оценить изменение параметров схемы замещения генератора при отсутствии полных сведений о магнитных свойствах материалов, применяемых при проектировании и изготовлении машины. Реализация математической модели осуществляется в среде Simulink. Применение модели возможно при расчете установившихся и переходных режимов в распределительных сетях, содержащих явнополюсные синхронные генераторы.

Для моделирования синхронных генераторов используется система дифференциальных уравнений Парка-Горева, во взаимной системе относительных единиц.

Учет насыщения позволяет получить более точные значения параметров, характеризующих состояние синхронной машины. Основной проблемой при моделировании синхронного генератора с учетом насыщения является отсутствие информации о магнитных характеристиках применяемых материалов. В [5] проведен анализ кратностей сверхпереходных токов КЗ на выводах генераторов мощностью 0,2–13,5 МВт, в

предшествующем режиме работавших с номинальной загрузкой. Результаты проведенных расчетов показали высокую однородность параметров синхронных машин отечественного и импортного производства, что позволяет сделать вывод о возможности применения общих характеристик намагничивания при расчете переходных процессов и установившихся режимов.

#### Литература

1. Вагин, Г.Я. Концепция применения и основные технические решения типового ряда мини-ТЭЦ / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, Е.Б. Солнцев, А.Г. Воеводин, Е.Н. Соснина, А.М. Мамонов, А.А. Петров // Промышленная энергетика. – 2010. – № 7. – С. 2–6.
2. Шаров, Ю.В. Управление качеством электроэнергии / Ю.В. Шаров, И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов, А.Ю. Воробьев. – М. : ИД МЭИ, 2006. – 320 с.
3. Груздев, И.А. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. Методы исследования переходных процессов / И.А. Груздев, К.П. Кадомская, Л.А. Кучумов, Я.Н. Лугинский, М.Г. Портной, Н.И. Соколов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1970. – 400 с.
4. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: учебник для вузов. В 2 т. Том 2. / А.В. Иванов-Смоленский. – М. : Издательский дом МЭИ, 2006. – 532 с.
5. Самойленко, В.О. Особенности отключения токов коротких замыканий генераторов малой мощности / В.О. Самойленко, О.Л. Коркунова, А.В. Паздерин, Н.Н. Новиков // Релейщик. – 2014. – № 4 (20). – С. 26–31.

УДК 621.3

## ЦИФРОВЫЕ ДИСТАНЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Шмельков А.С.

Научный руководитель – к.т.н. Ломан М.С.

Целью данной работы является изучение цифровых дистанционных измерений и цифровой защиты.

Дистанционная защита – это универсальная защита от токов коротких замыканий. Она является основной в системе защиты линий электропередачи и распределительных сетей. Хотя классические дистанционные защиты на электромеханической или статической базе до сих пор широко распространены, наиболее современными считаются многофункциональные микропроцессорные устройства. Они связаны с централизованной системой управления, и ими можно управлять как с персонального компьютера, так и дистанционно. В новых устройствах применяются те же принципы работы, что и в устройствах предыдущего поколения. Цифровая обработка сигнала и интеллектуальные алгоритмы оценки позволили значительно повысить точность и селективность действия устройств. Большая степень функциональной интеграции, наряду со способностью самодиагностики, позволили значительно уменьшить габариты устройств, а также сократить расходы на техническое обслуживание.

Цифровые технологии позволили получить такие качественно новые характеристики, как уменьшение размеров, стоимости устройств и выявить ряд других преимуществ: повышенную надежность с уменьшенной стоимостью обслуживания за счет непрерывного самоконтроля, большую точность измерения; более широкие диапазоны уставок; компактные и экономичные технические решения; интеграцию цифровых реле в скоординированные системы защиты и управления подстанций через последовательные порты.

Особенности дистанционной защиты включают также функции, не связанные непосредственно с защитой, – регистрацию повреждений, контроль нагрузки и диагностику цепи выключателя, причем устройство определения места повреждения, прежде дорогостоящее автономное устройство, для цифровой защиты представляет собой побочный продукт программного обеспечения без дополнительной стоимости.

Дистанционная защита сравнительно простая и она может быстро устранять короткие замыкания, расположенные вдоль большей части защищаемой цепи. Она также может выступать как в качестве основной, так и в качестве резервной защиты одновременно. Так же она может с легкостью быть использована как защита блока (защита трансформатора, генератора, шин, фидера и т. д.). В таких случаях она применяется в сочетании с АПВ для защиты важных участках цепи.

Также дистанционная защита блокируется в случае возникновения качаний в энергосистеме. Качания возникают при нарушении синхронной работы генератора на том или ином участке энергосистемы. Данное явление сопровождается увеличением тока и снижением напряжения в электрической сети. Для устройств релейной защиты, в том числе ДЗ, качания в энергосистеме воспринимаются как короткое замыкание. Данные явления различаются по скорости изменения электрических величин.

При коротком замыкании изменение тока и напряжения происходит мгновенно, а при возникновении качаний – с небольшой задержкой. На основании этой особенности дистанционная защита имеет функцию блокировки, которая осуществляет блокировку защиты в случае возникновения качаний в энергосистеме.

При возрастании тока и падения напряжения на защищаемой линии блокировка разрешает работу ДЗ на время, достаточное для срабатывания одной из ступеней защиты. Если электрические величины (ток линии, напряжение, сопротивление линии) в течение этого времени не достигли границ заданных уставок защиты, блокировочный орган блокирует защиту. То есть блокировка ДЗ дает сработать защите в случае возникновения

реального повреждения, но блокирует защиту в случае возникновения качаний в энергосистеме.

Что касается конкретно дистанционной защиты, то использование микропроцессорных устройств для ее реализации значительно повышает точность ее работы. Также существенным преимуществом является наличие на микропроцессорных терминалах защит функции определения места повреждения (ОМП) – вывод на дисплей расстояния до места повреждения линии, которое фиксирует дистанционная защита. Расстояние указывается с точностью до десятых километра, что позволяет значительно упростить поиск повреждения на линии ремонтными бригадами.

В случае использования комплектов дистанционной защиты старого образца процесс поиска повреждения на линии значительно усложняется, так как на защитах электромеханического типа нет возможности фиксации точного расстояния до места повреждения.

Дистанционные защиты применяются в сетях сложной конфигурации, где по соображениям быстродействия и чувствительности не могут быть использованы более простые максимальные токовые и направленные токовые защиты.

Дистанционной защитой определяется сопротивление или расстояние (дистанция) до места КЗ, и в зависимости от этого она срабатывает с меньшей или большей выдержкой времени. Дистанционная защита выполняется многоступенчатой, причем при КЗ в первой зоне, охватывающей 80–85 % длины защищаемой линии, время срабатывания защиты не более 0,15 с.

Для второй зоны, выходящей за пределы защищаемой линии, выдержка времени на ступень выше и колеблется в пределах 0,4–0,6 с. При КЗ в третьей зоне выдержка времени еще более увеличивается и выбирается, как и для направленных токовых защит.

При КЗ на линии срабатывают реле пускового органа и реле органа направления. Через контакты этих реле подается сигнал на дистанционные органы и на реле времени. Если КЗ находится в первой зоне, дистанционный орган пошлет импульс на отключение выключателя без выдержки времени. При КЗ во второй зоне дистанционный орган первой зоны работать не будет, так как сопротивление на зажимах его реле будет больше сопротивления срабатывания. В этом случае сработает дистанционный орган второй зоны, который запустит реле времени, отключающий с заданной выдержкой времени защищаемую линию. При КЗ в третьей зоне дистанционные органы первой и второй зоны работать не будут, поскольку сопротивления на их зажимах больше сопротивления срабатывания. Сработает реле времени и с заданной выдержкой отключит линию.

### Литература

1. Циглер, Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение / Г. Циглер. – Перевод с англ. под ред. А.Ф. Дьякова. – М. : Энергоиздат. 2005. – 322 с.
2. Шнеерсон, Э.М. Цифровая релейная защита. / Э.М. Шнеерсон. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

УДК 621.3

## МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Хорошко Д.И., Волон Р.А.

Научный руководитель – Баран А.Г.

В электроустановках применяют электрооборудование с различными изоляционными материалами. Один из них, например, фарфор и пластмасса, не подвержены увлажнению, другие – жидкие диэлектрики (в частности, трансформаторное масло), волокнистые материалы (ткани, бумага, картон) и электроизоляционные смолы в значительной степени подвержены увлажнению, если не будут приняты соответствующие меры (герметизация маслонаполненных аппаратов, специальные покрытия изоляции других аппаратов и электрических машин).

Увлажнение изоляции приводит к снижению ее сопротивления, повышению диэлектрических потерь и в конечном счете к быстрому старению и выходу из строя. Поэтому при выполнении пусконаладочных работ уделяется большое внимание оценке степени увлажнения изоляции, особенно аппаратов с волокнистой изоляцией. Увлажненность изоляции определяют обычно для решения вопроса о необходимости сушки гигроскопической изоляции электрических машин и трансформаторов. Методы определения степени увлажненности изоляции основываются на физических процессах, происходящих в изоляции при приложении к ней напряжения.

При приложении напряжения через изоляцию в первый момент проходит ток заряда геометрической емкости, быстро прекращающийся в связи с процессом зарядки этой емкости. Абсорбционная емкость проявляется не сразу после приложения к изоляции напряжения, а спустя некоторое время после заряда геометрической емкости в результате последующего перераспределения зарядов в толще изоляции и накопления их на границах отдельных слоев, образующих из-за неоднородностей как бы цепочку последовательно включенных емкостей. Следствием заряда соответствующих отдельных емкостей (поляризации) является ток абсорбции в изоляции. Определение влажности по коэффициенту абсорбции основано на сравнении показаний мегомметра, снятых через разные промежутки времени после приложения напряжения.

Метод «емкость – частота» основан на том, что емкость неувлажненной изоляции при изменении частоты воздействующего напряжения почти не изменяется, в то время как в увлажненной изоляции процессы поляризации протекают достаточно быстро.

По зависимости емкости изоляции от температуры можно оценить степень ее увлажненности. Опытным путем установлено, что увеличение емкости на 30–40 % при повышении температуры от 20 до 70 °С является признаком недопустимо сильного увлажнения изоляции.

Метод «емкость-время» основан на раздельном измерении геометрической емкости ( $C_{Г}$ ) и абсорбционной емкости ( $C_{абс}$ ). Этим методом измеряется емкость  $C_{Г}$  (геометрическая) и  $C_{абс}$  и определяется отношение  $C_{абс}/C_{Г}$ .

В основу метода на искажении формы кривой тока положено представление о том, что ток, протекающий сквозь изоляцию, имеет две составляющие: активную и емкостную. При низких напряжениях, когда число свободных зарядов в изоляции мало, проходящий через нее ток представляет собой ток сквозь емкость, т. е. через изоляцию протекает практически  $I_C$ . При более высоких напряжениях начинается разрушение нейтральных частиц диэлектрика, повышается число свободных зарядов, в связи с чем растет активная составляющая тока. При пробое сквозь изоляцию протекает только активный ток ( $I_a$ ).

Для многослойной композиции изоляции, куда относится и микалентная изоляция электрических машин, важным фактором старения является межвитковая поляризация. Отсюда можно сделать вывод, что по фиксированию интенсивности изменения кривой тока

абсорбции и медленных поляризаций в объеме изоляции можно судить об изменениях, происходящих в ее структуре в связи со «старением». В рассмотрение вводится параметр  $dI_{\text{абс}}/dt$

Одной из важнейших контрольных операций, обеспечивающих надежную работу изоляции в эксплуатации, является испытание электрической изоляции повышенным напряжением. Данный вид испытаний является самым надежным из всех проводимых в настоящее время испытаний, которым подвергается изоляция в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта. Испытания переменным напряжением подразделяются на испытания: при плавном подъеме напряжения промышленной частоты по ступенчатой методике и напряжением более высокой частоты. Испытание напряжением промышленной частоты является наиболее разработанным методом, имеющим большой опыт применения.

Для определения работоспособности электрооборудования необходимы эффективные методы оценки состояния изоляции. Надежность работы во многом определяет состояние его изоляции, опасным дефектом является ее увлажнение. Содержание влаги 3–4 % принимают за крайние пределы. Чувствительными к увлажнению изоляции и удобными на практике являются измерения тангенса угла диэлектрических потерь и емкости на очень низких частотах (разработанный в самое последнее время метод FDS).

На методы оценки, основанные на анализе поляризационных процессов в изоляции, особенно медленно протекающих, влияет даже незначительное увлажнение изоляции. В настоящее время в разных странах проводятся разработки методов контроля состояния изоляции на основе анализа поляризационных процессов – измерения восстанавливающегося напряжения (RVM), токов заряда и разряда (РОС), параметров изоляции на переменном токе емкости или тангенса угла диэлектрических потерь (FDS).

Чувствительными к увлажнению изоляции и удобными на практике являются измерения тангенса угла диэлектрических потерь и емкости на очень низких частотах (разработанный в самое последнее время метод FDS). Использование зависимости емкости от частоты при увлажнении изоляции широко применялось выработаны и критерии оценки состояния изоляции.

Использование анализа поляризационных явлений для контроля влажности изоляции представляется перспективным методом оценки состояния в работе. За рубежом широко развернуты разработки такой методики, выпускается и соответствующая измерительная аппаратура.

#### Литература

1. Львов, М.Ю. Нормирование показателей для оценки износа изоляции обмоток силовых трансформаторов / Ю.Н. Львов, М.И. Чичинский. – М. : Электрические станции, 2002.

УДК 621.3

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ В ТРЕХФАЗНЫХ КОМПЛЕКТНЫХ ПОФАЗНО-ЭКРАНИРОВАННЫХ ТОКОПРОВОДАХ

Матяс Т.В.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Булат В.А.

Комплектным токопроводом принято называть токопровод с жесткими неизолированными проводниками и металлическим кожухом, изготовленный специализированным заводом по техническим условиям, согласованным с заказчиком, и поставляемый к месту установки частями, размеры и масса которых удобны для транспорта.

Токопроводы генераторного типа представляют собой особый тип проводников, которые способны передавать переменный ток с высокими номинальными значениями и могут также выдерживать значительные токи короткого замыкания, обычно имеющие место при КЗ на выводах генераторов. Эти проводники предназначены для достижения максимальной эксплуатационной безопасности и надежности.

Каждый фазный проводник расположен в центре отдельного заземленного экрана (оболочки), выполненного из проводящего и немагнитного материала (алюминия). Он удерживается в концентрическом положении посредством опорных изоляторов. Между экранами крайних фаз и центральной фазы выполнены воздушные зазоры, таким образом, чтобы фазные проводники и экраны были отделены друг от друга. В случае пробоя изоляции одной фазы ионизированный дугой тока однофазного замыкания на землю воздух не может ухудшить изолирующую способность других фаз и, таким образом, замкнуть их накоротко. Короткозамкнутые экраны оказывают значительное экранирующее действие на магнитные поля разных фаз, уменьшая, таким образом, электродинамические силы, действующие на проводники, и, следовательно, на изоляторы во время коротких замыканий. Генераторные токопроводы с электрически короткозамкнутыми экранами представляют собой стандартное техническое решение для выдачи мощности крупных генераторов, так как они имеют целый ряд преимуществ, таких как:

- междуфазное короткое замыкание становится невозможным;
- достигается способность выдерживать значительные токи внешних коротких замыканий при использовании относительно малого количества изоляторов;
- короткозамкнутые экраны, компенсируют внешние магнитные поля так, что их остаточные значения становятся незначительными;
- устраняются джоулевые потери и гистерезисные потери в близко расположенных стальных конструкциях, и проблемы электромагнитной совместимости;
- изоляторы, служащие опорами для проводников, защищены от пыли и влаги.

Экранирование проводников внутри кожухов полностью гарантирует безопасность обслуживающего персонала.

Техобслуживание минимизируется. Самые длинные из возможных секций, так называемые «транспортные блоки», свариваются на месте. Генераторные токопроводы соединяются между собой с помощью проводящих связей на обоих концах. В результате этого соединенные кожухи образуют экранирующий контур с индуцированным током, идущим вдоль них по всему поперечному сечению. Этот ток почти равен току, идущему по фазовым проводникам, но его направление противоположное. Поэтому магнитное поле снаружи кожухов компенсируется так, чтобы оно снизилось до низкого остаточного значения за счет взаимного устранения концентрических полей, относящихся к токам в проводнике и кожухе соответственно.

Пофазно-экранированные токопроводы обладают большей надежностью, чем токопроводы с общим экраном, тем более открытые. Поэтому токопроводы генераторов АЭС, КЭС, а также мощных ГЭС и ТЭЦ выполняют только пофазно-экранированными.

При больших мощностях энергоблоков важнейшей проблемой является обеспечение их надежной, безаварийной работы. Первостепенную задачу представляет передача номинальных токов в десятки килоампер, сопровождающаяся сильными магнитными полями, вызывающими существенный нагрев окружающих металлобетонных и железобетонных конструкций. С ростом единичных мощностей блоков и энергосистем серьезной проблемой становится резкое увеличение ударных токов коротких замыканий и, следовательно, электродинамических усилий в конструкциях передающих устройств.

Элементы связи между генератором и блочным трансформатором или РУ (распределительным устройством) представляют головной участок главной схемы электрических соединений (схемы коммутации) электрической станции, поэтому являются наиболее ответственной конструкцией, от которой зависит надежность работы станции, а также всей энергосистемы в целом.

Эти участки главной схемы выполняются по-разному в зависимости от мощности генераторов (кабельные соединения, подвесные гибкие токопроводы, открытые жесткие токопроводы, а также закрытые или комплектные пофазно-экранированные токопроводы, которые получили наибольшее распространение на крупных электростанциях). Мощные блоки 200, 300, 500, 800 и более МВт имеют большое значение для всей энергосистемы в целом. В связи с этим стремятся обеспечить максимальную надежность работы таких агрегатов, достигаемую при всех прочих условиях также надежной работой токопроводов связи, прокладываемых от генераторов до повышающих трансформаторов или РУ. Применение для этой цели открытых токопроводов не может удовлетворить высокие требования надежности работы, которые предъявляются к токопроводам. Полностью удовлетворить эти требования могут только комплектные пофазно-экранированные токопроводы, в которых шины каждой фазы заключаются в отдельный алюминиевый кожух (экран).

Задачи проектирования экранированных токопроводов требуют оценки электродинамических усилий, возникающих в элементах их конструкции.

Следует подчеркнуть необходимость разработки методов расчета сил в виде простых алгоритмов и программ, учитывающих распределение электромагнитного поля в конструкциях токопровода.

Наибольшее распространение при расчетах ЭДУ в пофазно-экранированных токопроводах получил метод, основанный на законе Био-Савара-Лапласа. Метод расчета усилий по изменению электромагнитной энергии не нашел широкого применения из-за сложности определения взаимоиндуктивностей шин и экранов при различных схемах соединения.

### Литература

1. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
2. Васильев А.А. Электрическая часть станций и подстанций / А.А. Васильев, И.П. Крючков. – М. : Энергия, 1980. – 608 с.
3. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания: ГОСТ 30323-95. – Введ. 01.03.1999. – Минск, 1999. – 57 с.
4. Современные токопроводы : учеб. пособие для СПТУ. – М. : Высшая школа, 1988. – 80 с.

УДК 621.316

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ НА БЛОКАХ «РЕГИСТР ЗАДЕРЖКИ»**

Мильный А.Г.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Румянцев В.Ю.

Цифровой фильтр (ЦФ) – в электронике любой фильтр, обрабатывающий цифровой сигнал с целью выделения и/или подавления определённых частот этого сигнала.

Реакцией цифрового фильтра на входное воздействие является передаточная функция (ПФ) и может быть в общем виде описана разностным уравнением как  $y(nT) = f(x(nT))$ .

Первым этапом идёт анализом фильтра, т. е. составление его математической модели и выработка требуемой передаточной функции.

Проектирование цифрового фильтра включает в себя четыре основных этапа:

- аппроксимацию;
- реализацию;
- изучение ошибок арифметического устройства;
- выполнение.

На этапе аппроксимации определяется передаточная функция, удовлетворяющая ряду конкретных требований, предъявляемых к амплитудной, фазовой и переходной характеристикам фильтра.

Реализация является процессом преобразования передаточной функции в схему фильтра. При аппроксимации и реализации предполагается, что используемые арифметические устройства обладают неограниченной точностью. Однако из-за ограниченной точности реальных устройств возникает необходимость изучения влияния ошибок таких устройств на характеристики фильтра.

Цифровой фильтр может быть реализован на аппаратном и программном уровнях. При аппаратной реализации используются исключительно три вида основных блоков: сумматор, умножитель и регистр задержки. Построение цифрового фильтра может быть осуществлено в результате выполнения следующих процедур:

- выбора соответствующей структуры фильтра;
- выбора типа арифметического устройства фильтра с фиксированной или плавающей запятой;
- использования конкретной системы представления чисел, например, в прямом или дополнительном коде;
- выбора последовательного или параллельного способа обработки;
- выбора элементной базы.

В работе рассмотрены основные способы построения ЦФ:

- по методу Джексона – Кайзера – Макдональда;
- по методу Пелэу – Лиу;
- по методу Монкевича – Стинаарта.

При программной реализации используются ЭВМ и различные математические средства или программные комплексы. Для построения цифрового фильтра с целью использования его в цепях релейной защиты может быть использована программа VisSim. Она имеет библиотечный блок «передаточная функция», который позволяет на основе расчетов во временном домене реализовать цифровые фильтры. Данный блок очень удобен и для его использования всего лишь необходимо выполнить переход от разностного уравнения к дискретной передаточной функции. Однако при его использовании может возникнуть проблема. Известно, что ЭВМ могут быть разной разрядности и могут не иметь операций с плавающей точкой, поэтому возможно затруднение – не каждую дискретную передаточную функцию, можно физически реализовать по тем внутренним блок-схемам, которые заложены в блок «передаточная функция». Это связано с тем, что переход от изображения Лапласа к Z-изображению описывается свертыванием правой полуплоскости «устойчивых» корней в несравнимо малую окружность единичного радиуса, т. е. точность позиционирования корней

должна быть эквивалентно выше, а возможность осуществить это сокращена благодаря ограниченности разрядности ЭВМ. Однако одна и та же дискретная передаточная функция может быть реализована с помощью нескольких альтернативных блок-схем. Они характеризуются разной плотностью сетки возможных положений корней в областях единичной окружности при заданной дискретности значений коэффициентов передаточной функции. Следует помнить, что, используя определенные блок-схемы можно избавиться от необходимости выполнения операций с комплексными числами. Для этого необходимо использовать встроенный блок «регистр задержки».

Также для построения цифровых фильтров любой сложности может использоваться программный комплекс MatLab Simulink. Данный комплекс способен с лёгкостью произвести все необходимые этапы реализации фильтра, включая построение конечной схемы, подходящей для использования в конечном оборудовании, будь то микропроцессор или программируемая интегральная логическая схема (ПЛИС).

В работе рассмотрено построение полосового КИХ-фильтра второй гармоники, который может применяться в устройствах релейной защиты.

### Литература

1. Антонью, А. Цифровые фильтры: анализ и проектирование / А. Антонью / Под ред. С.А. Поньрко. – М. : Радио и связь, 1983. – 320 с.
2. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю.В. Румянцев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. Заведений и энерг. объединений СНГ. – 2016. – Т. 59. – № 5. – С. 397–417.
3. Оппенгейм, Э. Цифровая обработка сигналов / Э. Оппенгейм, Р. Шафер / Под ред. С.Я. Шаца. – М. : Связь, 1979. – 416 с.

УДК 621.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ ЕЕ ВКЛЮЧЕНИИ И ОБРЫВЕ НЕЙТРАЛЬНОГО ПРОВОДА В КОММУТАЦИОННЫЙ ПЕРИОД

Русецкий К.И.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.

Переходные процессы зачастую становятся причинами катастроф при неправильном использовании параметров источника и элементов, существующих в цепи.

Рассмотрим переходный процесс в трехфазной электрической цепи при ее включении, а также при обрыве нейтрального провода. Для исследования процесса нам потребуется воспользоваться программным обеспечением MatLab с пакетом компонентов Simulink. Смоделируем схему так, чтобы к каждой из фаз были подключены различные элементы. Исследуем влияние каждого из элементов, меняя их параметры, на дальнейшую работоспособность электрической цепи. Обрыв нейтрального провода будем проводить в период коммутационного режима при включении цепи (0,05 с), а также и в после коммутационный период (0,5 с). На рисунке 1 представлена модель трехфазной электрической цепи, в которой мы исследуем переходный процесс. Частота источника 50 Гц. Сам обрыв нейтрального провода приводит к появлению переходного процесса.

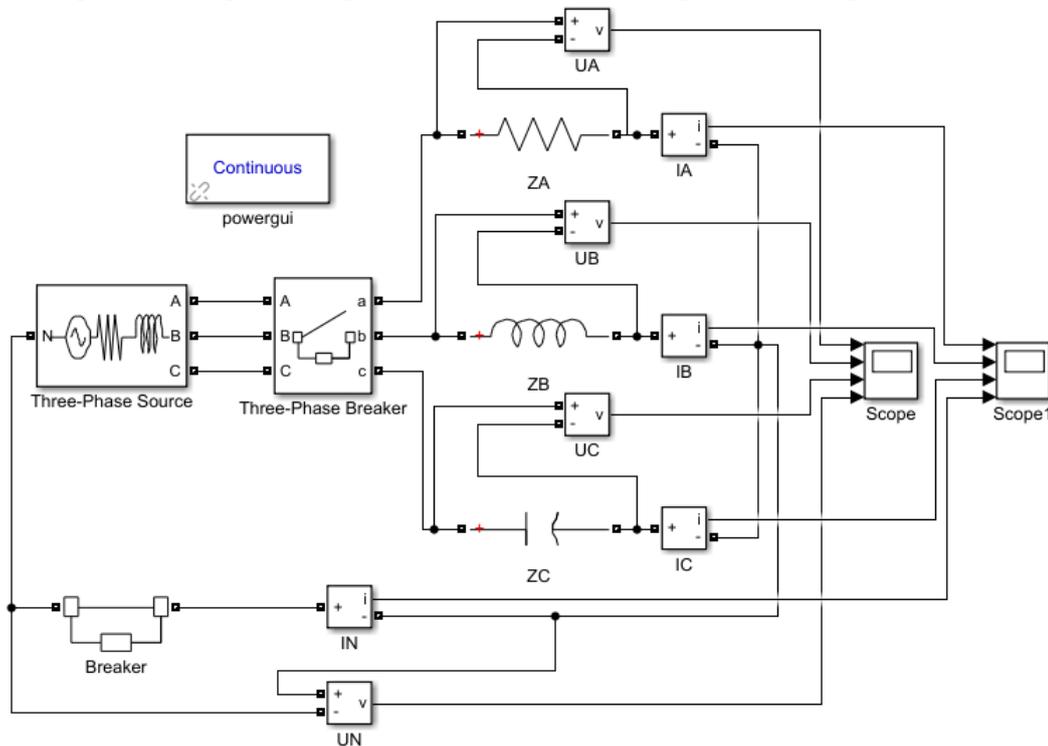
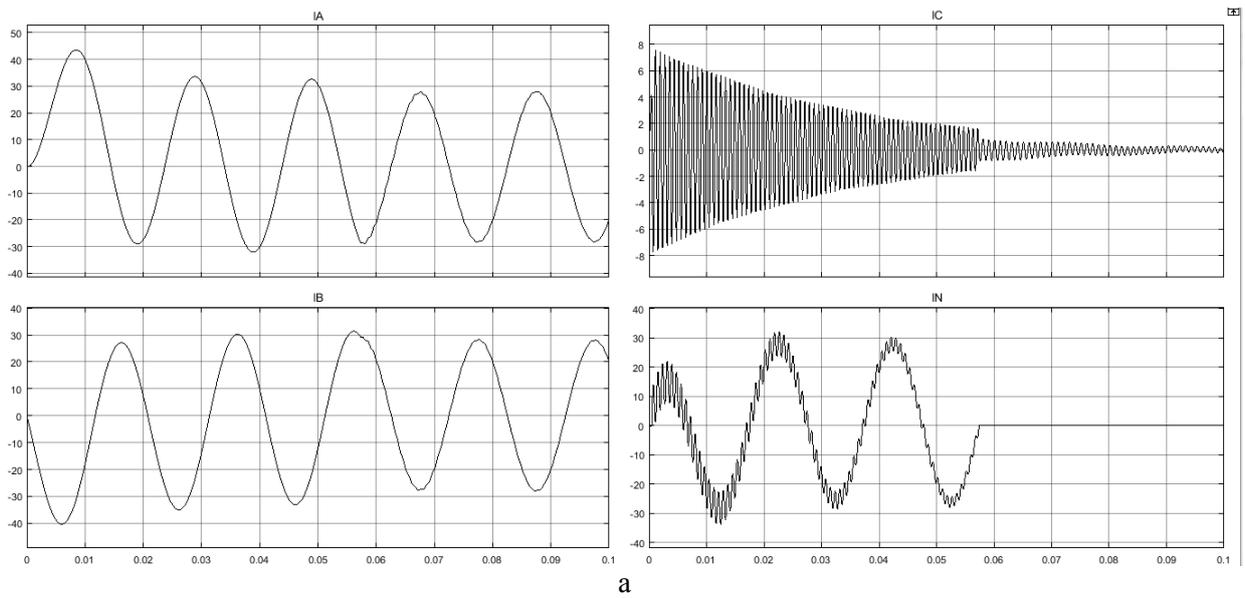


Рисунок 1. Модель исследуемой трехфазной электрической цепи

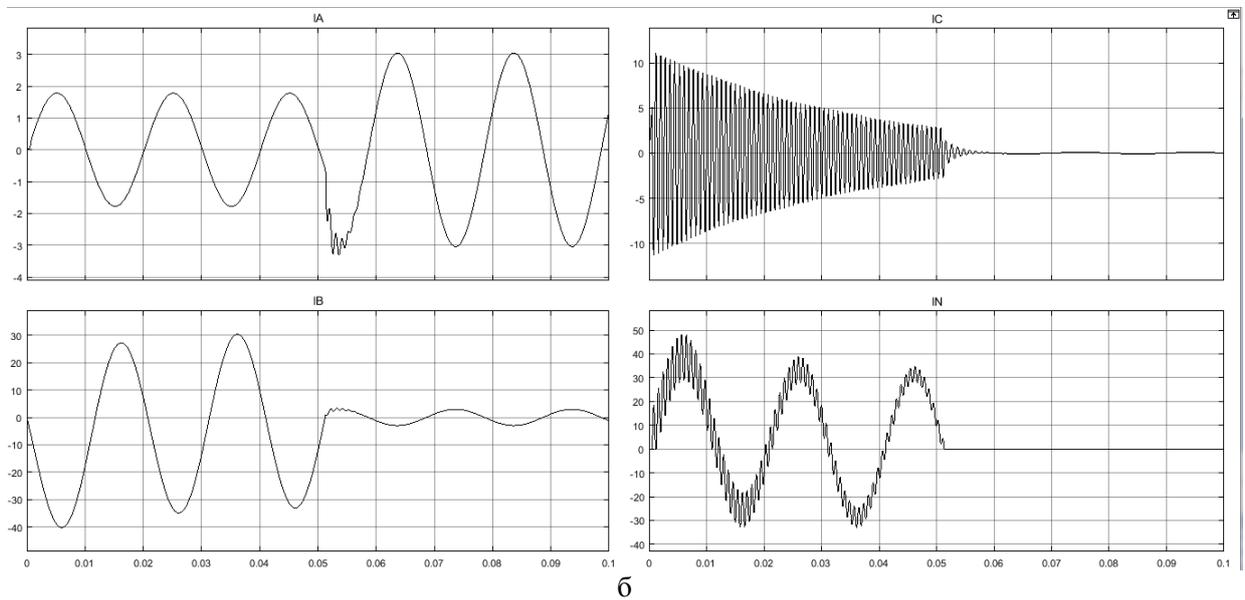
Исследуем обрыв нейтрального провода в период коммутации (таблица 1).

Таблица 1. Начальные условия исследуемой модели

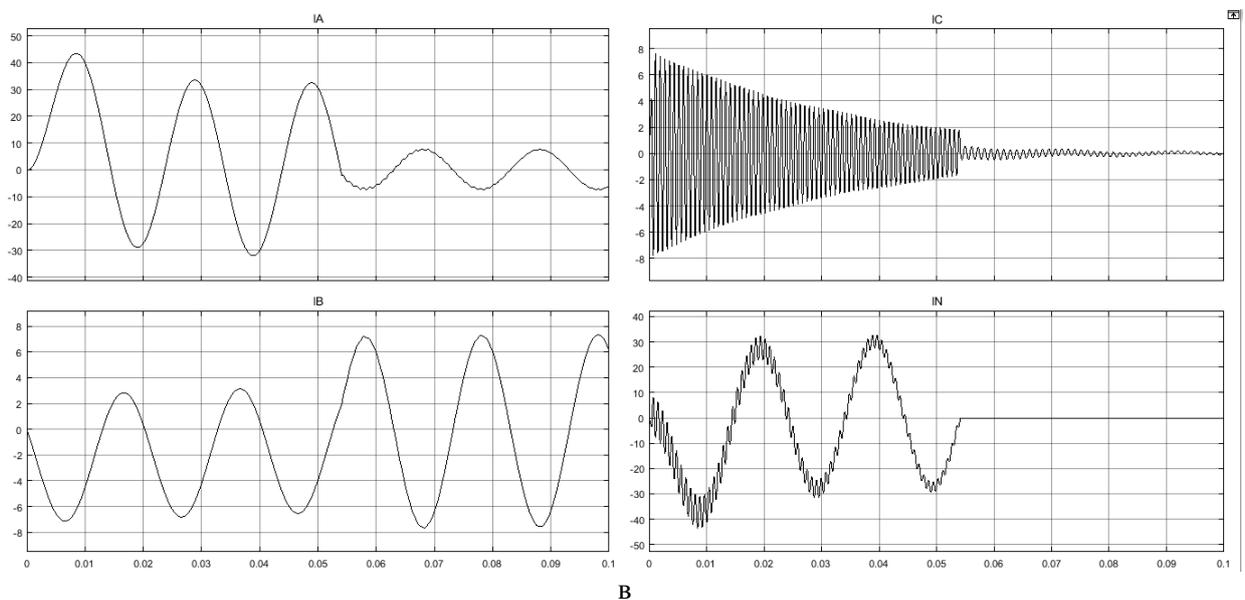
$U_{\phi}$ , В	220	220	220	220	220	220	220
$R$ , Ом	1	100	1	1	100	100	1
$L$ , мГн	1	1	100	1	100	1	100
$C$ , мкФ	1	1	1	100	1	100	100
Рисунок	2а и 3а	2б и 3б	2в и 3в	4а и 5а	4б и 5б	4в и 5в	6 и 7



а

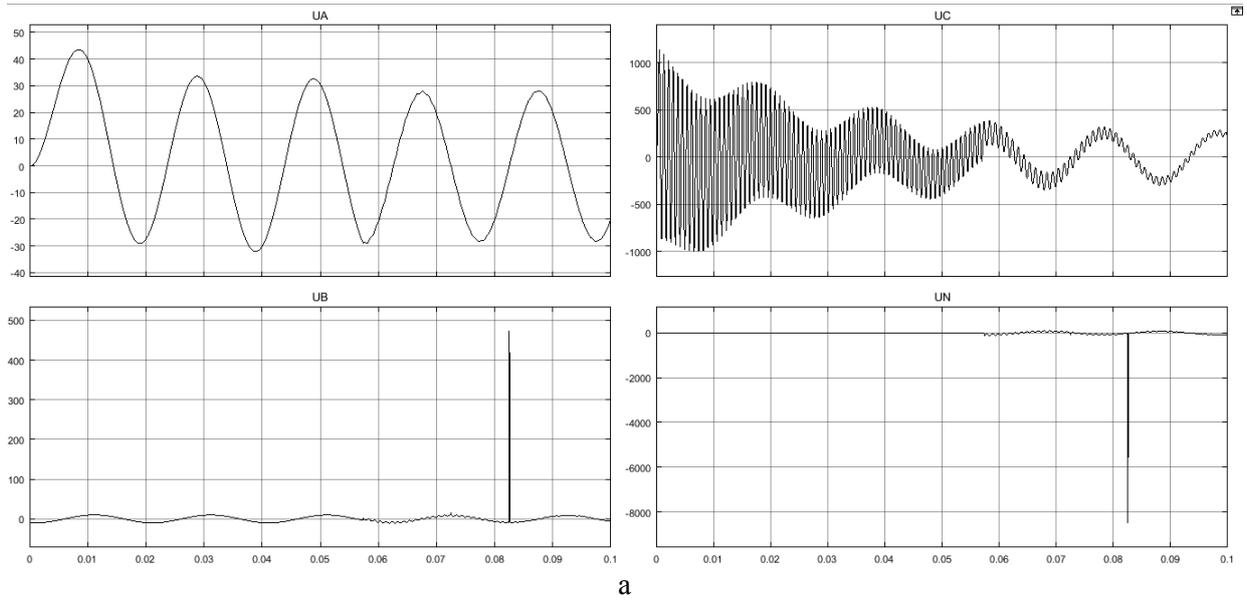


б

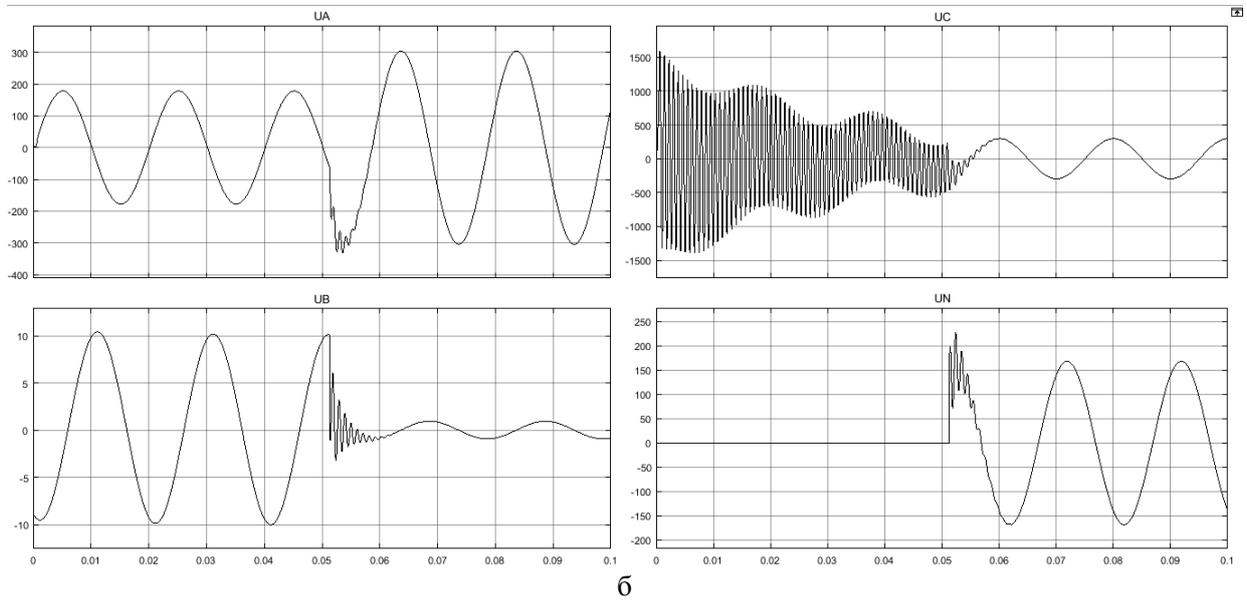


в

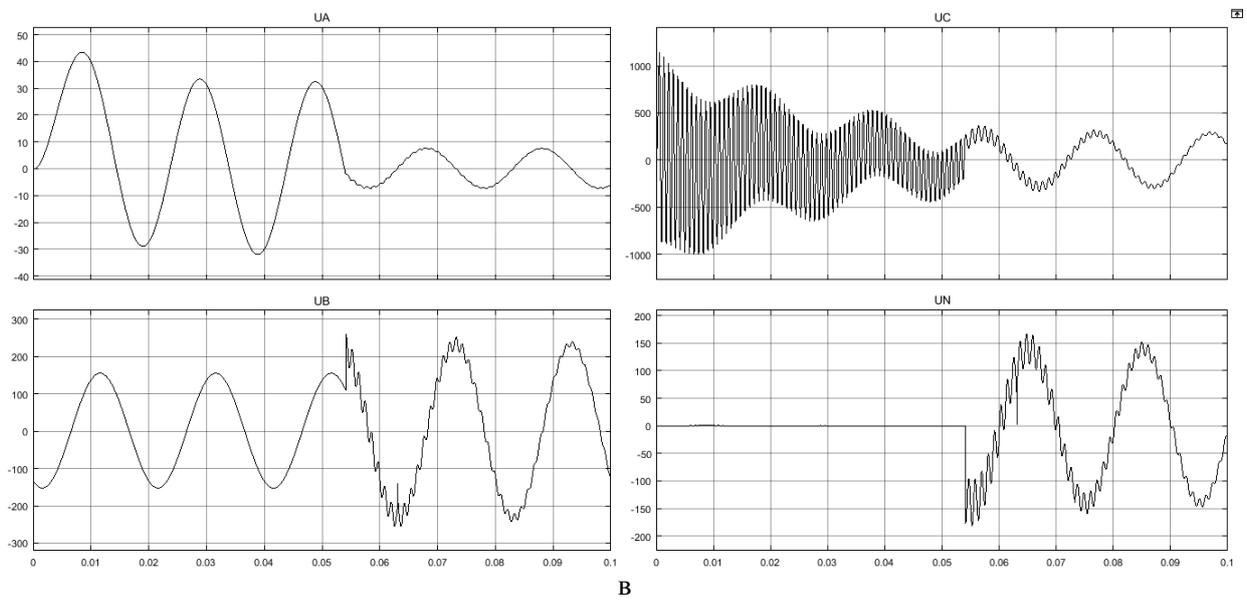
Рисунок 2. Осциллограммы токов при протекании переходного процесса



а

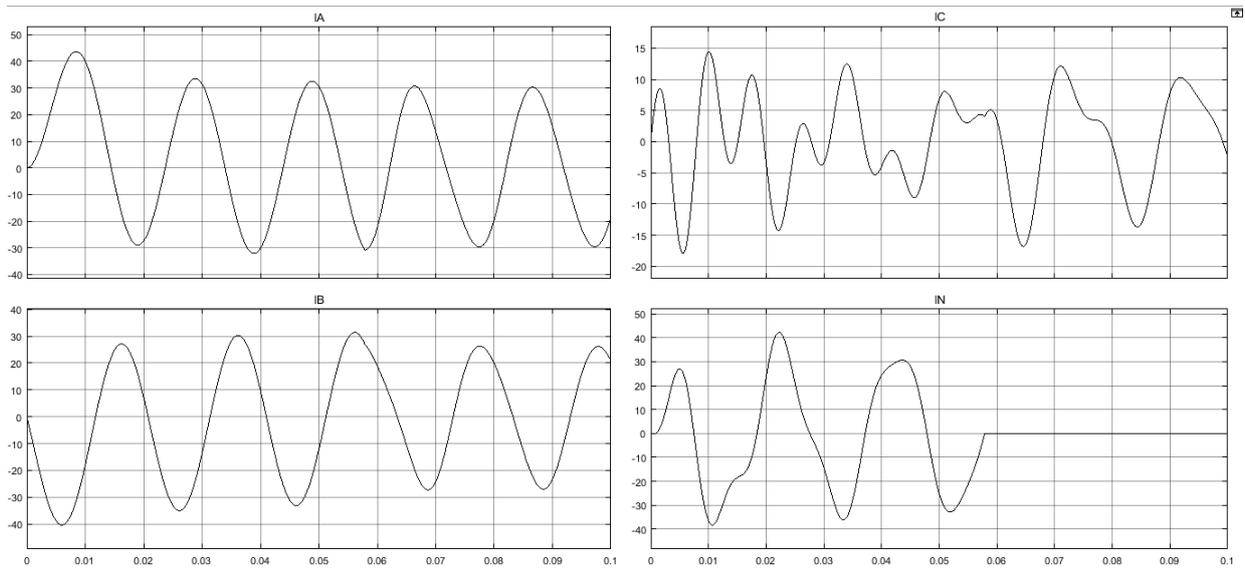


б

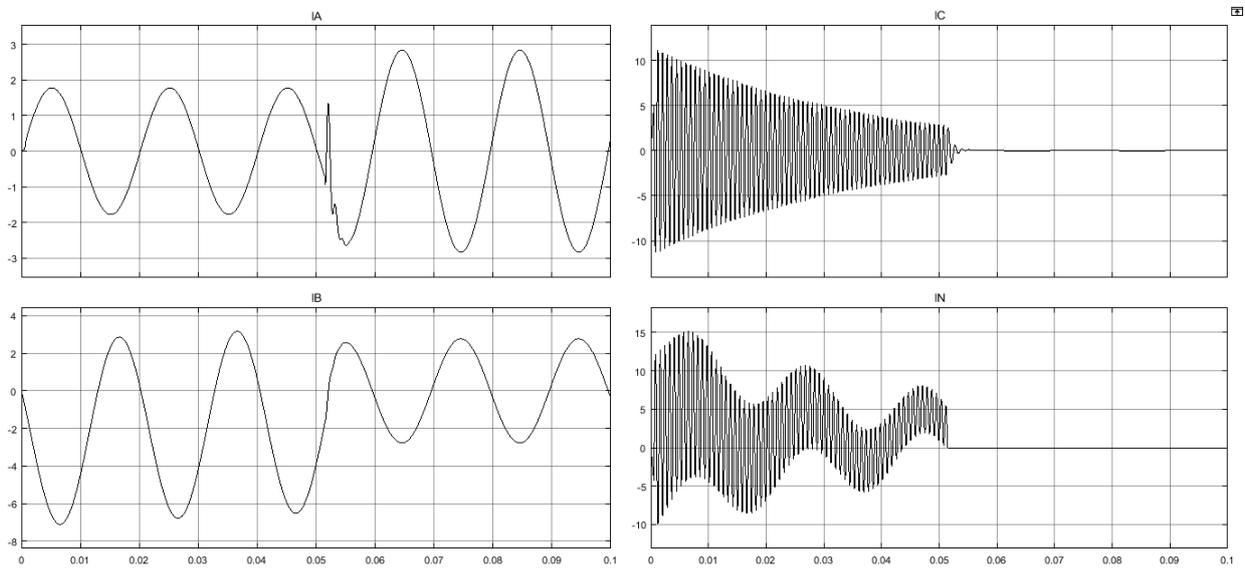


в

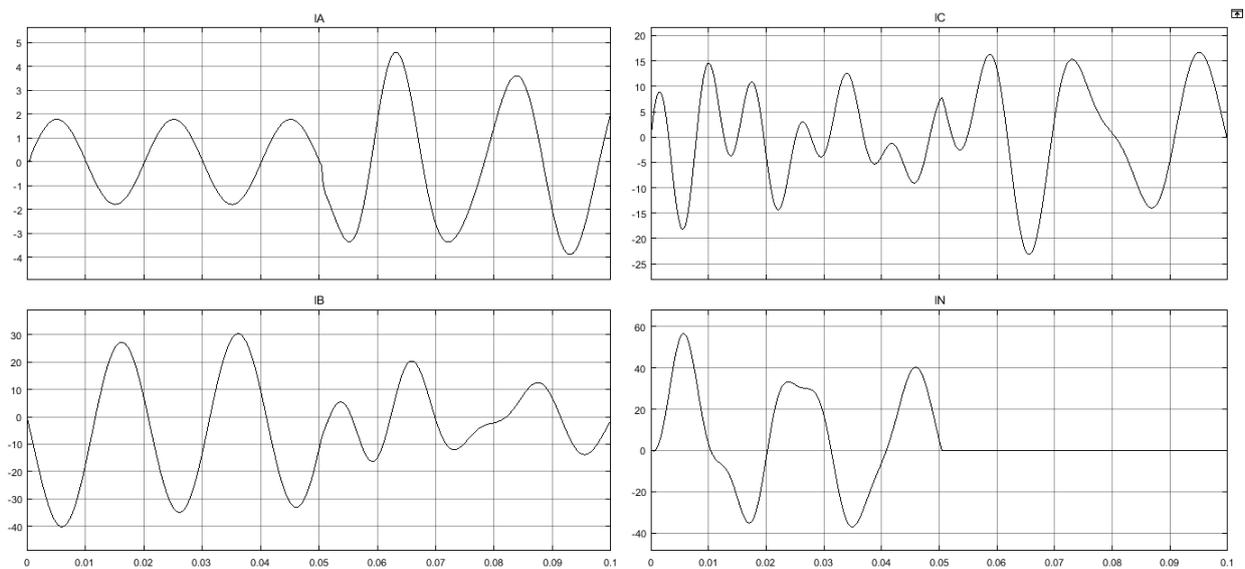
Рисунок 3. Осциллограммы напряжений при протекании переходного процесса



а



б



в

Рисунок 4. Осциллограммы токов при протекании переходного процесса

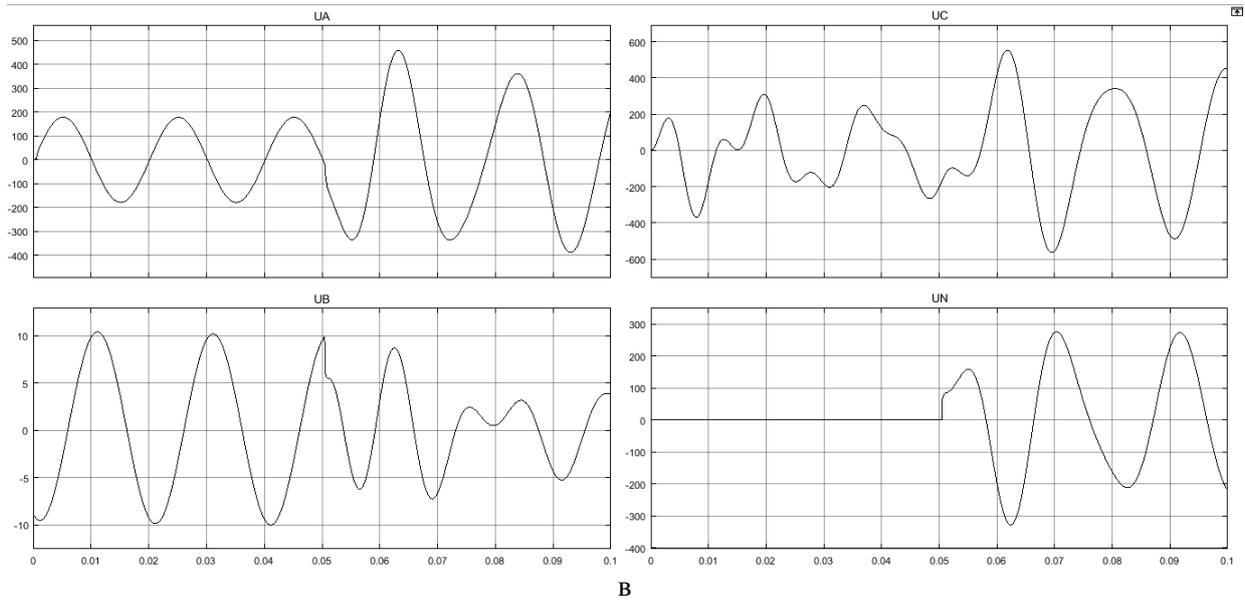
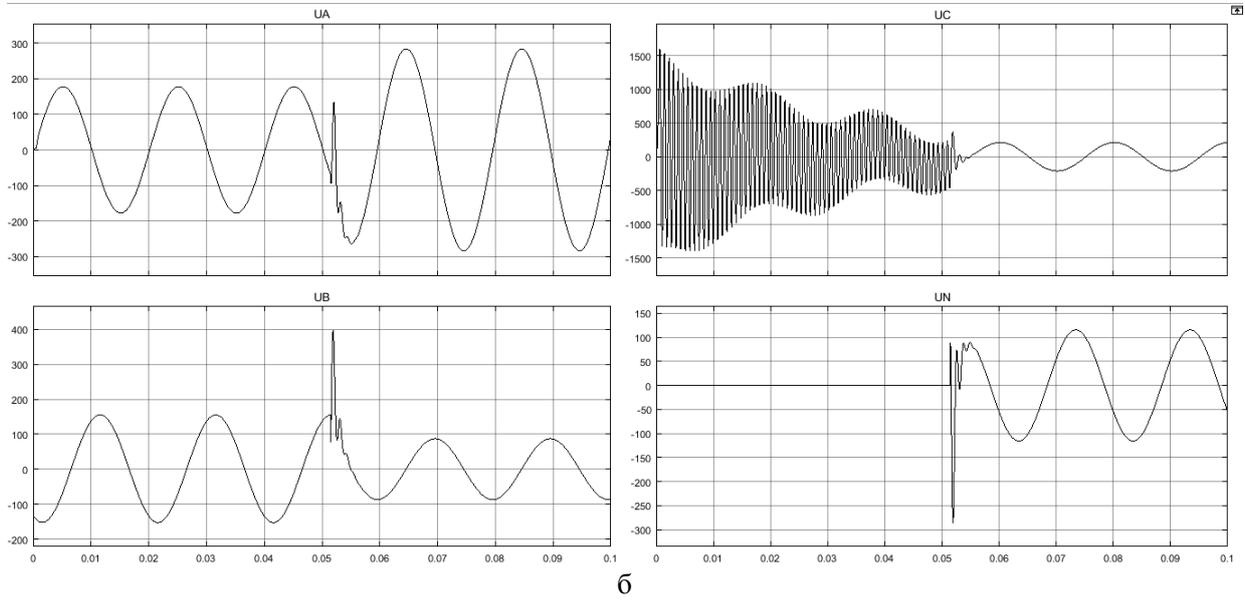
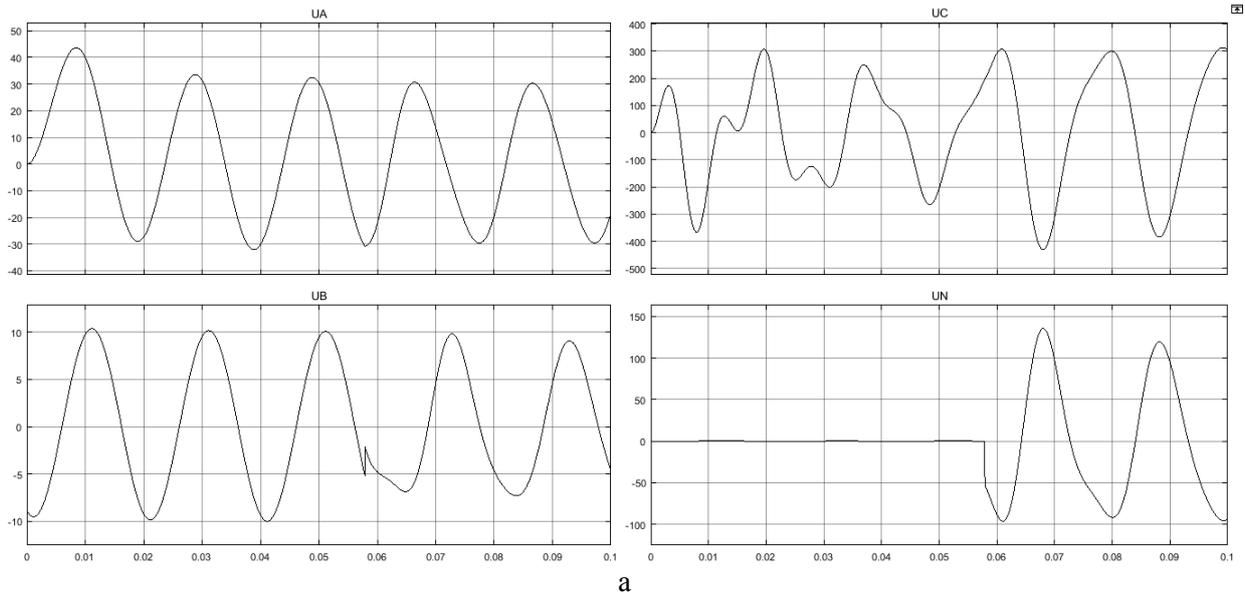


Рисунок 5. Осциллограммы напряжений при протекании переходного процесса

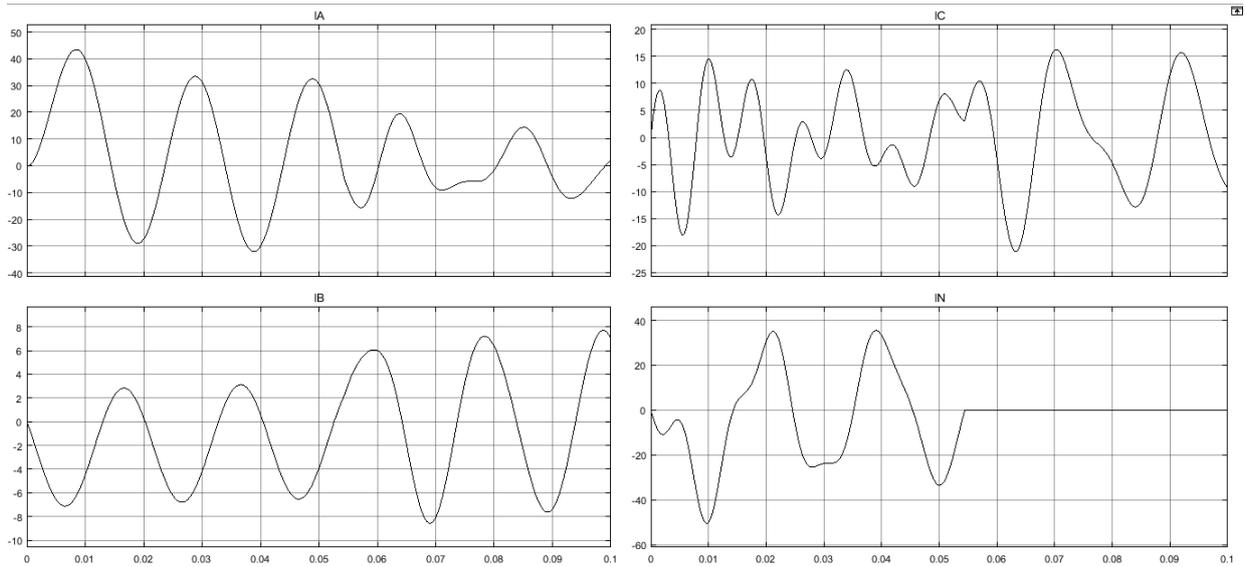


Рисунок 6. Осциллограммы токов при протекании переходного процесса

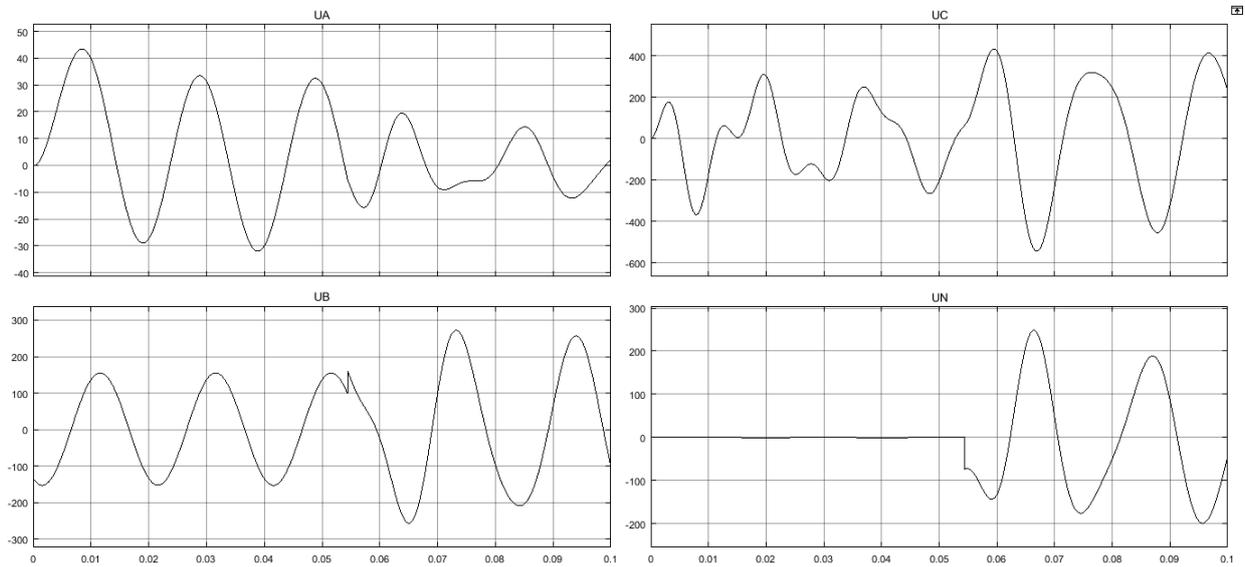


Рисунок 7. Осциллограммы напряжений при протекании переходного процесса

Таким образом, видим, что при различном соотношении параметров происходят различные процессы. В тех случаях, когда реактивное сопротивление превосходит активное при обрыве нейтрального провода происходит резкий скачек напряжения, что может привести к пробое изоляции и выводу из строя приборов.

УДК 621.3

## О ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЯХ ПО ЗАЩИТЕ АСУ ТП АЭС ОТ КИБЕРАТАК

Федосевич Э.А.

Научный руководитель – Сапожникова А.Г.

Все защитные меры могут быть разделены на 5 блоков, каждый из которых решает свой спектр задач кибербезопасности:

- идентификация активов и рисков;
- защита от угроз;
- обнаружение и реагирование на угрозы;
- восстановление после реализации угрозы.

Каждый из пяти блоков может быть детализирован. Например, первый блок может включать в себя такие защитные меры, как управление защищаемыми активами и оценка рисков. Защитный блок включает в себя следующий набор мероприятий:

- контроль доступа;
- обучение и повышение осведомленности;
- защита данных;
- процедуры и процессы защиты информации и информационных систем;
- поддержка защитных мер.

Оставшиеся блоки включают в себя непрерывный мониторинг безопасности, обнаружение атак и аномалий, планирование процесса реагирования на инциденты, сбор доказательств, атрибуция кибератак, коммуникации с заинтересованными сторонами, анализ инцидента и разбор полетов, улучшение системы защиты, восстановление после сбоев и инцидентов и ряд других защитных мер.

Проанализировав известные случаи хакерских атак на гражданские ядерные объекты (ГЯО) мы пришли к выводу, что наиболее подверженной нападению является автоматическая система управления технологическим процессом (АСУ ТП).

Связь между элементами АСУ ТП осуществляется через промышленную цифровую сеть, по которой с централизованного пульта управления или с отдельных устройств для обеспечения диспетчеризации команды поступают к исполнительным устройствам или контроллерам. Обратную связь обеспечивают при помощи разнообразных датчиков. Большой информационный поток, приходящий на пункт управления ежесекундно, а также большое количество элементов системы автоматического управления и дают возможность хакерам для взлома.

Независимые исследования показывают, что практически в любой АСУ ТП можно обнаружить множественные уязвимости, которые способны привести к нарушению корректной работы технологического процесса и реализации угроз несанкционированного доступа к информации, обрабатываемой в системах диспетчерского управления и сбора данных, отдельных интерфейсах управления объектами автоматизации, элементах телеметрической подсистемы и телемеханики, прикладных приложениях для анализа производственных и технологических данных, системах управления производством.

Исходя из мирового опыта, можно обозначить следующие наиболее часто встречающиеся уязвимости:

- исполнение произвольного кода (неавторизованное, авторизованным пользователем);
- загрузка и исполнение произвольных файлов;
- отказ в обслуживании, уязвимости, вызывающие повышение привилегий;
- раскрытие информации для доступа к базе данных.

Реализация некоторых перечисленных уязвимостей позволяет остановить технологический процесс, что в реалиях АЭС и энергосистемы в целом может стать фатальным.

Ещё одной уязвимой точкой любой электростанции является её релейная защита (РЗ), цифровые устройства которой чаще всего объединены в единую сеть. При постороннем вмешательстве в работу РЗ может произойти не только перебой в снабжении потребителей электроэнергией, но и порча дорогостоящего электрооборудования АЭС, вплоть до его полного выхода из строя.

Как упоминалось выше, информационные сети электроэнергетических предприятий сталкиваются с огромным количеством потенциальных киберугроз. Такие угрозы охватывают несколько векторов атак, а каждая уязвимость имеет свою собственную стратегию защиты.

Таким образом, сеть АСУ ТП может быть реально защищена только при условии применения множества средств защиты на различных уровнях. Если коротко, только таким способом можно защитить систему от каждого вектора атак и покрыть все уязвимости, которые появляются в случае использования отдельной защитной стратегии.

Применение защитных средств на различных уровнях называется глубокой защитой. Стратегия глубокой защиты направлена не на построение непроницаемой единой стены, но на построение различных уровней защиты. Такие защитные средства используют сочетание различных тактик для того, чтобы обнаружить и заблокировать атаку.

В информационных сетях предприятий электроэнергетики такой подход должен применяться на всех уровнях и векторах потенциальных атак.

Так как АЭС является наиболее важным объектом энергетики страны, то применение стандартных межсетевых экранов и описанного выше антивирусного ПО является недостаточным для того, обеспечить глубокую защиту. Такой подход нацелен только на один вектор защиты, он окажется бесполезным, если атакующий проникнет в сеть или воспользуется вредоносным ПО для отправки вредоносных команд. По этой причине применяется стратегия многоуровневой защиты по всем векторам атак, особенно в критически важной служебной сети или сети автоматизации.

В сети АСУ ТП крупных предприятий каждый уровень глубокой защиты имеет свои преимущества и недостатки. Работая на каждом уровне, комбинированное решение успешно обеспечивает защиту от:

- удаленных атак, которые проводятся из другого местоположения. Защита достигается путем использования межсетевого экрана и межсайтового шифрования. Эти действия не позволяют хакерам получить доступ к внутренним сетям «логически»;

- атаки «человек посередине». Защита достигается путем применения межсайтового шифрования, что предотвращает повреждение или фальсификацию данных;

- атаки на уровне управления сети. Защита достигается с помощью определенной архитектуры сети. Например, выбор инфраструктуры с высокой степенью защиты, такой как Carrier Ethernet или SONET/SDH вместо MPLS или MPLS-TP.

- атаки с маскировкой. Устраняются с помощью протоколов аутентификации источника, таких как IEEE802.1X, которые проверяют, что определенный хост не был заменен другой машиной, которая отправляет вредоносные данные;

- перехват данных и шпионаж. Защита достигается путем использования сетевых технологий с жестким определением пути и универсальным адресным пространством – таких как Carrier Ethernet;

- вредоносные атаки с RTU, управляющих станций или HMI. Устраняются путем использования распределенных межсетевых экранов с распознаванием приложений. Такие межсетевые экраны могут углубленно проверять трафик SCADA чтобы убедиться, что команды относятся к приложению управления или автоматизации – помимо проверки, что устройства являются элементами сети автоматизации.

Должным образом разработанная сеть предприятия будет окружена множеством защитных слоев, где каждый слой нацелен на защиту от определенного типа атаки. Когда один уровень защищает от одного типа атаки, следующий уровень покрывает его уязвимости. Сеть АСУ ТП может быть полностью защищена только в том случае, когда все

уровни работают одновременно. В противном случае, каждый отдельный уровень может быть атакован и выведен из строя относительно просто.

УДК 621.3

## УСТАНОВКИ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА СУШКИ БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Антонов И.И.

Научный руководитель – Гурьянчик О.А.

Сушка (высушивание) – теплообменный процесс удаления жидкости из твёрдых, жидких веществ или их смесей с помощью испарения. Бумажно-масляная изоляция состоит из слоев пропитанной маслом бумаги и масляных прослоек, заполняющих зазоры между слоями бумаги. Слой бумажной изоляции может быть выполнен из сплошных листов бумаги, как, например, в изоляции конденсаторов пакетного или рулонного типа, или путем намотки бумажной ленты с положительным или отрицательным перекрытием. На примере сушки бумажно-масляной изоляции трансформаторов, приведем схемы установок данного мониторинга. Сушка активной части является одной из самых ответственных работ при ремонте трансформатора. Бумажно-масляная изоляция в трансформаторах рассчитана на надежную работу лишь при условии ее высоких изоляционных свойств – сопротивления, электрической прочности, емкости и малых диэлектрических потерь. Эти факторы зависят прежде всего от влажности изоляции. Благодаря своей капиллярной структуре бумажная изоляция весьма гигроскопична. Термодинамический процесс сушки заключается в том, что изоляция нагревается, и влага перемещается из ее внутренних пор к поверхности, а потом в окружающую среду.

Сушка активных частей может производиться: в вакуум-сушильных шкафах или печах, в сушильных шкафах или печах без вакуума, в камерах без вакуума с нагревом инфракрасными лучами, в собственном баке вихревыми токами (индукционный способ), в собственном баке токами короткого замыкания; в собственном баке постоянным током, в собственном баке токами нулевой последовательности, в собственном баке сухим горячим маслом циркуляцией и фильтрацией, в камере или в собственном баке сухим горячим воздухом от тепловоздуховки.

Очень эффективно, когда вакуум-сушильная печь связана с масляным хозяйством и активную часть сразу после сушки непосредственно в печи заливают маслом. В этом случае масло заполняет поры изоляции, которые раньше были заняты влагой. Такая изоляция меньше подвержена увлажнению как после сушки во время последующих завершающих ремонтных операций (отделки), так и в дальнейшем, в эксплуатации.

Продолжительность вакуумной сушки зависит от емкости печи, герметичности ее уплотнений, мощности вакуумных насосов и степени увлажненности изоляции обмоток трансформатора. Она составляет 14–20 ч, причем нижний предел переходить нельзя, даже если условия окончания сушки наступят раньше, а верхний предел может и должен быть превышен до наступления этих условий.

Безвакуумная сушка производится в стационарных тупиковых печах. Обогрев может быть электрический, паровой, индукционный, калориферный и инфракрасными лучами. Технология сушки весьма проста: активные части загружают на тележку и вкатывают в печь, печь закрывают и включают обогрев. Сушка ведется естественно дольше, чем в вакуумной печи. Критерий окончания сушки единственный – величина сопротивления изоляции: сопротивление должно иметь установившееся значение в течение 3–4 ч.

Сушку активной части в собственном баке можно производить с маслом и без масла, и в зависимости от этого механизм сушки действует по-разному. Масло является теплоносителем и одновременно гигроскопичной средой, отбирающей из изоляции влагу. В масле целесообразно сушить активную часть с промасленными обмотками, т. е. при ремонте без их замены. Масло в процессе сушки рекомендуется один или несколько раз заменить (в зависимости от степени увлажненности изоляции). Если обмотки новые и сухие, то лучше сушить их в баке без масла.

Для сушки постоянным током используют выпрямительные устройства, подающие напряжение на одну или на обе обмотки. Сушка в том и другом случае может осуществляться как с маслом в баке трансформатора, так и без него.

УДК 621.3

## ИСПЫТАНИЯ МАСЛА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Иванов А.А.

Научный руководитель – Климкович П.И.

Жидкие изоляционные материалы получили очень большое применение в энергетике в виде трансформаторного масла. Электрическая прочность трансформаторного масла обычно поддерживается в пределах 80–100 кВ/см. Значительное снижение пробивного напряжения ( $U_{пр}$ ) масла обычно связано с его загрязнением или увлажнением. При увеличении расстояния между электродами пробивное напряжение возрастает, но уменьшается равномерность электрического поля, уменьшается  $U_{пр/см}$  и может достичь 10–20 кВ/см. Острые края и ребра также уменьшают  $U_{пр}$ . Для повышения  $U_{пр}$  применяют экранирование путем бумажного покрытия кромки электродов или установки электроизоляционных барьеров.

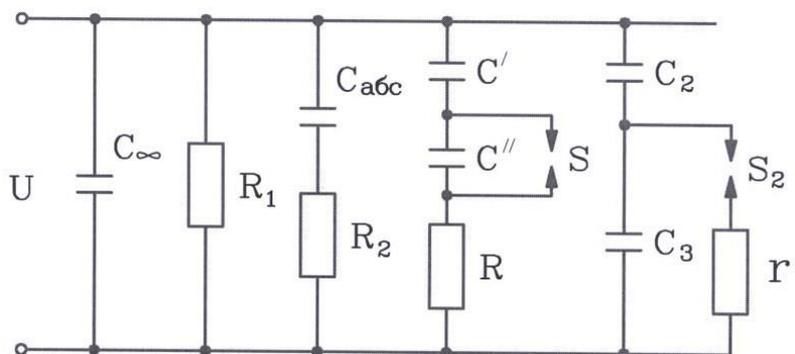


Рисунок 1. Схема замещения диэлектрика:

$C_{\infty}$  – геометрическая емкость (емкость вакуума и емкости мгновенной поляризации);  
 $R_1$  – сопротивление сквозной проводимости;  $C_{abc}$  и  $R_2$  – цепочка абсорбирующей составляющей и потерь диэлектрика;  $C'$ ,  $C''$ ,  $R$  – цепочка, в которой возможны потери из-за ионизации при наличии искрового промежутка  $S$  (при наличии частичных разрядов)

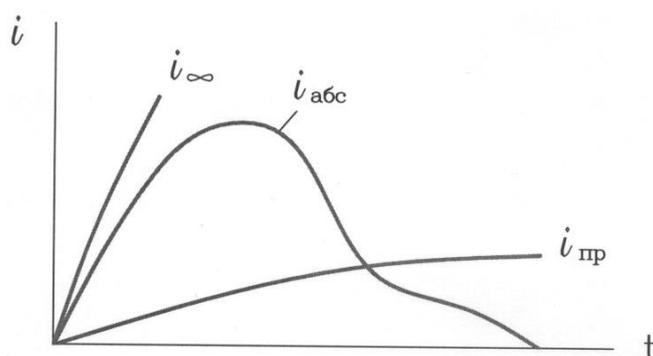


Рисунок 2. Кривые мгновенных значений токов, протекающих через изоляцию:

$i_{\infty}$  – ток, идущий на зарядку геометрической емкости;

$i_{abc}$  – ток абсорбции;  $i_{пр}$  – ток проводимости

В качестве измерительного элемента в большинстве мегаомметров используется вольтметр, измеряющий падение напряжения  $U_0$  на образцовом резисторе от измеряемого тока. Шкала прибора градуируется в единицах сопротивления. Такая схема применяется при выходном сопротивлении в несколько сотен вольт.

Для оценки состояния главной изоляции трансформаторов (реакторов) производится измерение изоляции (параметров главной изоляции): сопротивления изоляции,  $\text{tg}\delta$  и емкости.

В процессе эксплуатации  $K_T$  определяется из опыта холостого хода.  $K_T$  определяется на всех положениях переключающего устройства и для всех фаз. Для трехобмоточных трансформаторов достаточно проверить  $K_T$  для двух пар обмоток.

Измеряя  $K_t$ , можно выявить следующие дефекты:

- Неправильное подсоединение отводов РПН.
- Неправильная установка привода ПБВ.
- Неправильное подсоединение регулировочной обмотки.

$K_t$  определяют методом двух вольтметров класса погрешности не ниже 0,2.

С целью предохранения вольтметра в переходных процессах от повреждений его включают кнопкой «К» при установившемся значении тока.

Для сокращения времени установления тока применяют кратковременное форсирование шунтированием регулировочного сопротивления в цепи постоянного тока. Сопротивление этого резистора должно быть в 5–10 раз больше измеряемого сопротивления.

Основным параметром, характеризующим деформацию обмоток, является сопротивление короткого замыкания  $Z_k$ . По изменению  $Z_k$  можно определить степень деформации обмоток.

Трансформаторы играют очень важную роль в энергетике. Они трансформируют электрическую энергию из одного числа напряжения в другое. Они нашли применение не только в энергетике, но и в радиотехнике. Трансформатор – это универсальное электротехническое оборудование.

Но при работе трансформатор нагревается, и в данной работе были рассмотрены различные системы охлаждения трансформаторов. Бывают так называемые «сухие» трансформаторы, которые охлаждаются с помощью воздуха. Также были рассмотрены трансформаторы с масляным охлаждением, которые охлаждаются с помощью масла, и различные модификации масляной системы охлаждения трансформаторов, например, с принудительной циркуляцией масла или принудительная циркуляция воды и масла с ненаправленным потоком масла. В настоящее время ведутся исследования и разработки в трансформаторов. Разрабатываются новые конфигурации систем, чтобы увеличить пожаробезопасность трансформаторов, увеличить ресурс трансформаторов, увеличить устойчивость к перегревам и улучшить экологические показатели.

В себестоимости силовых трансформаторов повышающих надежность трансформаторов и позволяющих производить пожаробезопасные и экологически безопасные трансформаторы, является наиболее целесообразным и экономически оправданным способом усовершенствования трансформаторов.

#### Литература

1. Антонов, М.В. Технология производства электрических машин / М.В. Антонов, Л.С. Герасимова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 512 с.
2. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины / А.В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1980. – 928 с.
3. Кацман, М.М. Электрические машины автоматических устройств / М.М. Кацман. – М. : Инфа-М, 2002. – 264 с.

УДК 620.9

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ГИБКИХ ПРОВОДОВ АНКЕРНЫХ ПРОЛЕТОВ ОТКРЫТЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 330 кВ БЕЗ ОТПАЕК К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ АППАРАТАМ

Зарихта К.С., Баран А.Г.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.

Вычислительный эксперимент по расчету токов электродинамической стойкости пролетов типовых конструкций распределительных устройств (РУ) 330 кВ будем выполнять с помощью, разработанной на кафедре «Электрические станции» компьютерной программы FleBus, основанной на расчетной модели провода в виде гибкой упругой нити. РУ такого класса напряжения получили наибольшее распространение на территории Республики Беларусь в составе электростанций и подстанций.

Из всех пролетов выбираем пролеты наибольшей длины, где отклонения проводов будут больше, чем в коротких пролетах. Токи электродинамической стойкости гибких шин для пролетов с другими параметрами могут быть определены путем интерполяции и экстраполяции имеющихся результатов или отдельным численным расчетом. На рисунке 1 представлен наиболее длинный пролет РУ 330 кВ.

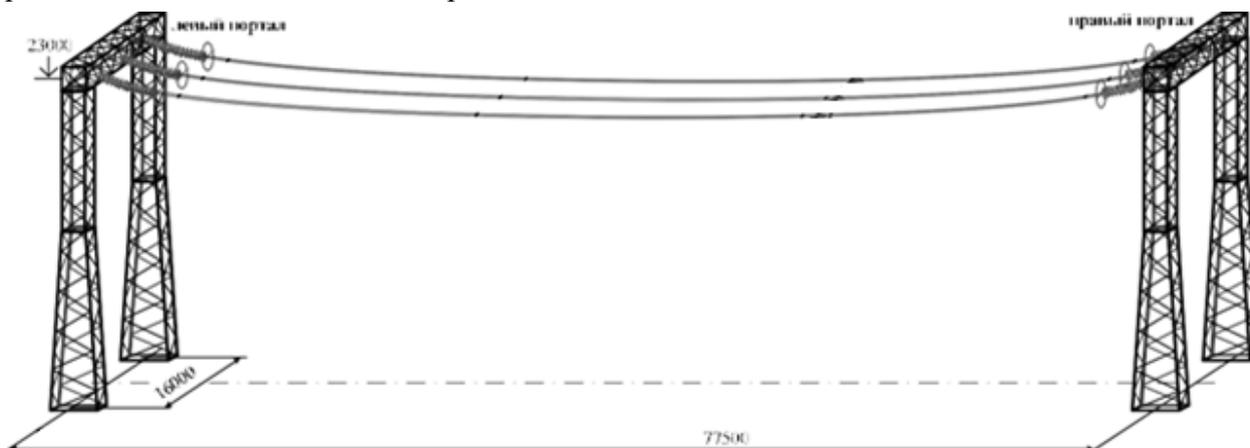


Рисунок 1. Пролет ячейки типового РУ 330 кВ длиной 77,5 м

Выполним расчет электродинамической устойчивости для, приведенного на рисунке 1, пролета ячейки с гибкой ошиновкой 330 кВ. Наиболее неблагоприятным видом короткого замыкания (КЗ) при данных условиях является двухфазное КЗ. Принимаем предельный ток КЗ равный 50 кА. Продолжительность КЗ будем изменять от 0,1 до 0,5 с с шагом 0,05 с, постоянную времени КЗ принимаем 0,1 с. Рассматриваем случаи с 2 проводами в фазе. Марка проводов – АС, сечения – 240/39, 300/39, 300/48, 400/51, 500/64. Гирлянда изоляторов – 22 штуки ПС6-А. Начальная стрела провеса – 2,7 м, междуфазное расстояние – 6 м. Климатические условия: температура +25 °С, ветер и гололед отсутствуют. Отпайки между проводами в фазе расположены через каждый 7,75 метра.

На рисунках 2–6 представлены результаты вычислительного эксперимента сближения шин в зависимости от величины тока КЗ при различных продолжительностях его воздействия. По графикам можно отследить допустимую величину тока КЗ при определенной продолжительности его воздействия. Согласно ПУЭ, для рассматриваемого класса напряжения минимально допустимое междуфазное расстояние равно 1,4 метра. Так, для шины сечением 240/39 при продолжительности КЗ 0,5 с, допустимая величина тока КЗ составляет 26,5 кА. Токи электродинамической стойкости гибкой ошиновки  $I_{дин}$  возрастают с увеличением сечения проводника. Это объясняется большей инерционностью тяжелых проводников.

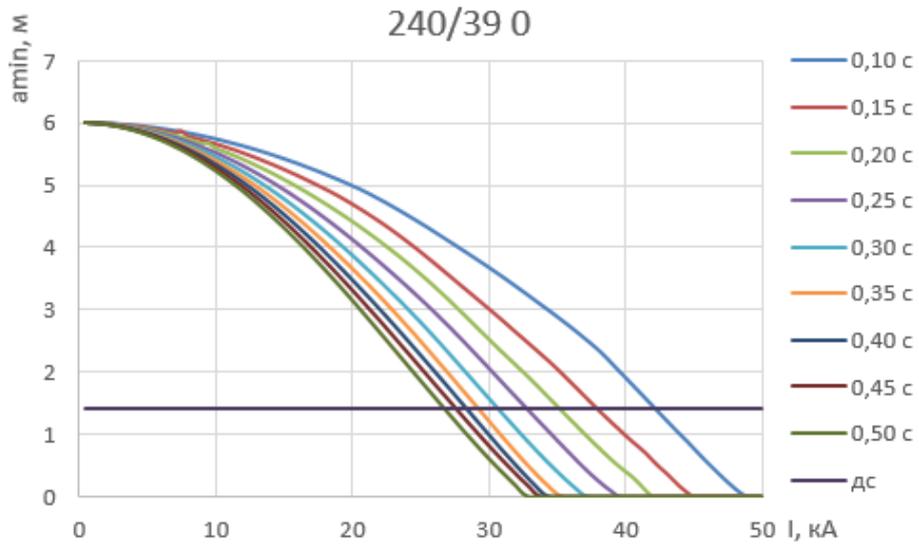


Рисунок 2. Сближение проводов АС-240/39 для пролета длиной 77,5 м (рисунок 1)

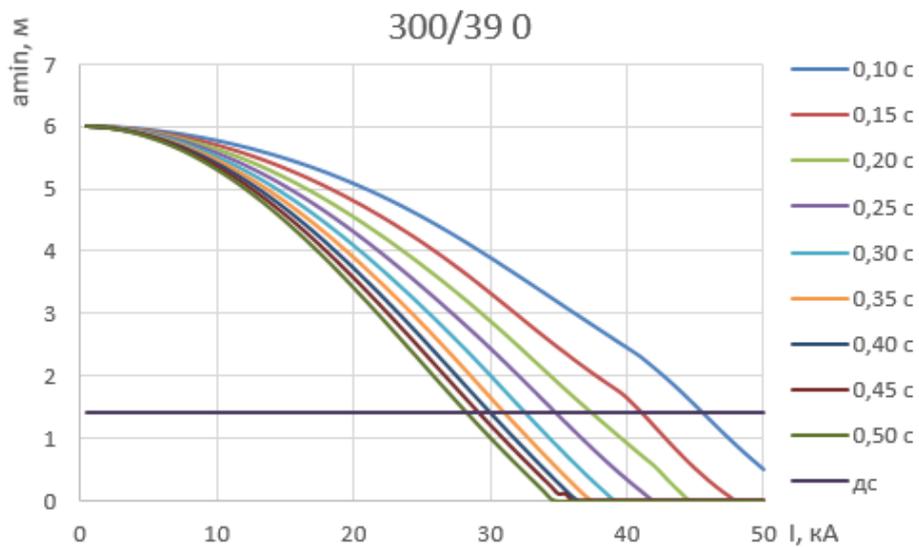


Рисунок 3. Сближение проводов АС-300/39 для пролета длиной 77,5 м (рисунок 1)

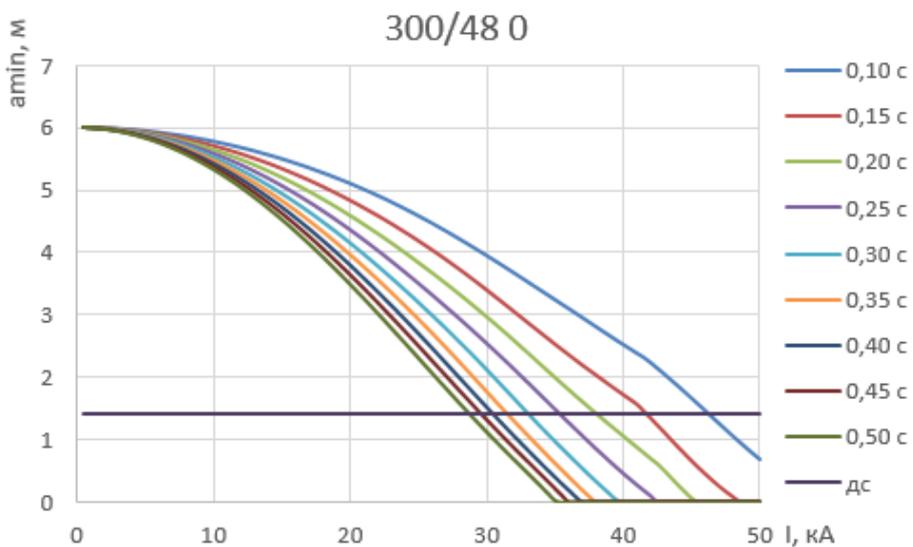


Рисунок 4. Сближение проводов АС-300/48 для пролета длиной 77,5 м (рисунок 1)

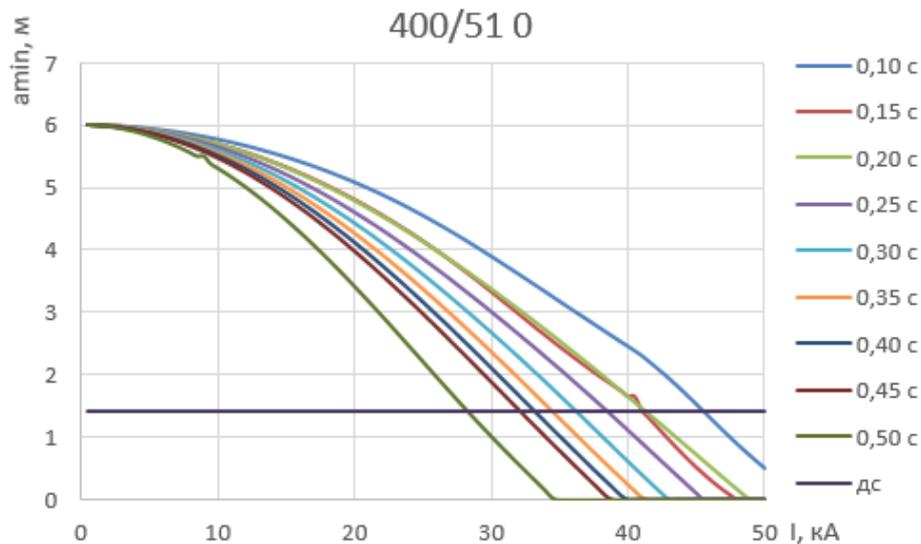


Рисунок 5. Сближение проводов АС-400/51 для пролета длиной 77,5 м (рисунок 1)

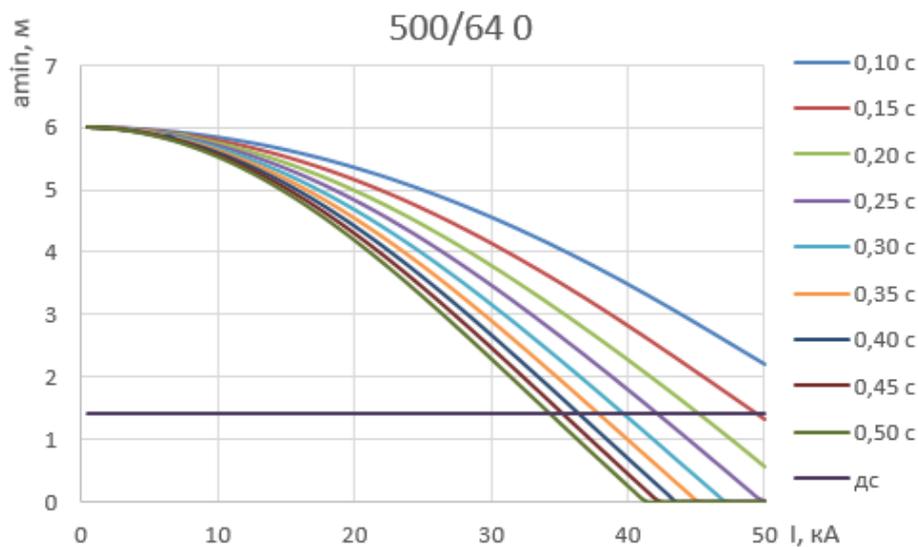


Рисунок 6. Сближение проводов АС-500/64 для пролета длиной 77,5 м (рисунок 1)

### Литература

1. Васильев, А.А. Электрическая часть станции и подстанций / А.А. Васильев. – М. : Энергия, 1980. – 608 с.
2. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б.Н. Неклепаев. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
3. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
4. Сергей, И.И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент / И.И. Сергей, М.И. Стрелюк. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.

УДК 621.3

## УСТАНОВКИ МОНИТОРИНГА ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ МАШИН

Журович Н.В., Волов Р.А.

Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

Измерение частичных разрядов (ЧР) при стендовых испытаниях высоковольтного оборудования является основным методом диагностики изоляции во всех высоковольтных лабораториях мира. Тем не менее, при контроле силового оборудования в эксплуатации, измерение ЧР пока применяется сравнительно редко. Это объясняется довольно серьезными проблемами, возникающими при измерении ЧР в реальных условиях эксплуатации, и в первую очередь – с наличием разного рода помех, уровень которых на действующих подстанциях значительно выше, чем при стендовых испытаниях.



Рисунок 1. Повреждения изоляции обмоток статора

Большинство существующих на сегодня приборов для измерения ЧР не обеспечивают необходимого уровня выделения сигналов ЧР из помех, поэтому нижний регистрируемый уровень сигналов ЧР (определяемый уровнем помех) оказывается недопустимо большим и не обеспечивает надежного обнаружения дефектов изоляции в полевых условиях. Кроме того, эти приборы не обеспечивают регистрации амплитудно-фазовых распределений сигналов ЧР, без чего идентификация дефектов изоляции становится практически невозможной. Это в основном и ограничивает применение данного метода в эксплуатации.

При проведении полевых измерений использовалась система контроля изоляции СКИ-2, которая была разработана и оптимизирована для работы в условиях высокого уровня помех. Для подавления помех, в ней предусмотрены сменные частотные фильтры, селекция сигналов по длительности, антенные датчики и другие средства подавления мешающих сигналов. СКИ-2 обеспечивает измерение амплитудно-фазовых характеристик сигналов ЧР, использование различных типов датчиков ЧР, накопление и обработку данных, непрерывный мониторинг оборудования. В процессе более чем двухлетней эксплуатации параметры системы корректировались с учетом накопленного опыта.

В соответствии со статистикой отказов, на втором месте по распространению среди причин выхода из строя двигателей и генераторов находятся повреждения изоляции статора. В течение срока службы оборудования различные факторы стресса и старения приводят к появлению ЧР, который может вызвать дефекты и фактический диэлектрический отказ в изоляции обмоток статора.

В изоляции статоров больших вращающихся машин допустимо присутствие ЧР только определенного уровня. Высокочувствительные измерения частичных разрядов позволяют выявить потенциальные дефекты до того, как произойдет отказ. Для надежной

идентификации и локализации вредного воздействия ЧР применяются алгоритмы шумоподавления и разнесения источников ЧР.

Непрерывный или периодический мониторинг ЧР позволяет получать актуальную информацию о состоянии изоляции статора во вращающихся машинах во время нормального режима работы.



Рисунок 2. Прибор-анализатор PDA-IV периодического оперативного мониторинга частичных разрядов для гидрогенераторов



Рисунок 3. Прибор HVPD PDS Rogowski для предварительной диагностики частичных разрядов в электрооборудовании и вращающихся машинах

УДК 621.3

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ/ДИАГНОСТИКИ ПЕРВИЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА OMICRON

Смоляков Е.А.

Научный руководитель – Климкович П.И.

OMICRON – это международная компания, предлагающая передовые испытательные и диагностические системы для предприятий электроэнергетической промышленности. Применение продуктов OMICRON позволяет оценивать состояние первичного и вторичного оборудования электроэнергетических систем с полной уверенностью. Услуги в области консалтинга, пуско-наладки, проведения испытаний, диагностики и обучения персонала дополняют профиль деятельности компании.

На сегодняшний день компания OMICRON предоставляет довольно широкий спектр устройств для полноценной диагностики первичных устройств: трансформаторов, изоляции и прочих. Наиболее универсальным устройством является СРС 100, которое может заменить довольно большой перечень устройств. Основной блок СРС 100 генерирует частотный испытательный ток и измеряет ток и напряжение, используя для точности цифровую фильтрацию. Это позволяет соответствующим образом вычислить сложный импеданс контура. СР СU1 обеспечивает гальваническую развязку между испытываемой линией и СРС 100, а также согласование полного сопротивления для коротких и длинных линий. СР GВ1 защищает испытательное оборудование и пользователей от любого неожиданного перенапряжения на испытываемой линии.

Для упрощения испытаний первичного оборудования используется универсальное устройство для диагностики первичного оборудования СРС 100 (рисунок 1).



Рисунок 1. Устройство СРС 100

С помощью СРС 100 можно проводить электрические испытания на силовых и измерительных трансформаторах, вращающихся машинах, системах заземления, линиях электропередач, высоковольтных кабелях и силовых выключателях. К установке можно подключать целый ряд вспомогательных блоков, расширяя диапазон доступных испытаний. С помощью расширенной системы измеряется, к примеру, коэффициент мощности, тангенс угла диэлектрических потерь, полное входное сопротивление линии и полное сопротивление относительно земли. Запатентованная испытательная система заменяет

Запатентованная испытательная система заменяет многочисленные отдельные испытательные устройства и предлагает новые, инновационные методы тестирования. Это делает тестирование с помощью СРС 100 экономящей время и рентабельной альтернативой по сравнению с обычными методами тестирования. Несмотря на свои обширные возможности, СРС 100 очень прост в использовании. Мощное испытательное устройство обеспечивает до 800 А или 2 кВ (2 кА или 12 кВ с принадлежностями) мощностью до 5 кВА в частотном диапазоне 15–400 Гц или 400 А постоянного тока. Его компактная конструкция (29 кг) делает его легко транспортируемым и идеально подходящим для испытаний в полевых условиях.

С помощью СРС 100 можно проводить испытания различного оборудования:

- трансформаторов тока;
- трансформаторов напряжения;
- силовых трансформаторов;
- линий электропередач;
- кабелей высокого напряжения (ВН);
- систем заземления;
- электрических вращающихся машин;
- систем коммутационных устройств с газовой изоляцией;
- коммутационных устройств и силовых выключателей;
- установок ИЕС 61850;
- защитных реле.

Благодаря высококачественным комплектующим и интенсивным производственным испытаниям система СРС 100 стала надежным решением, которым пользуются по всему миру. Изменяемая частота выходного сигнала СРС 100 позволяет использовать испытательные частоты, отличные от частоты сети, и представляет очень эффективное подавление помех, связанных с силовой сетью. Таким образом, СРС 100 способен получить очень точные результаты даже в сильно помехонасыщенных средах. Еще одним важным преимуществом выполнения измерений на разных частотах является возможность получить больше информации о тестируемом оборудовании. СРС 100 использует усилители с режимом переключения и методику частотного сдвига для создания переменной частоты выходного сигнала.

УДК 621.3

## ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА И ПОСТРОЕНИЯ ЗОН МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Соленик Г.Л.

Научный руководитель – Климович П.И.

Удар молнии способен привести к разрушению промышленных и жилых сооружений, пожару, взрыву, выходу из строя линий электропередач (ЛЭП), электроустановок и средств информационно – коммуникационных технологий (ИКТ), а также опасен для людей и животных.

Молниезащитой называются комплекс защитных устройств, предназначенных для обеспечения безопасности людей, сохранности зданий и сооружений, оборудования и материалов от возможных взрывов, загорания и разрушения, вызванных электрическим, тепловым или механическим воздействием молнии.

Занос высоких потенциалов в здания возможен по проводам воздушных линий электропередачи, подземным трубопроводам, кабелям, рельсовым путям в результате прямых ударов молнии в коммуникации или вблизи них и может вызвать опасные искрения, явиться причиной взрывов, пожаров и поражения людей.

Программы для ЭВМ «Щит-М» в системе MathCAD. С целью автоматизации процесса проектирования разработана быстродействующая MathCAD-программа «Щит-М» выполняющая циклические расчеты для стержневых и тросовых молниеотводов, рассматриваемых как отдельно, так и совместно в различных комбинациях. Расчет зон защиты проводится по любому из семи представленных в программе методов. Алгоритм программы разработан в системе MathCAD, которая адаптирована для решения сложных математических задач. Минусом данной системы можно считать затрудненный ввод параметров исследуемых объектов, для последующей математической обработки по описанному алгоритму.

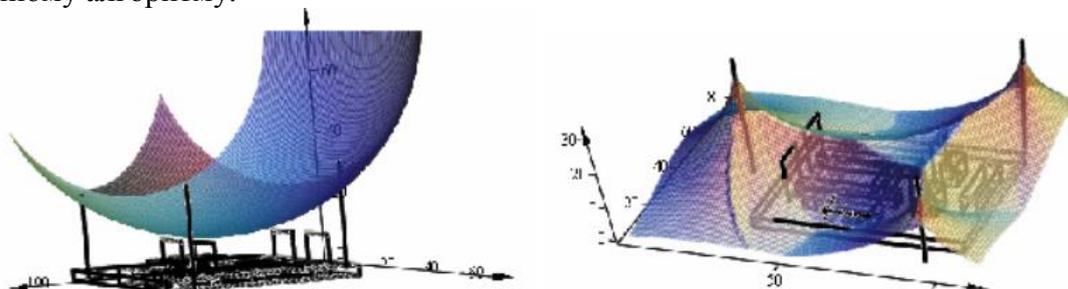


Рисунок 1. Результаты расчета зон защиты системы молниеотводов в программе «Щит-М»

Программный комплекс Model Studio CS. Основное назначение Model Studio CS Молниезащита – расчет и трехмерное интерактивное проектирование молниезащиты зданий, сооружений и открытых территорий. Вы можете проектировать новые средства молниезащиты, определять эффективность защитного действия уже существующих молниеотводов. Возможна и компоновка объекта в целом: новое приложение предоставляет доступ ко всему инструментарию Model Studio CS для трехмерного проектирования. Изменить методику расчета, а значит, и автоматически перестроить зону можно на любом этапе – это позволяет за самое короткое время проверить все возможные варианты и выбрать наилучший. При вставке в чертеж второго и последующих стержневых молниеприемников программный комплекс самостоятельно определяет тип взаимодействия между ними.

Beroes MZ 2.1 – программа расчета параметров зон защиты молниеотводов. Программа предназначена для персонала предприятий электрических сетей, проектных организаций и студентов учебных заведений, занимающихся расчетом устройств молниезащиты. Данная версия программы позволяет рассчитывать зоны защиты одиночных стержневого и

тросового молниеотводов, а также двойного стержневого с молниеотводами одинаковой высоты. Расчет зоны защиты молниеотвода может быть выполнен для любого количества объектов с различными габаритами, категорией молниезащиты и типом зоны защиты.

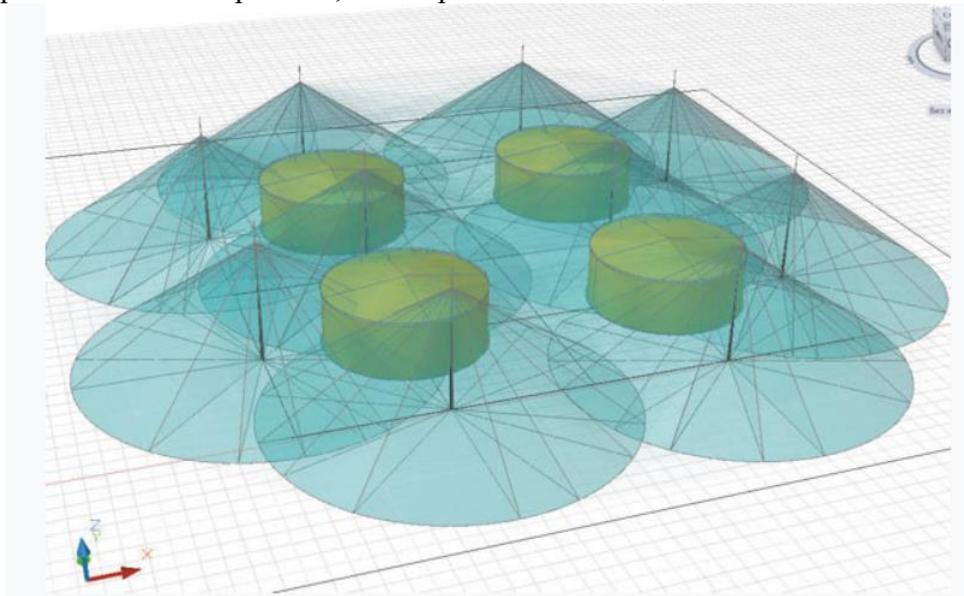


Рисунок 2. Результаты расчета зон защиты системы молниеотводов в программном комплексе Model Studio CS

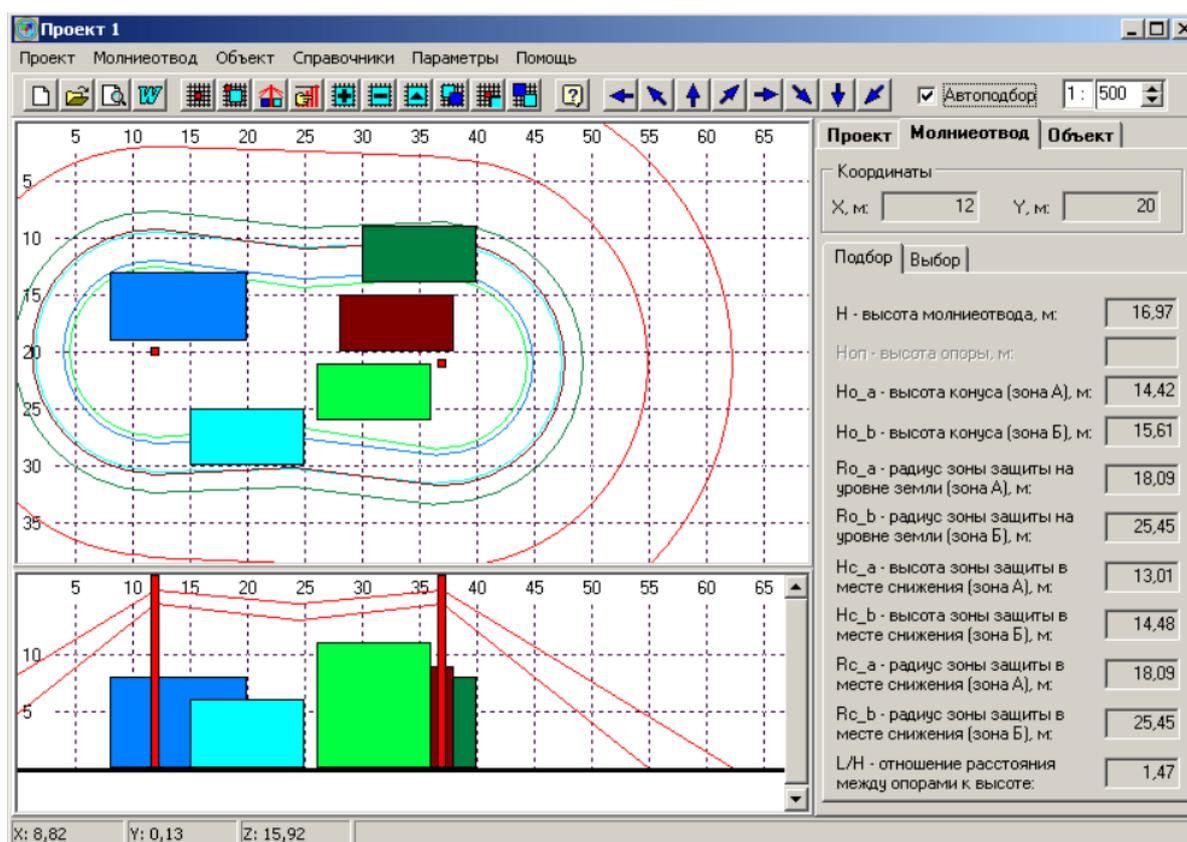


Рисунок 3. Определение требуемой расчетной высоты молниеотвода в автоматическом режиме программы Beroes MZ 2.1

Молния опасна тем, что, как природное явление, имеет чрезвычайную разрушительную силу. Сама по себе молния – это импульс электрического тока огромной силы, который возникает за счет накопления заряда в облаках гроз. Сила тока в этом импульсе колоссальна и составляет 200 тысяч ампер.

УДК 621.31

## АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НЕЙТРАЛЕЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ЭНЕРГОСИСТЕМЫ БЕЛАРУСИ

Францкевич А.И.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.

Производство, преобразование, транспортировка, распределение и потребление электрической энергии осуществляется по симметричной трехфазной системе проводов. Симметричность системы достигается равенством фазных и линейных напряжений, равномерной загрузкой всех фаз по току, одинаковым сдвигом фаз напряжений и токов.

Однако, в процессе эксплуатации неизбежны нарушения симметрии трехфазной системы. В любом случае, несимметрия ведет к появлению токов обратной и нулевой последовательности, а также апериодической составляющей токов, которые могут быть опасны для сохранности оборудования. Поэтому несимметрия должна быть устранена как можно быстрее. На быстрдействие релейной защиты при неполнофазных режимах значительное влияние имеет режим работы нейтрали сети.

Нейтраль – это точка в сети, потенциал которой относительно земли при ее нормальном режиме работы равен нулю. В зависимости от того, как соединена нейтраль с землей, возможны следующие виды режима нейтрали:

- изолированная нейтраль;
- компенсированная нейтраль;
- нейтраль, заземленная через резистор;
- глухозаземленная нейтраль;
- эффективно заземленная нейтраль.

Выбор режима нейтрали электрических сетей является результатом учета многих технико-экономических факторов. При этом главным из них являются электробезопасность, требуемая степень надежности, экономичность и возможность дальнейшего развития сетей.

Во многих странах мира, в том числе в Беларуси, широко распространена система изолированной нейтрали, и система компенсированной через дугогасящий реактор (ДГР) нейтрали сетей 6–35 кВ.

Основным достоинством таких систем заземления нейтрали является то, что даже в режиме однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) представляется возможным определенное время осуществлять электроснабжение потребителей без отключения поврежденного участка сети. Однако отмеченное преимущество всегда сопровождается негативными явлениями:

– при металлическом ОЗЗ напряжение на неповрежденных фазах повышается до линейного, что представляет повышенную опасность для изоляции кабельных сетей с длительным сроком эксплуатации;

– возможно возникновение значительных дуговых перенапряжений, которые могут вызвать переход ОЗЗ в двухфазные и трехфазные замыкания, множественные повреждения изоляции;

– режим ОЗЗ может приводить к развитию феррорезонансных явлений и повреждению трансформаторов напряжения – в случае резонансной настройки ДГР, ОЗЗ сопровождается малыми токами замыкания на землю, что исключает возможность создания простой, надежной и селективной защиты, способной выявить поврежденные присоединения;

– повышается опасность поражения людей и животных из-за длительного существования ненормального режима работы электрической сети.

По этим причинам в Беларуси признано целесообразным модернизировать режим заземления нейтрали сетей 6–35 кВ, перейдя на её заземление через резистор (резистивная система) или через резистор и ДГР (комбинированная система).

При ОЗЗ в сетях с заземленной через резистор нейтралью во всех присоединениях протекают собственные емкостные токи, а в поврежденном присоединении, кроме того,

протекает активный ток, создаваемый резистором. Это принципиальное отличие позволяет решить две важные задачи:

- селективно определить поврежденное присоединение и незамедлительно принять меры по устранению повреждения;
- существенно ограничить уровень дуговых перенапряжений при ОЗЗ и исключить феррорезонансные процессы (при этом появляется возможность защиты оборудования ПС с помощью ОПН с более низким остающимся напряжением при коммутационном импульсе).

Системой электроснабжения с эффективно заземленной нейтралью считается сеть, в которой заземлена часть нейтральных обмоток силовых трансформаторов. Однофазное короткое замыкание, в таких сетях, приводит к отключению поврежденного участка.

В сетях с эффективно заземленной нейтралью трансформаторы подвержены опасным перенапряжениям в аварийных режимах, когда, например, при обрыве и соединении провода с землей выделяется по тем или иным причинам участок сети, не имеющий заземленной нейтрали со стороны источника питания. На таком участке напряжение на нейтральных трансформаторов становится равным по значению и обратным по знаку ЭДС заземленной фазы, а напряжение неповрежденных фаз относительно земли повышается до линейного. Возникающие при этом в результате колебательного перезаряда емкостей фаз на землю перенапряжения представляют собой серьезную опасность для изоляции трансформаторов и другого оборудования участка.

В сетях с эффективно заземленной нейтралью на случай перехода части сети в режим работы с изолированной нейтралью от замыканий на землю предусматривают защиты, реагирующие на напряжение нулевой последовательности  $3U_0$ , которое появляется на зажимах разомкнутого треугольника трансформатора напряжения при соединении фазы с землей. Защиты действуют на отключение выключателей трансформаторов с незаземленной нейтралью. Защиты от замыканий на землю в сети настраивают таким образом, чтобы при однофазном повреждении первыми отключались питающие сеть трансформаторы с изолированной нейтралью, а затем трансформаторы с заземленной нейтралью. На тех подстанциях 110 кВ, где силовые трансформаторы не могут получать подпитку со стороны СН и НН, такие защиты от замыканий на землю не устанавливаются, не производится также и глухое заземление нейтралей.

В режиме глухого заземления работают сети с бытовым потребителем. При таком режиме работы нейтрали средняя точка обмоток НН трансформатора присоединяется к заземляющему контуру. В распределительных щитках жилых домов, корпус щитков также присоединяется к заземляющему контуру. Этот способ заземления нейтрали не используется в сетях, содержащих высоковольтные электродвигатели. Токи однофазного замыкания в этом случае достигают нескольких килоампер, что недопустимо с позиций повреждения статора электродвигателя (выплавление стали при однофазном замыкании).

Сейчас широко применяется система изолированной нейтрали сетей 6–35 кВ (без компенсации и с компенсацией емкостных токов), которая по своей физической сущности обладает рядом принципиальных недостатков, связанных с режимом ОЗЗ. Основные из них – это различного рода перенапряжения, и повышенная опасность поражения людей и животных электрическим током.

#### Литература

1. Вильгейм, Р. Заземление нейтрали в высоковольтных системах / Р. Вильгейм, М. Уотерс. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1959.
2. Сирота, И.М. Режимы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.П. Кисленко, А.М. Михайлов. – Киев: Навук. думка, 1985.
3. Лихачев, Ф.Л. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.Л. Лихачев. – М. : Энергия. 1971.
4. Евдокунин, Г.А. Анализ внутренних перенапряжений в сетях 6–10 кВ и обоснование необходимости перевода сетей в режим с резистивным заземлением нейтрали / Г.А. Евдокунин // Режимы заземления нейтралей сетей 6–10 кВ: доклады научно-технической конференции. –

Новосибирск, 2000.

5. Шабад, М.А. Обзор режимов заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ / М.А. Шабад // Энергетик. – 1999. – № 3. – С. 10–14.

6. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М., 2001.

7. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений и токов.

УДК 621.3

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ГИБКИХ ШИН ОРУ 110 КВ МИНСКОЙ ТЭЦ-3

Плешко Д.Ю.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.

Под гибкой ошиновкой ОРУ понимается система подвешенных гибких проводов, которые крепятся к несущим конструкциям порталного типа с помощью натяжных гирлянд изоляторов. Гирлянды собирают из стеклянных изоляторов типа ПС или фарфоровых типа ПФ. В качестве основных принимаются более прочные и удобные в эксплуатации стеклянные изоляторы. Длина гирлянд изоляторов в зависимости от напряжения составляет от 0,9 м на 35 кВ до 9,5 м на 750 кВ, и их вес соизмерим с весом проводов в пролете. Все соединения в гирлянде, а также ее крепление к порталам выполняются шарнирно, поэтому гирлянда изоляторов представляет собой гибкую цепь элементов.

Гибкая ошиновка вместе с порталами образует анкерованные пролеты, расположенные рядами (пролеты ячеек). Ниже перпендикулярно к ним находятся пролеты сборных шин (шинные пролеты). Электрическая связь между анкерованными пролетами выполняется в виде свободно висящих петель (шлейфов). К гибким шинам ОРУ посредством ответвительных зажимов присоединяются спуски к электрическим аппаратам. Они монтируются практически без натяжения и имеют, как правило, значительную разность высот подвеса. В ряде случаев они представляют собой вертикально расположенные отпайки.

Обычно в пролете гибких шин ОРУ имеется не более трех спусков к электрическим аппаратам. Для подвески гибкой ошиновки ОРУ применяются сборные железобетонные или стальные порталы. В отдельных случаях стойки порталов выполняются железобетонными, а траверсы – металлическими. Высота порталов для ячейковых пролетов составляет от 7,86 м на 35 кВ до 26 м на 750 кВ, соответственно для шинных пролетов – от 6,1 до 17 м. Таким образом, гибкая ошиновка ОРУ является неоднородной по составу механической системой, которая под действием ЭДУ при КЗ совершает сложное колебательное движение. При больших токах КЗ оно сопровождается недопустимым сближением проводов соседних фаз и значительными динамическими усилиями на порталы и электрические аппараты. Поэтому в соответствии с указаниями ПУЭ и ГОСТ при проектировании ОРУ необходимо проверять электродинамическую стойкость гибкой ошиновки к большим токам КЗ.

Для оценки электродинамической стойкости гибкой ошиновки по условиям необходимо выполнить расчет ее динамики с учетом конструктивных элементов ОРУ. Расчетным является один пролет гибкой ошиновки ОРУ (рисунок 1). Влияние на него смежных участков заменяется динамическими силами, являющимися зеркальным отображением тяжений расчетного пролета.

Считается, что рядом расположенные пролеты идентичны и обтекаются одинаковыми по величине токами КЗ. В местах присоединения к гибким шинам спусков, гирлянд изоляторов, шлейфов, распорок, коромысел действуют сосредоточенные нагрузки, поэтому динамика гибкой ошиновки не может быть описана только уравнениями гибкой упругой нити. Эту систему необходимо дополнить уравнениями движения конструктивных элементов (гирлянд изоляторов, порталов, отпайек к аппаратам, аппаратов, зажимов, коромысел и распорок). Гирлянда изоляторов является гибкой цепью элементов, состоящей из чередующихся изоляционных и металлических компонентов.

Однако для упрощения модели она, как и провод, представляется гибкой упругой нитью с равномерно распределенной по длине массой. Этот подход очевиден и используется в работах, посвященных механическому расчету гибкой ошиновки ОРУ и воздушных ЛЭП. Упругие свойства расчетной модели гирлянды определяются параметрами стальных стержней изоляторов, составляющих более 90 % всей ее длины. Поэтому расчетная модель

гибкой ошиновки состоит из последовательно связанных между собой участков однородных гибких упругих нитей. Динамика участков расчетной модели, заменяющих гирлянды, провода шин и спусков, описывается системой уравнений.

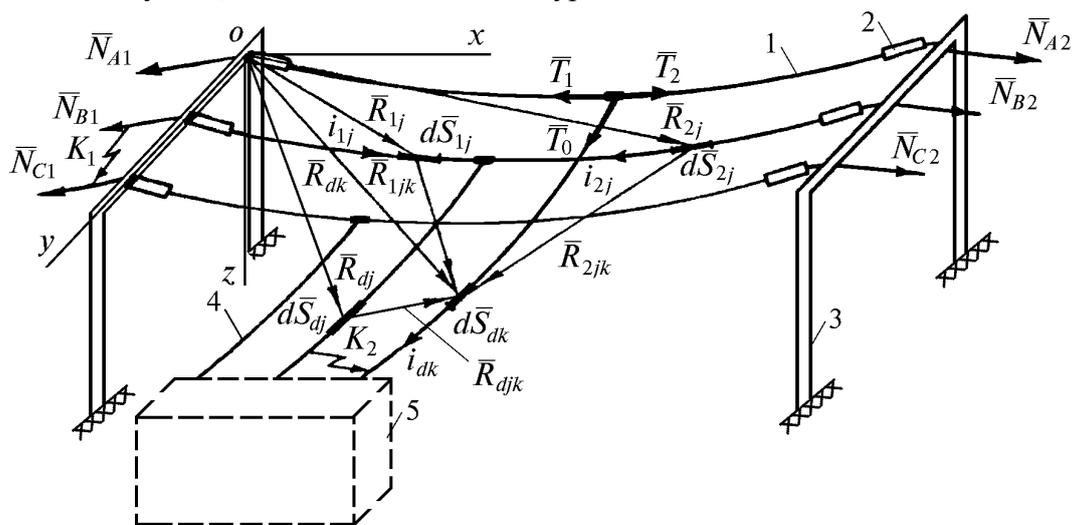


Рисунок 1. Расчетная схема пролета гибкой ошиновки ОРУ

Для гибкой ошиновки с расщепленными проводами в местах присоединения спусков устанавливаются дистанционные распорки жесткого типа. Согласно принципу связей механики, они освобождаются от последних, и рассматривается их динамика под действием сил от шин и спусков по уравнениям жесткой распорки.

Эти уравнения используются также для описания динамики коромысла, соединяющего гирлянду с расщепленными проводами гибкой ошиновки. Динамика концов гирлянд и спусков зависит от упругих и инерционных характеристик порталов, электрических аппаратов и шинных изолирующих опор.

Действующие на электрический аппарат или изолирующую опору нагрузки от проводов по осям  $x$  и  $y$  являются изгибающими, а по оси  $z$  – растягивающими. Соотношение между ними зависит не только от расположения спусков, но и места КЗ. При сквозном КЗ спуски под действием сил от шин перемещаются в плоскости  $yoz$ , поэтому от них на аппарат действуют изгибающие и растягивающие усилия в этой плоскости.

При КЗ в ячейке путь протекания тока КЗ включает в себя провода ответвлений. Их электродинамические взаимодействия между собой и с шинами ОРУ обуславливают изгибающие нагрузки по трем взаимноперпендикулярным направлениям. Динамические прогибы шинных изолирующих опор и электрических аппаратов находят из уравнений колебаний упругого стержня с заземленным концом (консоли). Электрические аппараты представляются эквивалентной консолью. Соответствие динамических характеристик консоли и реального электрического аппарата обеспечивается при использовании его экспериментальной жесткости в целом.

Порталы представляют собой П-образные металлические или железобетонные конструкции с заземленными в грунте стойками и шарнирно соединенными с ними траверсами. Только в ОРУ 500 кВ и выше применяются стальные порталы с жестким соединением стоек с траверсой. При расчете динамики порталов используется расчетная схема в виде трех стержней. Траверса представляется упругим стержнем с равномерно распределенной массой и постоянной жесткостью по длине, который имеет шарнирно-закрепленные концы. На этот стержень действуют сосредоточенные силы, равные проекциям векторов тяжений в точках крепления гибкой ошиновки к порталам. Расчетная модель стойки принимается в виде консоли, на конец которой действует сила из плоскости портала, равная поперечной силе в опорном сечении траверсы. Влияние подвижности стоек на формы и частоты собственных колебаний траверсы не учитывается. В общем случае силы, действующие на портал при КЗ, имеют три составляющие по координатным осям. Под

действием составляющих сил по осям  $x$  и  $z$  траверса портала совершает вынужденные поперечные колебания. Вынужденными продольными колебаниями траверсы можно пренебречь, так как суммарная сила, действующая на портал по оси  $y$ , как показывают экспериментальные данные, при любом виде КЗ незначительна. Прогибы стоек обусловлены силами из плоскости портала. Вынужденные поперечные колебания траверсы в плоскостях  $xoy$  и  $zoy$  обуславливают действие на стойки сил, имеющих составляющие по осям  $x$  и  $z$ . Продольные колебания стоек по оси  $z$  не учитываются, и рассматриваются их вынужденные поперечные колебания под действием составляющей силы по оси  $x$ .

В результате работы с помощью программы FleBus была рассчитана электродинамическая стойкость гибких шин ОРУ 110 кВ Минской ТЭЦ-3 и сделаны соответствующие выводы о пригодности данного РУ для работы, а также даны практические рекомендации по его конструктивному улучшению.

#### Литература

1. Васильев, А.А. Электрическая часть станции и подстанций / А.А. Васильев – М.: Энергия, 1980. – 608 с.
2. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б.Н. Неклепаев – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
3. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
4. Сергей, И.И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент / И.И. Сергей, М.И. Стрелюк. – Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.

УДК 621.316

## ТОКОВАЯ НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА

Конохов М.С.

Научный руководитель – Гурьянчик О.А.

Релейная защита (РЗ) осуществляет автоматическую ликвидацию повреждений и ненормальных режимов в электрической части энергосистем и является важнейшей системой, обеспечивающей их надёжную работу. В современных условиях значение релейной защиты особенно возрастает в связи с ростом мощностей электростанций, ростом напряжений электрических сетей, объединением энергетических сетей в единую.

Свойства релейной защиты:

– Селективность (избирательность) – свойство РЗ, характеризующее способность выявлять именно поврежденный элемент электроэнергетической системы и отключать этот элемент от исправной части электроэнергетической системы (ЭЭС). Защита может иметь абсолютную или относительную селективность.

– Быстродействие – свойство РЗ, характеризующее скорость выявления и отделения от электроэнергетической системы повреждённых элементов. Показателем быстродействия является время срабатывания защиты – это интервал времени от момента возникновения повреждения до момента отделения от сети повреждённого элемента.

– Чувствительность – свойство, характеризующее способность РЗ выявлять повреждения в конце установленной для неё зоны действия в минимальном режиме работы энергосистемы. Показателем чувствительности выступает коэффициент чувствительности, который для максимальных защит (реагирующих на возрастание контролируемой величины) определяется как отношение минимально возможного значения сигнала, соответствующего отслеживаемому повреждению, к установленному на защите параметру срабатывания (уставке).

– Надёжность – свойство, характеризующее РЗ действовать правильно и безотказно во всех режимах контролируемого объекта при всех видах повреждений и ненормальных режимов. Иными словами, надёжность – это свойство релейной защиты, характеризующее её способность выполнять свои функции в любых условиях эксплуатации. Основные показатели надёжности – время безотказной работы и интенсивность отказов (количество отказов за единицу времени).

Токовыми направленными защитами (ТНЗ) называются защиты с относительной селективностью, реагирующие на ток и направление (знак) мощности короткого замыкания (КЗ) в месте их включения.

Необходимость в применении направленных РЗ возникает в сетях с двухсторонним питанием и в кольцевых сетях с одним источником питания. При двухстороннем питании места КЗ для ликвидации повреждения РЗ должна устанавливаться с обеих сторон защищаемой ЛЭП.

Принципы выполнения селективной защиты в сетях с двусторонним питанием:

1. Защита должна устанавливаться с обеих сторон каждой линии и действовать при направлении мощности от шин в линию.

2. Выдержки времени на защитах, работающих при одном направлении мощности, должны согласовываться между собой по ступенчатому принципу, нарастая по направлению к источнику питания, от тока которого действуют направленные защиты:  $t_2 > t_4 > t_6 > t_8$ ;  $t_1 < t_3 < t_5 < t_7$ .

Направленная токовая защита при КЗ должна реагировать на значение тока и направление мощности в поврежденных фазах защищаемой ЛЭП.

Она включает в себя два основных элемента:

- два пусковых измерительных органа тока (ИОТ);
- два органа направления мощности (ОНМ).

Орган направления мощности включается, как правило, на фазный ток и междуфазное напряжение. Сочетание фаз тока и напряжения реле, называемое схемой включения, должно быть таким, чтобы реле правильно определяло знак мощности КЗ при всех возможных случаях и видах повреждений, и чтобы к ОНМ подводилась возможно большая мощность.

Требования к схемам включения:

1. ОНМ должно подключаться на такое напряжение, которое при близких КЗ не снижается до нуля;

2. Напряжение и ток, подводимые к ОНМ, должны подбираться так, чтобы угол сдвига между ними  $\varphi_p$  в условиях КЗ не достигал значений, при которых мощность на зажимах реле приближается к нулю.

Следует отметить, что первое требование выполнимо только при двух- и однофазных КЗ, в случае же трёхфазного КЗ все фазные и междуфазные напряжения могут снижаться до нуля.

ОНМ должен устанавливаться на тех защитах, у которых при направлении мощности КЗ к шинам нельзя обеспечить селективность посредством выдержки времени. Исключение органов направления мощности у ряда защит существенно экономит средства на организацию РЗ сети. Проектирование направленных защит в сетях следует начинать с вопроса необходимости использования органов направления мощности.

В современных схемах ТНЗ применяется включение органа направления мощности по так называемым  $90^\circ$  и иногда  $30^\circ$  схемам.

Токовые направленные отсечки (ТНО) применяются в сети с двусторонним питанием, когда обычная отсечка оказывается слишком грубой. Зона отсечки с применением реле направления мощности значительно увеличивается. Вследствие наличия мертвой зоны у реле направления мощности ТНО должна применяться только в тех случаях, когда обычная отсечка не удовлетворяет условию чувствительности.

Схема мгновенной ТНО отличается от схемы ТНЗ только отсутствием реле времени.

Как и обычные отсечки, ТНО выполняется как мгновенной, так и с выдержкой времени. Выдержки времени ТНЗ выбираются по условию селективности. В ряде случаев применяются трёхступенчатые ТНЗ, состоящие из мгновенной отсечки, отсечки с выдержкой времени и чувствительной МТЗ. Применение ступенчатой ТНЗ следует рекомендовать во всех случаях, когда она удовлетворяет требованиям чувствительности и быстродействия.

Мертвая зона является существенным недостатком всех защит, в состав которых входят органы направления мощности. Цифровые направленные защиты при отклонении частоты от номинального значения могут неправильно работать. Это определяется особенностями поведения ОНМ. Сбои в работе происходят в случаях:

- ОНМ находится на пределе срабатывания;
- при возникновении близких симметричных КЗ.

Чтобы отмеченные недостатки были устранены, при использовании для выполнения ОНМ ортогональных составляющих (ОС) тока и напряжения необходимо формировать их таким образом, чтобы угол между ОС был равен  $\pi/2$  независимо от изменений частоты.

Для обеспечения отключения КЗ в пределах мёртвой зоны лучше использовать ненаправленную токовую отсечку, если её зона действия перекрывает мёртвую зону направленной защиты. В РЗ на микропроцессорной базе наиболее распространённым методом устранения мёртвой зоны является работа ОНМ по «памяти». Эта работа может быть организована несколькими способами:

- путём запоминания состояния ОНМ в целом;
- путём запоминания отсчётов ОС напряжения с проверкой условия срабатывания ОНМ при изменяющемся токе.

При использовании первого способа после восстановления напряжения ОНМ выходит из режима работы по «памяти», и восстанавливается проверка его состояния.

Во втором случае при отклонении частоты от номинального значения ОНМ периодически изменяет своё состояние. Введение соответствующей коррекции немного

улучшает работу органа, но полностью устранить изменение состояния ОНМ не удаётся. Это является недостатком данного способа.

Однако опыт эксплуатации показывает, что в случае применения чувствительных реле отказ последних из-за мертвой зоны крайне редок вследствие малого значения длины мёртвой зоны.

Принцип действия направленной токовой защиты прост и надёжен и позволяет обеспечить селективную релейную защиту с двухсторонним питанием. Сочетание направленных отсечек с ТНЗ даёт возможность получить ступенчатую РЗ, во многих случаях обеспечивающую достаточную быстроту отключения КЗ и чувствительность.

К недостаткам следует отнести:

- большие выдержки времени, особенно вблизи источников питания;
- недостаточную чувствительность в сетях с большими нагрузками и небольшими относительно их кратностями тока КЗ;
- мёртвую зону при трёхфазных КЗ;
- возможность неправильного выбора направления при нарушении цепи напряжения, питающей РНМ.

Максимальная направленная РЗ широко применяется в качестве основной РЗ сетей напряжением до 35 кВ с двухсторонним питанием и в простых кольцевых сетях с одной точкой питания.

В сетях 110 и 220 кВ направленная токовая защита применяется в основном как резервная, а иногда, в сочетании с отсечкой, как основная, если она удовлетворяет требованиям по чувствительности и быстродействию.

#### Литература

1. Басс, Э.И. Релейная защита электроэнергетических систем / Э.И. Басс, В.Г. Дорогунцев / Под ред. А.Ф. Дьякова. – М. : Издательский дом МЭИ, 2006. – 296 с.
2. Чернобровов, Н.В. Релейная защита энергетических систем: учеб. пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов, В.А. Семёнов. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 800 с.
3. Гурьянчик, О.А. Организация функционирования органа направления мощности в микропроцессорных токовых направленных защитах / О.А. Гурьянчик // Наука и техника: международный научно-технич. журнал. – 2013. – № 3. – С. 56–58.
4. Федосеев, А.М. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб. для вузов / А.М. Федосеев, М.А. Федосеев. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.

УДК 620.9

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ГИБКИХ ПРОВОДОВ АНКЕРНЫХ ПРОЛЕТОВ ОТКРЫТЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 330 КВ С ОТПАЙКОЙ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ АППАРАТАМ

Зарихта К.С., Баран А.Г.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.

С возрастанием токов короткого замыкания (КЗ) их электродинамическое действие становится ключевым фактором, определяющим габариты и механические характеристики токоведущих конструкций с гибкими проводами при проектировании. Анализ и обобщение результатов экспериментальных исследований позволяет составить подробную картину поведения гибких проводов при КЗ. Минимальное расстояние между проводниками соседних фаз в процессе сближения, очевидно, будет зависеть от максимального горизонтального отклонения обоих проводников.

Выполним исследование электродинамической стойкости анкерного пролета наибольшей длины типовой конструкции открытого распределительного устройства (ОРУ) 330 кВ при наличии отпайки к аппаратам (рисунок 1).

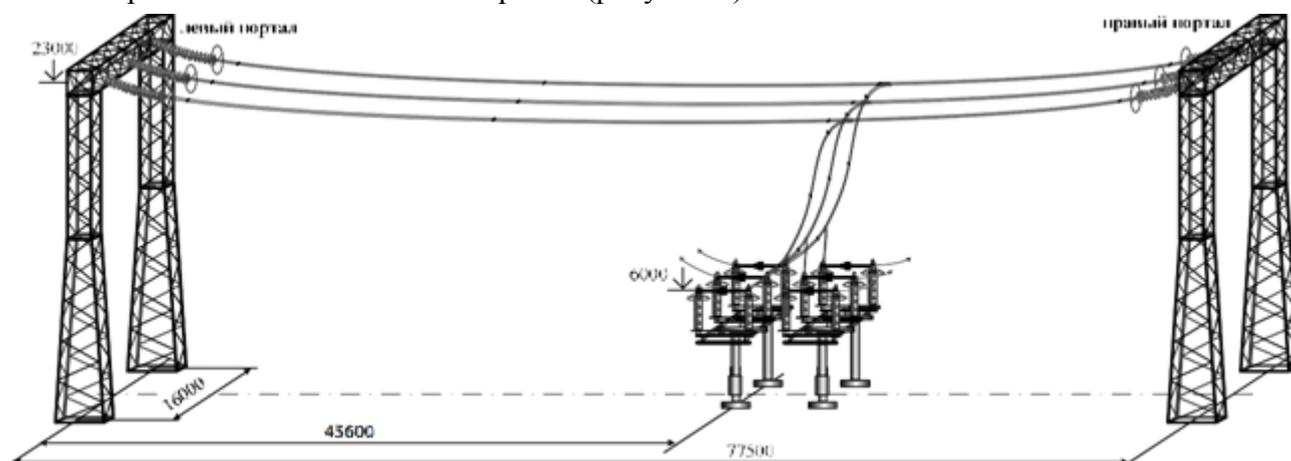


Рисунок 1. Пролет ячейки типового ОРУ 330 кВ длиной 77,5 м с одной отпайкой

Наибольшие сближения проводников соседних фаз в пролетах с отпайками наблюдаются при двухфазных коротких замыканиях, что объясняется тем, что при трехфазном коротком замыкании средняя фаза получает значительно меньший импульс электродинамических усилий (ЭДУ), чем крайние фазы, и движется преимущественно в вертикальном направлении. При двухфазном коротком замыкании фазы, участвующие в процессе, получают близкие по величине импульсы и движутся практически с одинаковой скоростью как при отталкивании, так и при сближении.

При выборе расчетных климатических режимов следует ориентироваться на сочетание климатических условий, предложенные ПУЭ для расчета воздушных линий и ОРУ.

Вычислительный эксперимент по определению токов электродинамической стойкости пролетов производим с помощью, разработанной на кафедре «Электрические станции» БНТУ компьютерной программы FleBus.

Выполним исследования для продолжительностей КЗ от 0,1 до 0,5 с при постоянной времени КЗ – 0,1 с. Рассматриваем случаи с 2 проводами в фазе. Марка проводов – АС, сечения – 240/39, 300/39, 300/48, 400/51, 500/64. Гирлянда изоляторов – 22 штуки ПС6-А. Начальная стрела провеса – 2,7 м, междуфазное расстояние – 6 м. Климатические условия: температура +25 °С, ветер и гололед отсутствуют. Отпайки между проводами в фазе расположены через каждый 7,75 метра.

На рисунках 2–6 представим зависимости сближения шин в зависимости от величины тока КЗ при различных продолжительностях его воздействия.

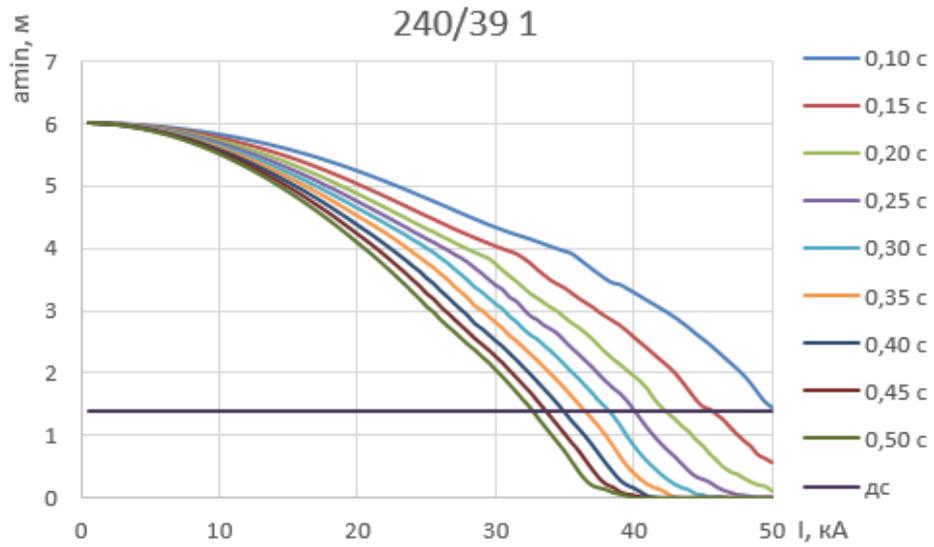


Рисунок 2. Сближение проводов АС-240/39 для пролета длиной 77,5 м (рисунок 1)

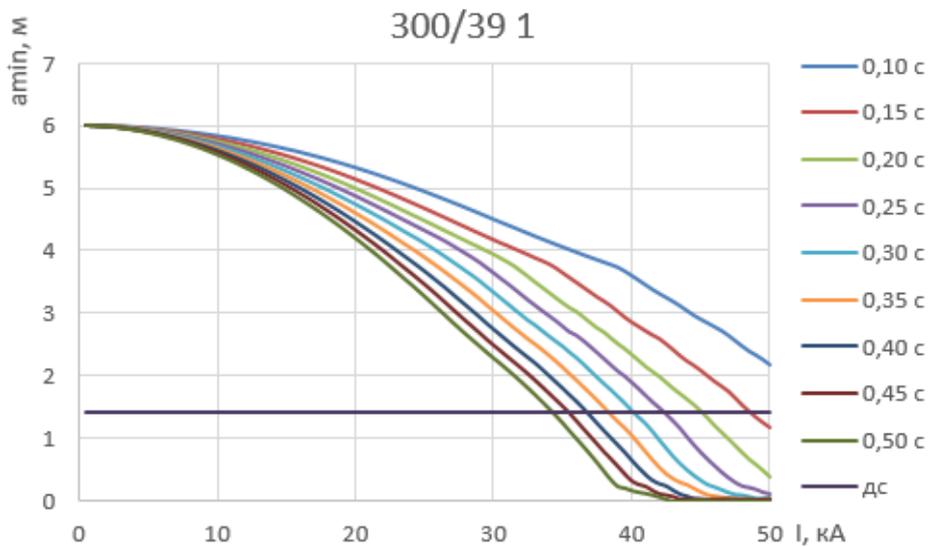


Рисунок 3. Сближение проводов АС-300/39 для пролета длиной 77,5 м (рисунок 1)

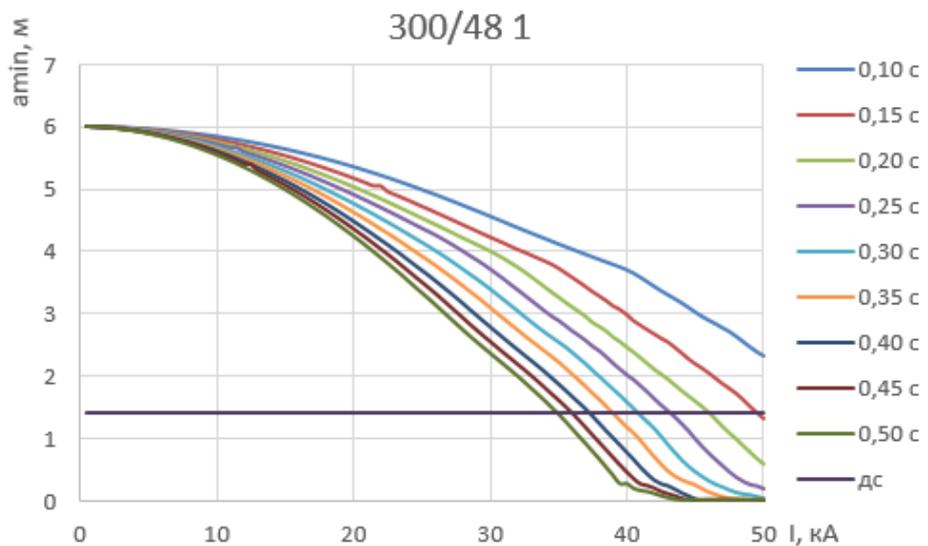


Рисунок 4. Сближение проводов АС-300/48 для пролета длиной 77,5 м (рисунок 1)

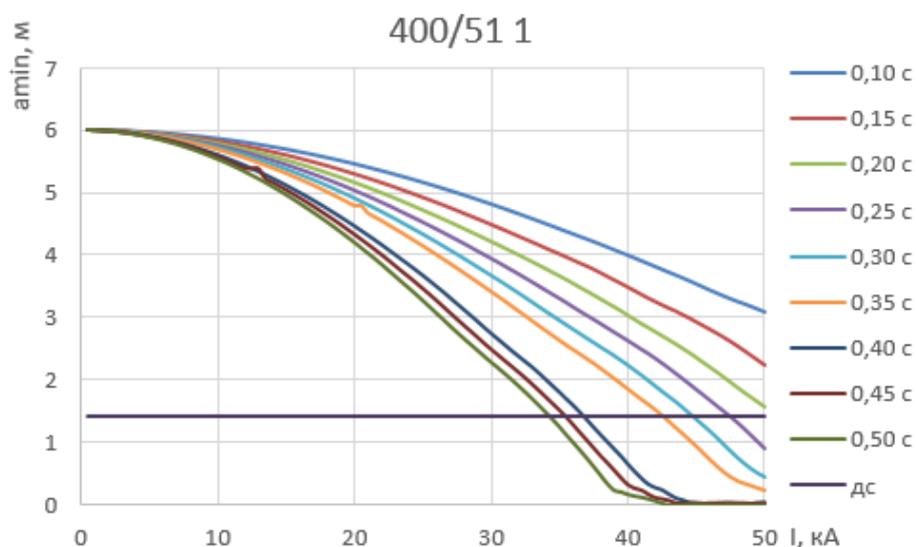


Рисунок 5. Сближение проводов АС-400/51 для пролета длиной 77,5 м (рисунок 1)

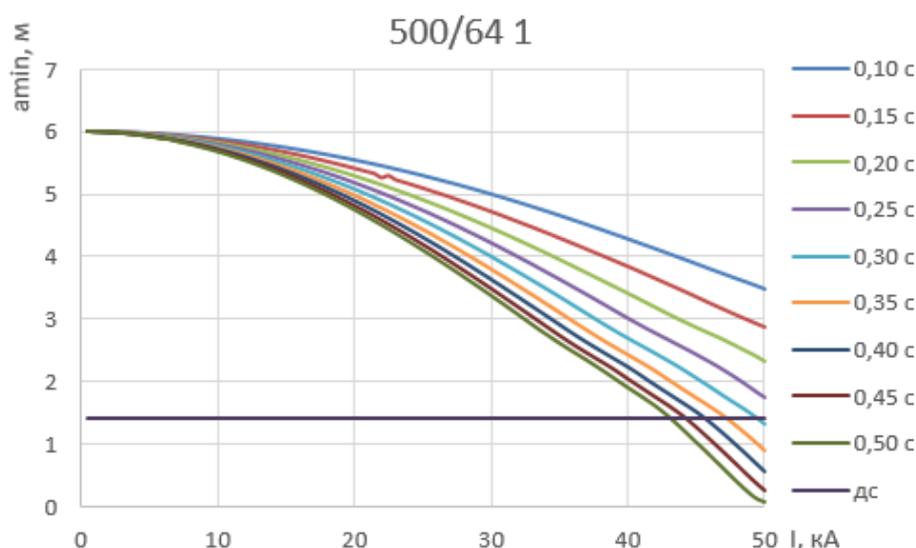


Рисунок 6. Сближение проводов АС-500/64 для пролета длиной 77,5 м (рисунок 1)

В некоторых конструкциях ячейкового пролета существует опасность сближения спусков соседних фаз, так как они находятся непосредственно под шинами в одной плоскости. В месте крепления к шине спуск повторяет ее движение. После прохождения точки наибольшего сближения шины начинают удаляться друг от друга, при этом соседние спуски некоторое время продолжают сближаться по инерции за счет изгиба. Сближение спусков, таким образом, может оказаться большим, чем сближение шин.

Приведем зависимость сближения спусков шин от величины тока КЗ при различных продолжительностях его воздействия (рисунок 7).

На графиках можно отследить допустимую величину тока КЗ при определенной продолжительности его воздействия. Напомним, что для нашего случая минимально допустимое междуфазное расстояние равно 1,4 метра. Так, для провода пролета сечением 240/39 при продолжительности КЗ 0,5 с, допустимая величина тока КЗ составляет 32,5 кА. Однако, для спусков этого пролета величина тока КЗ равна 27,5 кА.

Токи электродинамической стойкости гибкой ошиновки  $I_{\text{дин}}$  возрастают с увеличением сечения проводника. Это объясняется большей инерционностью тяжелых проводников. Однако это увеличение не столь значительно, поэтому выбор проводника большего сечения во вновь сооружаемых РУ приведет к росту затрат и не даст желаемого эффекта в

долгосрочном периоде с учетом вероятно роста токов КЗ. В существующих РУ такое решение вообще неприемлемо из экономических и технических соображений. Одним из мероприятий, ограничивающих размах колебаний, может стать уменьшение стрелы провеса. Однако это приводит к дополнительным нагрузкам на опорные и изоляционные конструкции. Наиболее действенным решением, не требующим больших материальных и временных затрат, является установка междупазных распорок. Их можно применять как во вновь сооружаемых, так и в существующих РУ.

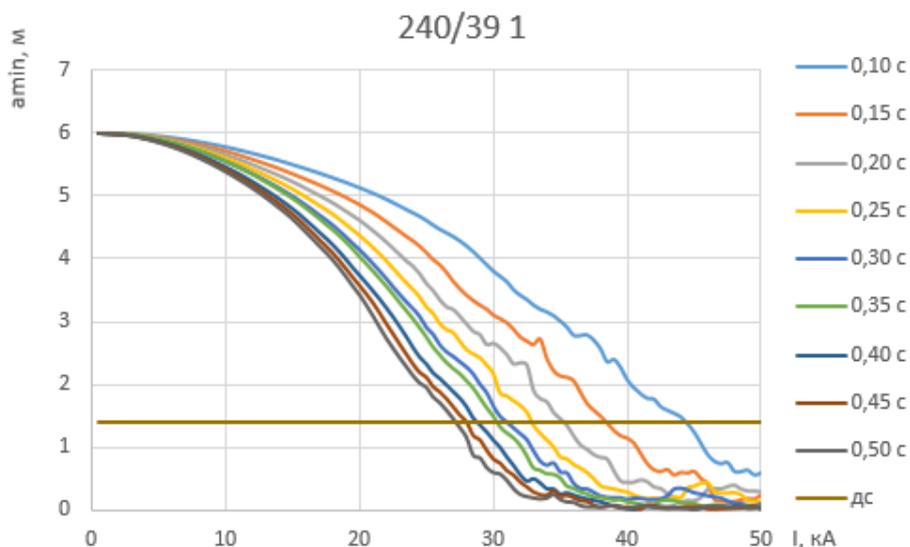


Рисунок 7. Сближение ошиновки спусков для пролета длиной 77,5 м (рисунок 1) с проводом АС-240/39

#### Литература

1. Васильев, А.А. Электрическая часть станции и подстанций / А.А. Васильев. – М. : Энергия, 1980. – 608 с.
2. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б.Н. Неклепаев. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
3. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
4. Сергей, И.И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент / И.И. Сергей, М.И. Стрелюк. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.

УДК 621.3

## **ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЗАМКНУТЫХ ЦИКЛОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

Рабушко П.С., Чуприков Т.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.

Внедрение новых технологий в современные энергосистемы является абсолютной необходимостью, начиная с управляемых силовых электронных устройств в сетях переменного и постоянного тока, а также использование других элементов FACTS. Все вышеперечисленное, как правило, способствует повышению устойчивости системы, однако без их надежного функционирования энергосистема, может стать неустойчивой.

Все эти изменения в первичных энергосистемах требуют нового, более комплексного подхода к соответствующим вторичным системам. Это касается систем релейной защиты, автоматики и управления энергосистемами в обычных и аварийных режимах работы. Требования к их надежности несрабатывания и надежности срабатывания становятся все более строгими, время срабатывания (отклика) должно быть меньше, а обнаружение аварийных режимов должно осуществляться гораздо более оперативно, чем когда-либо ранее.

Цифровое моделирование замкнутого цикла в реальном времени является самым надежным методом наиболее оперативной разработки и тестирования для реализации новых технологий в современных энергосистемах.

В работе рассмотрены основные требования и характеристики современных методов цифрового моделирования, традиционно используемых для тестирования и разработки различных устройств релейной защиты, систем управления генераторами, классических компонентов силовой электроники, а также цифровое моделирование современных преобразователей напряжения и многомодульных преобразователей и их разработка. Внедрение новых технологий в современные энергосистемы – чрезвычайно ответственный шаг, оказывающий влияние не только на техническую сферу, но и на социально-экономические отношения в человеческом обществе. Для этого необходимы чрезвычайно высокое качество инструментальных средств, используемых для тестирования и разработки, включая CLRTDS. Хорошо известно, что качество конкретного моделирования никогда не будет выше качества менее точной модели элемента энергосистемы, используемой в пределах всей смоделированной сети. В связи с этим, очень важно выбирать правильный инструментарий, с положительными отзывами, полученными по результатам надежной эксплуатации большого числа установок по всему миру.

Можно ожидать, что с развитием цифровых компьютерных технологий будут развиваться и цифровые модели энергосистем в реальном времени, а моделируемые системы будут увеличиваться в объемах.

УДК 621.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА ПРИ РАБОТЕ НА АКТИВНУЮ НАГРУЗКУ В СИСТЕМЕ МАТЛАВ

Ходорик В.С., Русецкий К.И.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.

При выполнении индивидуального задания дипломного проекта стояла задача исследования режима возбуждения синхронного генератора проектируемой станции при работе на активную нагрузку. На рисунке 1 показана структурная модель, в которой синхронная машина работает совместно с системой возбуждения.

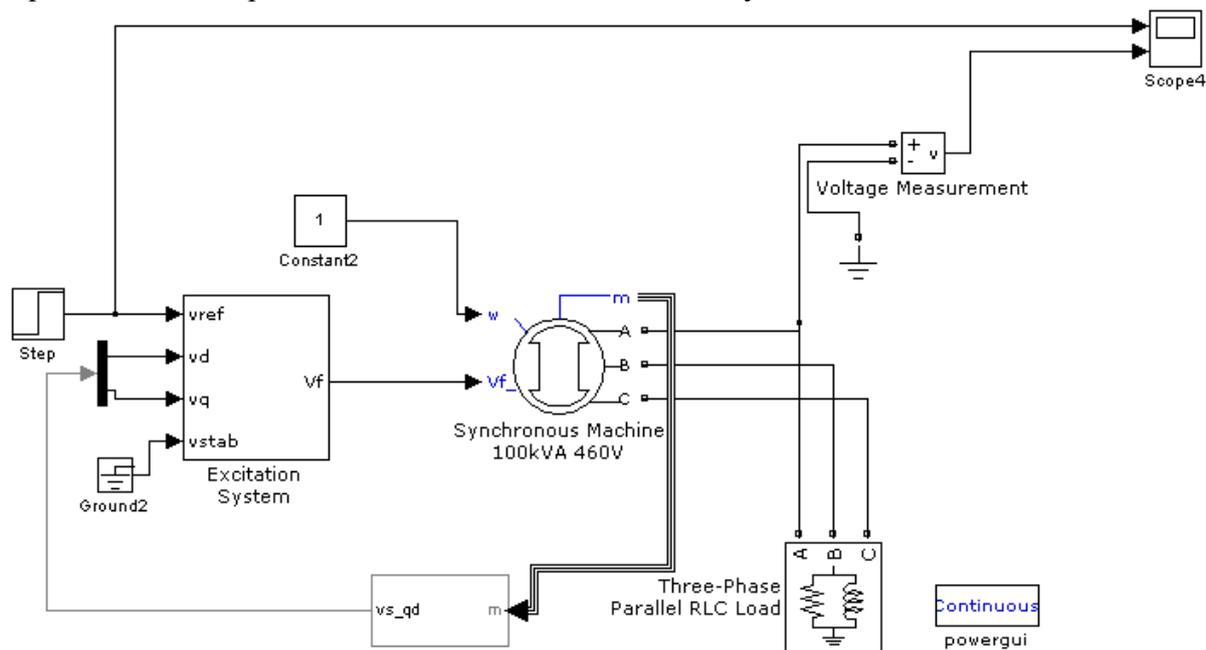


Рисунок 1. Структурная модель генератора при регулировании возбуждения

Блок Excitation System является моделью системы возбуждения для синхронной машины. Позволяет регулировать напряжение на зажимах машины, работающей в генераторном режиме.

Приведем параметры блока Excitation System (рисунок 2):

Low-pass filter time constant  $T_r$  (s):

Постоянная времени фильтра нижних частот  $T_r$  (с).

Regulator gain and time constant [ $K_a$  ()  $T_a$  (s)]:

Коэффициент усиления  $K_a$  и постоянная времени  $T_a$  регулятора.

Exciter [ $K_e$  ()  $T_e$  (s)]:

Коэффициент усиления  $K_e$  и постоянная времени  $T_e$  модели возбудителя.

Transient gain reduction [ $T_b$  (s)  $T_c$  (s)]:

Постоянные времени  $T_b$  и  $T_c$  стабилизатора.

Damping filter gain and time constant [ $K_f$  ()  $T_f$  (s)]:

Коэффициент усиления  $K_f$  постоянная времени  $T_f$  реального дифференцирующего звена. Параметры блока, вычисляющего производную напряжения возбуждения, используемую для осуществления обратной связи.

Regulator output limits and gain [ $E_{fmin}$ ,  $E_{fmax}$  (p.u.),  $K_p$  ()]:

Минимальное  $E_{fmin}$  и максимальное  $E_{fmax}$  значения выходного напряжения регулятора в о.е. и его коэффициент усиления  $K_p$ . Верхний предел может быть постоянным и равным  $E_{fmax}$  или переменным и равным значению выпрямленного напряжения на зажимах генератора  $V_{tf}$ , умноженному на коэффициент усиления  $K_p$ . Если коэффициент усиления задан равным нулю, то используется второй вариант.

Initial values of terminal voltage and field voltage [Vt0 (pu) Vf0 (pu)]:

Начальное напряжение на зажимах генератора Vt и начальное значение напряжения возбуждения Vf.

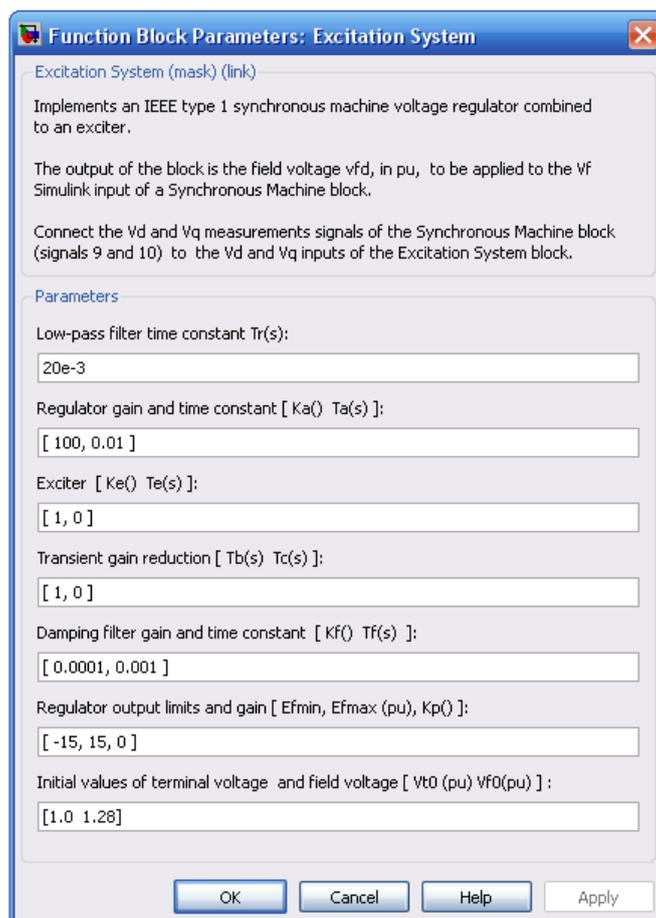


Рисунок 2. Окно задания параметров блока Excitation System

Приведем параметры блока Synchronous Machine (рисунок 3) – блок модели синхронного генератора:

Nominal power, line-to-line voltage and frequency [Pn(VA) Vn(Vrmd) fn(Hz)]:

Номинальная полная мощность Pn(ВА), действующее линейное напряжение Vn(В), частота Fn(Гц).

Stator [Rs LI Lmd Lmq] (pu):

Параметры статора: активное сопротивление Rs (Ом), индуктивность рассеяния LI (Гн), индуктивность по продольной оси Lmd (Гн), индуктивность по поперечной оси Lmq (Гн).

Field [Rf Lfd] (pu):

Приведенные параметры обмотки возбуждения ротора: сопротивление Rf (Ом), и индуктивность Lfd(Гн).

Dampers [Rkd Lkd Rkq1 Lkq1] (pu):

Приведенные параметры демпферной обмотки: сопротивление (Ом) и индуктивность (Гн) по продольной и поперечным осям.

Pole pairs p():

Число пар полюсов p.

Init. cond. [dw(%) th(deg) ia,ib,ic(pu) pha,phb,phc(deg) Vf(pu)]:

Начальные условия. Параметр задается в виде вектора, каждый элемент которого имеет следующие значения:

dw (%) – отклонение угловой частоты вращения (%):

th (deg) – угловое положение ротора (град.):

ia,ib,ic – начальные значения токов статора (А):

$\phi_{a}, \phi_{b}, \phi_{c}$  – начальные фазы токов статора (град.):  
 $V_f$  – напряжение обмотки возбуждения (В).

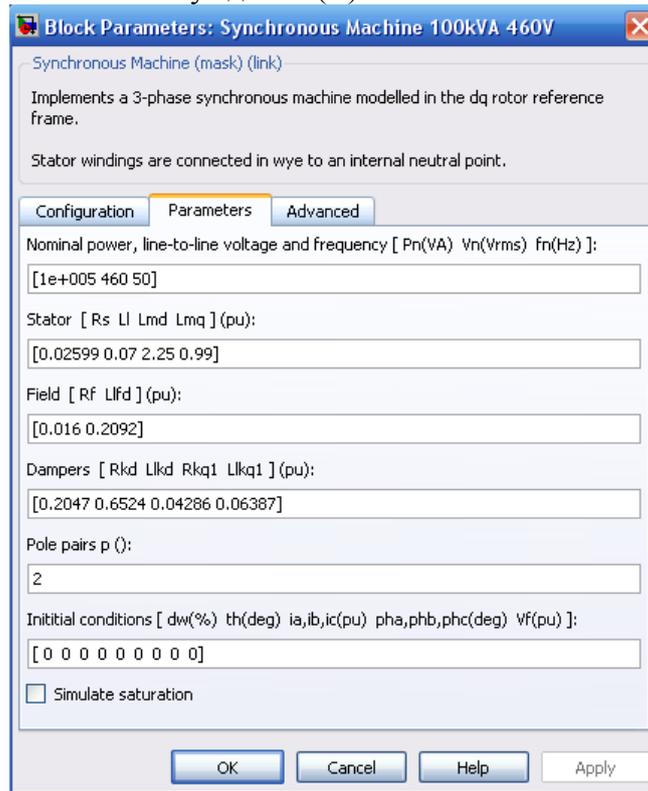


Рисунок 3. Окно задания параметров блока Synchronous Machine

Представленные на рисунке 4 результаты моделирования показывают, как синхронная машина обрабатывает изменение задания. В момент времени 0.2 с происходит скачкообразное изменение задания на выходное напряжение генератора.

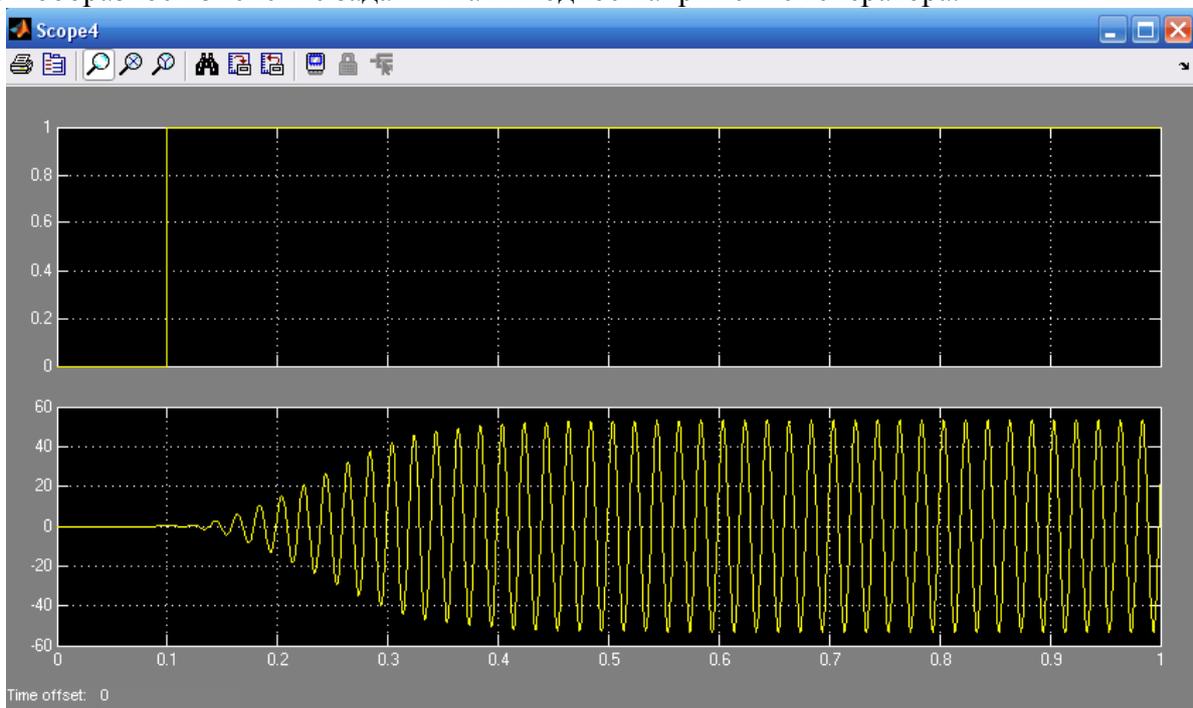


Рисунок 4. Осциллограммы структурной модели

#### Литература

1. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

УДК 621.3

## СОБСТВЕННЫЕ НУЖДЫ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Карпушонок К.А., Башаркевич Я.В.

Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

Все механизмы собственных нужд приводятся в движение электродвигателями короткозамкнутого типа непосредственного включения. В котельных отделениях, как правило, применены электродвигатели полностью закрытого исполнения, в машинных залах – продуваемые, защищенные от капежа; электродвигатели для привода питательных насосов выполнены с замкнутой системой охлаждения.

Для привода механизмов собственных нужд используют главным образом асинхронные короткозамкнутые двигатели переменного тока. Реже применяют двигатели с фазным ротором и синхронные двигатели, в отдельных случаях двигатели постоянного тока.

При близком КЗ напряжение на выводах двигателей оказывается меньше их ЭДС. Электродвигатели переходят в режим генератора, посылающего ток в место повреждения. Синхронные электродвигатели при их наличии также подпитывают место КЗ. Привод всех механизмов собственных нужд осуществляется электродвигателями; на электростанции нет ни одного парового привода для вспомогательного оборудования.

Для привода механизмов собственных нужд применяют главным образом электродвигатели, так как по сравнению с двигателями других типов они более надежны, экономичнее, дешевле, компактнее, отличаются простотой пуска, установки и ремонта. При электрическом приводе значительно упрощается автоматизация технологического процесса станции. На паротурбинных электростанциях для некоторых механизмов собственных нужд применяют и паровые приводы. Так, например, на электростанциях с крупными на высокие параметры пара для рабочих питательных насосов применяют мощные быстроходные паровые турбины; на некоторых паротурбинных электростанциях паровыми турбинками снабжают резервные питательные насосы, чем обеспечивают питание котлов при полном исчезновении напряжения в сети собственных нужд станции.

При выборе электродвигателей механизмов собственных нужд следует учитывать характер помещений, где они устанавливаются. Электродвигатели котельной и топливоподачи, а также электродвигатели, устанавливаемые на открытом воздухе, выбираются закрытого типа с внутренней вентиляцией или наружным обдувом. Электродвигатели машинного отделения, водоприготовления и остальных чистых помещений тепловых электростанций, а также электродвигатели для гидростанций выбираются каплезащищенного типа.

Вследствие снижения производительности механизмов собственных нужд резко уменьшается располагаемая мощность тепловых электростанций, особенно станций высокого давления, что влечет за собой дальнейшее снижение частоты в энергосистеме. Таким образом происходит лавинообразный процесс, способствующий развалу энергосистемы.

Для обеспечения надежности питания механизмов собственных нужд предусмотрена резервная линия, которая выключателями с помощью устройства автоматического включения резерва (АВР) может подключаться к любой из секций собственных нужд. Токоприемники, подключаемые на напряжение 380/220 В, питаются через трансформаторы и могут подключаться также через резервный трансформатор и соответствующие автоматы на любую секцию шин напряжением 380/220 В. Электродвигатели напряжением 6 кВ присоединяют к сборным шинам распределительного устройства через масляные выключатели.

Практикой эксплуатации установлено, что механизмы собственных нужд надежно разворачиваются при самозапуске, если напряжение сети составляет 50–60 % от номинального.

По назначению и характеру работы механизмы собственных нужд разделяются на ответственные и неответственные.

Задаче обеспечения бесперебойной работы электроприемников механизмов собственных нужд служат следующие мероприятия: секционирование электрической схемы. Правильный выбор типа привода для механизмов собственных нужд имеет большое значение для надежности работы станции и для снижения расхода энергии на собственные нужды станции. Основными требованиями при выборе привода механизмов собственных нужд является обеспечение: разворота механизма до полной скорости вращения и работа его с полной производительностью; регулирования скорости вращения и производительности механизма; надежности и удобства в эксплуатации и экономичности в работе; соответствия формы и типа исполнения двигателя условиям и температуре окружающей среды; самозапуска ответственных механизмов при восстановлении напряжения после кратковременного отключения.

Схема питания электроэнергией механизмов собственных нужд реактора с расширенным воспроизводством ядерного горючего должна удовлетворять требования в отношении пуска реактора, его нормальной эксплуатации и нормальной и аварийной остановки. Кроме этого, на электрических станциях всех типов предусматриваются независимые от энергосистемы источники энергии, обеспечивающие остановку и расхолаживание станции без повреждений оборудования и вредного влияния на окружающую среду при потере основных и резервных источников собственных нужд. На гидростанциях и обычных тепловых станциях для этой цели достаточно аккумуляторных батарей. На мощных блочных КЭС может дополнительно потребоваться установка дизель-генераторов небольшой мощности (200–500 кВт), обеспечивающих длительное сохранение остановленного оборудования в состоянии готовности к немедленному пуску после восстановления питания от энергосистемы. На АЭС мощность независимых аварийных источников питания собственных нужд значительно больше. Она зависит от принятых систем обеспечения безопасности и может составить до 1,5 % мощности реакторного блока.

Все перечисленные виды оборудования электростанции, необходимого для ее надежной и экономичной работы, механизмы собственных нужд с приводными электродвигателями или паровыми турбинами, приемники электроэнергии других видов, понижающие трансформаторы, распределительные устройства, электрические сети, независимые источники энергии и соответствующие системы управления образуют систему собственных нужд электрической станции.

УДК 621.3

## РЕТРОФИТ ЯЧЕЕК КРУ И КСО

Максименко С.Ю.

Научный руководитель – Климкович П.И.

Известно, что ретрофит устаревших морально и физически распределительных устройств 6 (10) кВ со сроком эксплуатации 25 и более лет часто является наиболее оптимальным и экономичным решением. Оптимальность связана с возможностью поэтапной замены оборудования без полного отключения питания и остановки производства, а экономичность определяется снижением стоимости модернизации за счёт использования существующих металлических конструкций, отсутствием необходимости в сооружении капитальных строений и прочих строительных работах.

Однако при выполнении ретрофит имеются и сложности, которые главным образом связаны с необходимостью внедрения нового оборудования в действующую систему электроснабжения, адаптации и привязки новых устройств к существующим. То есть возникает необходимость решения всех тех проблем, которых нет при установке нового распределительного устройства высокой заводской готовности. При этом следует учитывать, что при замене и улучшении существующих элементов должна быть обеспечена конечная цель – качество, чтобы модернизированная система работала «как новая» и все элементы эффективно взаимодействовали между собой.

В процессе общего старения электрических сетей постоянно возрастает актуальность их модернизации. Ретрофит является её оптимальным способом, особенно в условиях действующих предприятий, где остановка производства связана с большими потерями. О востребованности ретрофита свидетельствуют многочисленные предложения производителей комплектов адаптации, позволяющих максимально упростить процесс модернизации для КРУ (КСО) конкретного вида. Вместе с тем, несмотря на широкий спектр предлагаемых решений, ряд вопросов остаётся «за скобками». В частности, это интеграция модернизируемой ячейки в общую структуру распределительного устройства, актуальность которой связана со следующим:

- модернизация даже одной ячейки требует решения вопросов её питания, взаимодействия с существующим оборудованием;
- модернизация ряда ячеек требует решения ещё большего числа вопросов;
- организации взаимодействия ячеек между собой (блокировки, сигнализация и т. п.);
- организации оперативного питания (подключать к существующему питанию, организовывать новое;
- возможность расширения функциональности распределительного устройства в целом;
- организация системы телемеханик, установка шкафа телемеханики, организация каналов связи, создание и настройка автоматизированного рабочего места диспетчера либо интеграция в существующую систему;
- внедрение дополнительных видов защит.

Эксплуатационный персонал предприятия, как правило, имеет дело с оборудованием конкретного типа, а большая загрузка текущей работой по его обслуживанию и ремонту не позволяет энергетикам в полной мере изучить предлагаемые на рынке решения по модернизации. В результате им достаточно сложно составить подробное техническое задание на проектирование.

В свою очередь проектные организации, не имея чёткого задания, закладывают в проекты типовые решения производителей оборудования, которые, разумеется, не могут учесть специфику и особенности конкретного предприятия, необходимую и достаточную полноту и глубину модернизации, другие особенности. В такой ситуации весьма важно провести предпроектное обследование электрохозяйства и определить ключевые задачи, которые должны быть решены при модернизации. Так как время до следующей модернизации может составлять три десятка лет, есть резон подойти к этому вопросу ответственно.

УДК 621.3

## ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Баран Ю.Г.

Научный руководитель – Романович С.М.

Геоинформационные системы являются классом информационных систем, имеющим свои особенности. Они построены с учетом закономерностей геоинформатики и методов, применяемых в этой науке. Геоинформационные системы как интегрированные информационные системы предназначены для решения различных задач науки и производства на основе использования пространственно – локализованных данных об объектах.

Геоинформационная система – это организованный набор аппаратуры, программного обеспечения, персонала и географических данных, предназначенных для эффективного ввода, хранения, обновления, обработки, анализа и визуализации данных, всех видов географически организованной информации. Геоинформационные системы – многофункциональные средства анализа сведенных воедино табличных, текстовых и картографических данных, демографической, статистической, земельной, муниципальной, адресной и другой информации. Другими словами, Геоинформационная система – это система, способная хранить и использовать данные о пространственно-организационных объектах.

Геоинформационные системы получает все большее распространение не только в традиционных областях применения, таких как управление природными ресурсами, сельское хозяйство, экология, кадастры, городское планирование, но также и в коммерческих структурах – от энергетики и телекоммуникаций до розничной торговли. В качестве систем поддержки принятия решений геоинформационные системы помогают вести анализ и дает заметные преимущества в своей деятельности. Геоинформационные системы являются эффективным инструментом для выбора мест и определения производственных объектов, диспетчеризации и маршрутизации.

Отраслевое использование ГИС-технологий. Возможности ГИС-технологий могут быть задействованы в самых различных областях деятельности. Вот лишь некоторые примеры использования ГИС-технологий:

- административно-территориальное управление телекоммуникации инженерные коммуникации;
- проектирование инженерных сетей;
- мониторинг состояния инженерных сетей и предотвращение аварийных ситуаций;
- транспорт, нефтегазовый комплекс, силовые ведомства, экология, лесное хозяйство, сельское хозяйство.

Применение технологии геоинформационных систем (ГИС) в энергетике имеет долгую успешную историю, большой потенциал и богатые перспективы

Энергетическая отрасль предоставляет благоприятное поле для широкомасштабного использования уникальных возможностей геоинформационных систем. Ведь большинство аспектов этого многогранного технологического процесса имеет значимую пространственную составляющую и привязку к определенной территории или конкретному местоположению. Связанные с географическим положением данные пронизывают все стадии процесса: от полевых разведочных работ, создания и развертывания инфраструктуры, генерации, транспортировки (передачи) и сбыта. Это в полной мере относится и к таким направлениям деятельности энергетических компаний как сбыт и диспетчеризация (логистика), соблюдение экологических требований, вопросы обеспечения безопасности и реагирования на чрезвычайные ситуации, энергосбережения и увеличения энергоэффективности ТЭК.

Составляющие энергетической отрасли газ, нефть, электроэнергетика, торфяная промышленность и атомная энергетика – вместе известные как базовые. Все предприятия и

организации в этой сфере осознают и активно применяют преимущества географического подхода и пространственного анализа, предоставляемые технологией геоинформационных систем. ГИС, как универсальная интеграционная платформа, может помочь повысить эффективность производственного процесса за счет полноценного управления практически всеми видами данных.

Полноценное и разностороннее управление данными (информационная поддержка, моделирование и анализ) на основе ГИС, особенно когда оно реализуется на корпоративном уровне, исключает излишнее дублирование наборов данных, обеспечивает непрерывность и последовательность реализации всех фаз проекта, создает общую структуру для плодотворного взаимодействия между всеми подразделениями компании и с ее партнерами. В последнее время все большее внимание обращается на возобновляемые источники энергии, многие исследования и проектные решения в этой области также опираются на геоданные и аналитические возможности ГИС.

Выделим некоторые моменты, отражающие важность применения ГИС в энергетике.

**Эффективное использование данных.** Энергетические предприятия ведут свою деятельность на обширных территориях или даже на глобальном уровне. Эти компании должны управлять большими объемами данных с пространственными компонентами. Эта информация представляет сведения о земле, объектах инженерной структуры, землевладение и лицензирование, а также данные, связанные с геологией, гидрологией и другими физическими характеристиками ландшафта, – это очевидные примеры и варианты для их включения в состав ГИС. Через задействование ГИС часто начинается рассмотрение вопросов в проектировании, эксплуатации, локализации и ликвидации аварий в электросетях. Данные по электрическим сетям могут помочь в работе многих служб и отделов внутри предприятия в случае, когда они организованы, управляются и отображаются с позиций их пространственного размещения.

**Интегрирование баз данных.** ГИС может служить в качестве незаменимого инструмента для энергетических компаний, которым жизненно важна консолидация и координация данных и информации из многих источников, например, при поиске перспективных мест для развития своей деятельности. В последнее время для реализации этой функциональности создаются корпоративные ГИС-порталы, объединяющие информационные ресурсы предприятия.

**Оптимизация операционной деятельности.** Приложения с возможностями ГИС помогают инженерам-эксплуатационникам быстро рассмотреть модельные варианты эксплуатации и в комплексе проанализировать данные по электрическим сетям.

**Оптимизация операций по эксплуатации электрических сетей** должно быть интегрировано в ГИС с геосъемкой в реальном времени и технологией глобального позиционирования (GPS/ГЛОНАСС). Для проведения оперативной геосъемки используются переносные компьютеры или ГИС приемники, что позволяет выполнять измерения с проверкой точности непосредственно на месте проведения работ. А данные съемки могут быть загружены напрямую в центральную базу геоданных, что обеспечит оперативную картину рабочей обстановки.

**Управление пространственной инфраструктурой и инженерными сетями.** Помимо ее использования в процессах эксплуатации технология ГИС является мощным инструментом для поддержки управления всеми типами объектов и общей распределенной в пространстве инфраструктурой компаний энергетической отрасли. Вся информация хранится в базах геоданных и отображается в 2D (или 3D) пространственных представлениях и во временной динамике.

**Транспортировка и сбыт** также являются важными областями, которые получают преимущества от применения ГИС. Например, для эффективной поставки газа и электроэнергии потребителям компании постоянно работают в направлении упрощения и рационализации рабочих процессов, снижения операционных затрат, улучшения

обслуживания клиентов и взаимодействия с ними. Предоставляемые ГИС возможности далеко выходят за рамки простого картирования электросетей и другого оборудования.

Имеется положительный опыт применения ГИС для оценки надежности и контроля состояния систем передачи электроэнергии, отслеживания потерь, планирования мер по ликвидации разномасштабных аварий, оперативному реагированию на них и сглаживанию последствий, выявлению потерь за счет незаконного отъема энергоресурсов, пиратства и дефектной измерительной аппаратуры, общей оценки рисков. В перспективе основанные на ГИС программные модули будут задействованы в контроле энергоснабжения и быстро реагировать на перебои в обслуживании потребителей и их своевременном предупреждении. Данные программные модули смогут обеспечивать сбор данных от системы датчиков интеллектуальных электрических сетей (Smart Grids), определяют местоположение отключения или утечки, помогают точнее выявить его причину, направить на место происшествия специалистов, отслеживать статус проводимых работ по обслуживанию или ремонту. А создание разнообразных сценариев с использованием ГИС позволит предприятиям выбирать наилучшие решения с учетом множества воздействующих факторов.

Общая оптимизация ведения бизнеса. Подводя итог, можно отметить, что комплексное управление распределенной инфраструктурой на основе паспортизации и учета всех активов, в том числе и оборудования, с помощью ГИС, помогает энергетическим компаниям и службам повысить надежность и экономическую эффективность их деятельности, и степень удовлетворенности клиентов. Предоставляемые ГИС инструменты и решения могут стать фундаментальной частью общей системной архитектуры управления информацией для нужд энергетических компаний.

#### Литература

1. Журкин, И.Г. Геоинформационные системы / И.Г. Журкин, С.В. Шайтура. – М. : КУДИЦ-ПРЕСС, 2009.
2. Самардак, А.С. Геоинформационные системы : учеб. пособие / А.С. Самардак. – Владивосток : ТИДОТ ДВГУ, 2005.
3. Турлапов, В.Е. Геоинформационные системы в экономике : учебно-методическое пособие / В.Е. Турлапов. – Нижний Новгород : НФ ГУ-ВШЭ, 2007.

УДК 621.3

## **ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕРМИНАЛОВ СЕРИИ «БРЕСЛЕР-0107»**

Волчецкий П.Д.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Булойчик Е.В.

Устройства серии «Бреслер-0107» предназначены для выполнения функций релейной защиты и автоматики (РЗА), измерения, регистрации, осциллографирования, сигнализации и управления для различных присоединений распределительных сетей номинальным напряжением 6–35 кВ.

Устройства предназначены для применения в схемах вторичной коммутации электрических станций, подстанций и распределительных устройств с переменным, выпрямленным или постоянным оперативным током.

Терминалы серии «Бреслер-0107.2» предназначены для установки в отсеках комплектное распределительное устройство (КРУ), комплектные трансформаторные подстанции собственных нужд (КТП СН) любого производителя, а также на панелях и шкафах, расположенных в релейных залах и пультах управления электростанций и подстанций.

Реализованные в устройстве алгоритмы функций защиты и автоматики разработаны согласно требованиям к существующим системам РЗА. Свободно-программируемая логика устройств позволяет в короткие сроки разработать устройства защиты и автоматики для замены традиционного электромеханического оборудования, а также специфические изделия по известным или нетиповым алгоритмам.

Все уставочные параметры терминала отображаются в виде древовидной структуры («дерева уставок»). Вид дерева уставок определяется конкретным исполнением защиты и в дальнейшем может быть изменен пользователем в соответствии со своими предпочтениями. Редактирование значений уставочных параметров выбранного узла дерева уставок осуществляется в таблицах, расположенных в правой части формы файла уставок, при этом все измененные уставочные параметры выделяются красным цветом.

Таблицы редактирования имеют встроенные средства поиска как в целом по таблице, так и по выбранной колонке. Также присутствует возможность установки «фильтра» на отображение только тех уставочных параметров, которые удовлетворяют заданному пользователем критерию (например, часть строки названия параметра, либо диапазон изменения его значения). Каждому уставочному параметру устанавливается значение уровня доступа. В случае, когда текущий уровень использования TranSet ниже, чем у определенного параметра, данный параметр в таблице редактирования не отображается.

УДК 621.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПОФАЗНО-ЭКРАНИРОВАННЫХ ТОКОПРОВОДОВ

Ильковский И.Н.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Булат В.А.

При расчете нагрузочной способности мощных генераторных токопроводов одной из важнейших проблем является исследование его теплового режима.

Существующие методы теплового расчета пофазно-экранированных токопроводов базируются на общей теории теплопередачи, на основании которой из уравнений теплового баланса определяется тепловой режим токопроводов.

В реальных условиях в месте расположения электрооборудования действует большое число различного рода излучений, учёт которых возможен при помощи методов теории вероятностей и математической статистики. Обеспечение нормальной работы совместно работающих технических средств является целью ЭМС как научной проблемы. Предметом же изучения можно считать выявление закономерностей мешающего взаимодействия совместно работающих технических средств, на базе которых формируются рекомендации для достижения цели.

В данной работе рассмотрены особенности конструкции пофазно-экранированных токопроводов мощных генераторов и режимы их работы.

Экранированные генераторные токопроводы предназначены для электрического соединения генераторов мощностью 100 МВт (иногда 60 МВт) и выше с блочными трансформаторами и трансформаторами собственных нужд, а также нулевых выводов генератора. Пофазно-экранированные токопроводы обладают большей надежностью, чем токопроводы с общим экраном, тем более открытые. Поэтому токопроводы генераторов АЭС, КЭС, а также мощных ГЭС и ТЭЦ выполняют только пофазно-экранированными.

В токопроводах этого типа в качестве проводников используют исключительно алюминиевые трубы кольцевого сечения. Диаметр трубы и толщину стенки определяют из теплового расчета, руководствуясь установленными максимальными температурами для проводников и кожухов. Кожухи токопровода изготавливают из листового алюминия толщиной 4–6 мм в виде секций длиной 10–12 м.

Диаметр кожухов определяется диаметром проводников и двойной высотой изоляторов. Последние вводят в кожухи снаружи через отверстия в стенках и укрепляют болтами. В случае необходимости любой изолятор можно вынуть и заменить другим. Расстояние между изоляторами по длине токопровода составляет 4–5 м, т. е. значительно больше обычных расстояний в неэкранированных токопроводах сборного типа. Проводники плотно прилегают к головкам изоляторов.

Изготовленные таким образом секции собирают в трехфазную систему на месте установки и связывают поперечными двутавровыми балками. Продольная несущая конструкция для токопроводов с непрерывной системой кожухов не требуется, поскольку кожухи обладают значительной жесткостью и могут быть установлены на опорах с пролетом до 15–20 м. Как проводники, так и кожухи отдельных секций соединяют сваркой. Чтобы обеспечить свободную деформацию проводников и кожухов при изменении температуры, предусматривают тепловые компенсаторы. Во избежание проникновения в кожухи пыли и влаги их надежно герметизируют.

Большая часть токопроводов с номинальным током вплоть до 15–20 кА работает с естественным воздушным охлаждением. Имеются токопроводы, выполненные с проточной вентиляцией и водяными охладителями. При этом размеры проводников и кожухов могут быть уменьшены. Целесообразность такой конструкции должна быть проверена соответствующим технико-экономическим расчетом с учетом местных условий.

Протекание рабочих токов в несколько десятков килоампер по шинам комплектных экранированных токопроводов вызывает значительный нагрев как токоведущих, так и других элементов их конструкции. Нагрузочная способность токопроводов определяется их рабочими температурами.

Снижают рабочие температуры токопроводов двумя путями: применением принудительного охлаждения (вентиляцией) или ограничением величины токов в экранах путем включения в их цепь насыщающихся токоограничивающих реакторов.

При обосновании применения системы на стадии проектирования необходимо производить расчет величины рабочих температур элементов токопровода.

Существующие методики расчета теплового режима экранированных токопроводов приближенно учитывают величину потерь мощности в экранах, которая в значительной степени обуславливает температурный режим токопровода. Это не позволяет использовать их для расчета рабочих температур токопроводов с электрически непрерывными экранами, выполненных с различной степенью ограничения токов. Необходимо также отметить, что все существующие методы весьма трудоёмки. В связи с этим возникает необходимость разработки такого метода, который наиболее полно отвечал бы физическим процессам, происходящим при нагреве элементов конструкции комплектных токопроводов, и элементы которого легко можно было бы реализовать на ЭВМ.

Методика расчета температур элементов конструкции комплектных токопроводов основана на численных методах исследования с использованием ЭВМ. Она заключается в том, что для комплектного токопровода определяются все основные электромагнитные параметры поля, по которым находятся потери мощности в экранах. На основании теории теплопередачи составляются уравнения теплового баланса, из решения которых находится температура конструктивных элементов токопровода. Предлагаемая методика пригодна для исследования теплового режима комплектных пофазно-экранированных токопроводов с различными схемами соединения экранов.

При прохождении тока по шинам и экранам выделяется теплота, которая отводится излучением (от нагретых к холодным телам) и естественной конвекцией (т. е. естественной циркуляцией воздуха). При увеличении передаваемой токопроводом мощности необходимо либо существенно увеличивать размеры шин и экранов, либо повышать интенсивность охлаждения, например, принудительной циркуляцией воздуха в экранах.

Принудительное охлаждение целесообразно использовать в генераторных токопроводах, передающих мощность не менее 500–800 МВт. Так, в токопроводах 500 МВт применяют принудительное воздушное охлаждение выводов генераторов, а в токопроводах 800 МВт и выше, кроме того, принудительное охлаждение внутренних полостей шин и экранов основных магистралей. Отпайки токопроводов к трансформаторам собственных нужд имеют естественное охлаждение.

Применение комплексной математической модели и методов расчета теплового режима и параметров электромагнитного поля в стационарном и переходном режимах позволило создать простой алгоритм и разработать комплексную программу для исследования оптимальных основных конструктивных и режимных параметров пофазно-экранированных токопроводов.

В токопроводах могут быть встроены разъединители, заземлители, измерительные трансформаторы тока и напряжения. Токопроводы для блочных агрегатов генератор-трансформатор изготавливают с ответвлениями для присоединения трансформаторов собственных нужд.

Кожухи образуют замкнутую трехфазную систему. В рабочем режиме в них индуктируются токи, приблизительно равные токам в проводниках, но направленные противоположно. Они проходят вдоль кожухов, распределяясь равномерно по периметру, и переходят из одного кожуха в два других по концам токопровода. Геометрическая сумма их равна нулю. Эти токи в дальнейшем называются циркулирующим и в отличие, от вихревых

токов, замыкающихся в пределах кожуха каждой фазы. Циркулирующие токи уменьшают внешнее магнитное поле токопровода.

#### Литература

1. Семчинов, А.М. Токопроводы промышленных предприятий / А.М. Семчинов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоиздат, 1982. – 208 с.
2. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания: ГОСТ 30323-95. – Введ. 01.03.1999. – Минск, 1999. – 57 с.
3. Булат, В.А. Исследование и оптимизация режимов работы и конструктивных параметров комплектных пофазно-экранированных токопроводов мощных генераторов: дис. ... к-та техн. наук: 05.14.02 / В.А. Булат. – Минск, 1982. – 180 с.

УДК 621.3

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕКЛОУЗЕРОВ 6–10 КВ

Крапивин С.В.

Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

Автоматизация сетей на базе реклоузеров – действенное и хорошо себя зарекомендовавшее, как за рубежом, так и в отечественной электроэнергетике, решение для распределительных сетей. Реклоузеры РВА/TEL (рисунок 1), производимые «Таврида Электрик» – это новое поколение оборудования, объединившее в себе передовые технологии микропроцессорной РЗиА и коммутационной техники, и серьезный практический опыт проектирования и применения пунктов секционирования. Реклоузер относится к высоковольтным выключателям.



Рисунок 1. Реклоузер РВА/TEL

Применение децентрализованной автоматизации заключается в оснащении распределительной сети пунктами автоматического секционирования, которые позволяют отключать только аварийных участков сети на базе локальной информации о повреждении, обрабатываемой непосредственно в самом пункте без использования каких-либо каналов связи.

Реклоузер РВА/TEL производства ЗАО ГК «Таврида Электрик» предназначен для применения в воздушных распределительных сетях трёхфазного переменного тока с изолированной, компенсированной или заземлённой нейтралью, номинальным напряжением 10(6) кВ в качестве автоматического пункта секционирования в сетях с односторонним и с несколькими источниками питания.

Представляет собой малогабаритное устройство наружного исполнения на базе вакуумного выключателя, измерительных трансформаторов тока и напряжения сочетающее в себе функции измерения электрических параметров сети и коммерческого учета электроэнергии ЛЭП 6–10 кВ с возможностью внедрения в системы АСКУЭ, а также всех типов противоаварийной автоматики, защиты, контроля, местного и дистанционного управления.

Комплектное распределительное устройство мачтовой установки для автоматизации электрических сетей (КРУмАЭС) является многофункциональным устройством, предназначенным для решения различных задач автоматизации и управления электрическими сетями трехфазного переменного тока напряжением 6(10) кВ, промышленной частоты 50 Гц, с изолированной или компенсированной нейтралью.

Конструктивно Реклоузер КРУмАЭС (рисунок 2) выполнен в виде отдельных модулей, которые монтируются на опоре ВЛ на высоте, не требующей специального ограждения, с помощью комплекта монтажных частей, соединяются между собой кабелями и заземляются согласно электромонтажной схеме.



Рисунок 2. Реклоузер КРУмАЭС

Применение реклоузеров позволит не только повысить надёжность, оптимизировать режимы работы сети, но и сократить издержки на обслуживание, поиск и устранение повреждения сети.

УДК 621.3

## СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЩИТОВ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Дядюк Н.В.

Научный руководитель – Климкович П.И.

Щиты управления в системах автоматического контроля, регулирования и управления являются конструктивными элементами для размещения приборов и аппаратуры, относящихся к данной системе. Щиты позволяют рационально разместить и связать в единую систему не только приборы, регуляторы, средства сигнализации и дистанционного управления, но и относящиеся к ним элементы электрической коммутации, трубные проводки, средства защиты и блокировки, а также другие вспомогательные устройства. Исходными материалами для выбора щитов и размещения на них приборов и средств автоматизации при разработке чертежей общих видов щитов являются схемы взаимосвязей между пунктами контроля и управления; функциональные схемы автоматизации; принципиальные электрические и пневматические схемы автоматического регулирования, управления и сигнализации; схемы питания; чертежи щитового помещения; монтажно-эксплуатационные инструкции на приборы и аппаратуру и чертежи установки приборов и аппаратуры на фасадах щитов.

По конструктивному оформлению щиты делятся на шкафные и панельные – полногабаритные и малогабаритные. Кроме того, могут предусматриваться приставные панели. Шкафные щиты являются щитами с закрытой коммутацией, панельные – с открытой.

Шкафные щиты могут быть двух исполнений: защищенные и защищенные с уплотнением (последние имеют только уплотнение дверей, ограничивающее попадание пыли внутрь щита). На фасадной стороне щитов или панелей размещают показывающие, самопишущие и регулирующие приборы, переключатели к приборам, светосигнальную арматуру, аппаратуру оперативного управления, а также изображают мнемосхемы.

Для отображения всей необходимой диспетчеру оперативной информации на видеостене специалистами филиала «Энерготелеком» разработан оперативно информационный комплекс, который также позволяет решать следующие задачи:

- ведение режима энергосистемы;
- ведение оперативных переключений, учет допущенных бригад к проведению работ в действующих электроустановках;
- ведение учета и отображение отклонений от нормального режима энергосистемы;
- ведение ведомости переключений, ведомости аварийных отключений, составление текущего баланса энергосистемы, возможность просмотра параметров работы энергосистемы с глубиной ретроспективы трехминутных значений до семи суток;
- поддержка многопользовательского режима, для наблюдения и удаленного мониторинга работы энергосистемы заинтересованных лиц.

Видеостена соответствует техническому уровню современных компьютеризированных автоматизированных систем управления и в значительной мере позволяет снизить влияние на процесс так называемого человеческого фактора. Для удобства ведения оперативных переговоров смонтирован многоканальный коммутатор с управлением, выполненным на базе монитора сенсорного исполнения. Коммутатор оснащен устройством handsfree (свободные руки) реализованным на беспроводной сети Bluetooth и своим функционалом не уступает самым современным мобильным телефонам.

### Литература

1. Твердохлебов, В.И. Диспетчерские щиты на станциях / В.И. Твердохлебов. – М., 1985.
2. Мальханов, В.П. Проектирование щитов диспетчерского управления / В.П. Мальханов. – М., 2004.
3. Петухов, М.А. Управление диспетчерскими щитами и пультами / М.А. Петухов. – М., 1994.

УДК 620.9

## СИСТЕМЫ ПОЖАРОТУШЕНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Марфель Г.М.

Научный руководитель – Кисляков А.Ю.

Система энергетики любого современного государства – это фундамент для обеспечения его экономической независимости и развития. Эффективное использование природных энергетических ресурсов и всего потенциала энергетического сектора ведет к устойчивому росту экономики и качества жизни населения страны и содействует укреплению ее внешнеэкономических позиций. Поэтому обеспечение безопасности, в частности пожарной, критически важных энергетических объектов – один из основных приоритетов в системе национальной безопасности государства.

Пожары на трансформаторных подстанциях могут серьезно повлиять на процесс энергоснабжения потребителей и, соответственно, доходы и активы сетевого предприятия. Также пожары создают угрозу для здоровья и жизни персонала, аварийных бригад и людей, случайно оказавшихся вблизи. Понимание причин возникновения пожара и принятие необходимых противопожарных мер – в частности установки противопожарной сигнализации на объекте – позволяют вовремя обнаружить возгорание, остановить его и, таким образом, смягчить последствия пожара. Именно этому системы противопожарных сигнализаций должны обязательно учитываться при проектировании любых трансформаторных подстанций, будь то узловая распределительная подстанция, главная понизительная подстанция или трансформаторный пункт.

Современные системы пожарной сигнализации предназначены для обнаружения пожара в его начальной стадии, включения автоматических стационарных установок пожаротушения, а также сообщения о месте возникновения пожара. Эта система представляет собой совокупность различных установок, смонтированных на одном объекте и постоянно контролируемых с пожарного поста.

Пожары трансформаторов, реакторов и масляных выключателей тушат, как правило, пеной средней кратности, тонкораспыленной водой, огнетушащими порошками. При этом осуществляют защиту соседних трансформаторов, реакторов, оборудования и установок от высокой температуры.

Во всех случаях при горении масла на трансформаторе или под ним необходимо отключать его от сети со стороны высокого и низкого напряжений, снять остаточное напряжение и заземлить. После снятия напряжения тушение пожара можно производить любыми средствами (распыленной водой, пеной, порошками). При горении масла на крыше трансформатора у проходных изоляторов его необходимо ликвидировать распыленными струями воды, низкократной воздушно-механической пены или порошковыми составами. Если поврежден корпус трансформатора в нижней части и происходит горение под ним, то горение масла ликвидируется пеной, а масло следует спустить в аварийный резервуар. В случае воздействия пламени на корпус соседнего трансформатора его необходимо защищать распыленными струями воды с интенсивностью подачи на обогреваемую поверхность 0,15–0,18 л/м<sup>2</sup>. Спуск масла из соседних трансформаторов обычно не производят, так как пустой корпус более благоприятен для горения обмоток и опасен в отношении взрыва.

Пожары трансформаторов в закрытых взрывных ячейках ликвидируются аналогично, но, кроме того, имеется возможность заполнения объема ячейки пеной средней кратности, паром или инертным газом. При этом ячейки не открывают, а пеногенератор вводят через предварительно вскрытые вентиляционные решетки.

В некоторых случаях тушение пожаров трансформаторов водой исключается из-за невозможности сооружения систем противопожарного водоснабжения или в связи с большими капитальными затратами. В этих случаях среди имеющихся в настоящее время на вооружении пожарной охраны огнетушащих средств наиболее эффективными являются сухие порошковые составы типа ПС и ПСБ.

Одними из современных средств борьбы с пожарами являются огнетушащие порошки и соответствующие порошковые технические средства. Огнетушащие порошки представляют собой мелко измельчённые минеральные соли, такие как бикарбонаты и карбонаты натрия, калия, аммонийные соли фосфорной кислоты. Огнетушащий эффект порошковых составов заключается в том, что при выделении, порошок образует пылевоздушную смесь, которая медленно оседает вниз, ограничивая доступ кислорода к очагу возгорания и тем самым блокируя его. Такие системы обладают рядом преимуществ по сравнению с другими средствами: высокая огнетушащая способность, универсальность применения вследствие способности тушить материалы, которые невозможно потушить другими средствами, электроустановки, находящиеся под напряжением, отсутствие токсичности; возможность применения в диапазоне температур от минус 50 до плюс 60 °С, разнообразие способов тушения (флегматизация, подавление взрыва). Однако широкому распространению систем порошкового пожаротушения препятствует ряд их недостатков: слабая проникающая способность порошка, снижение видимости и затруднение дыхания людей, а также сложности с уборкой по окончании тушения.

В основе принципа аэрозольного пожаротушения лежит химический процесс подавления цепных реакций в зоне пламенного горения. В состав аэрозоля входят высокодисперсные твёрдые частицы, величина дисперсности которых не превышает 10 мкм, и инертные газы. Основное огнетушащее действие на пламя оказывают твёрдые частицы аэрозоля, которые легко разлагаются с участием кислорода, а негорючий газ частично замещает 23 кислород в помещении. Это способствует снижению интенсивности реакций горения. Также за счет поглощения тепла аэрозодем происходит охлаждение зоны горения.

Достоинством данных систем является:

- наибольшая огнетушащая способность, по сравнению с другими средствами объёмного пожаротушения;
- пригодность для защиты неотопляемых помещений, электрооборудования под напряжением (в местах, где невозможно применение альтернативных методов объёмного пожаротушения);
- отсутствие вреда для защищаемого объекта (помещения и находящиеся в них материальные ценности), так как осевший в виде порошка аэрозоль легко удаляется с поверхности.

К недостаткам систем аэрозольного пожаротушения относится обязательная эвакуация персонала, что приводит к замедленной реакции системы на пожар, также высокая температура аэрозоля, который может «раскалиться» до 400 °С.

Установки газового пожаротушения (УГП) в настоящее время находят все более широкое применение для противопожарной, где требуется объёмный способ пожаротушения и использование огнетушащих веществ, не причиняющих вреда защищаемому объекту. Также УГП в помещениях большого объема и на открытых площадках для защиты отдельного стоящего технологического оборудования локальным по объему способом пожаротушения.

Принцип действия установок газового пожаротушения основан на разбавлении воздуха инертным газом, поступающим в зону горения, и снижении содержания кислорода до концентрации, при которой горение прекращается. Достоинства системы газового пожаротушения: полное отсутствие ущерба защищаемому объекту, пригодность для защиты дорогостоящего электрооборудования под напряжением, тушение очага возгорания в труднодоступных местах. К недостаткам систем относится частая токсичность применяемых огнетушащих газов, а, следовательно, обязательное условие предварительной эвакуации людей из зоны тушения и комплектация объекта средствами индивидуальной защиты (самоспасательные наборы, противогазы).

Системы пенного пожаротушения используются преимущественно для тушения легковоспламеняющихся жидкостей и горючих жидкостей в резервуарах, горючих веществ и нефтепродуктов, расположенных как внутри, так и вне зданий. Это обусловлено тем, что

пена обладает меньшим удельным весом, чем любая воспламеняющаяся жидкость, и за счет этого может легко покрыть воспламененную поверхность, блокируя очаг, не допуская доступа кислорода, тем самым подавить процесс горения. В настоящее время разработка эффективных пенообразующих составов является приоритетом в пожаротушении. Однако, в связи с определенными недостатками систем пенного пожаротушения, такими как высокая стоимость, из-за требуемого дополнительного оборудования (пеногенератор и т. п.), сложность утилизации отходов после срабатывания системы и, как следствие, большой, часто невосполнимый ущерб защищаемому объекту, следует выделить перспективы применения систем водяного пожаротушения. Одной из наиболее перспективных и современных его модификаций является пожаротушение тонкораспыленной водой. Данный метод по сравнению с традиционными установками водяного пожаротушения, характеризуется универсальностью применения по отношению к защищаемым объектам, безопасностью для людей и материальных ценностей, высокой дымоосаждающей способностью, невысокой стоимостью, простотой монтажа и эксплуатации.

Системы пожаротушения тонкой распыленной водой (ТРВ) получают всё более широкое признание на рынке средств противопожарной защиты.

Главное достоинство тонкораспыленной воды – это объёмно-поверхностный способ тушения пожаров, который позволяет быстро ликвидировать пламенное горение практически всех веществ, за исключением веществ, бурно реагирующих с водой с выделением горючих газов и тепловой энергии.

В настоящее время существует решение этих проблем с помощью системы пожаротушения, использующей пену в комплекте со сжатым воздухом. ICAF предлагает стационарную инженерную сеть под названием «Системы ФайрФлекс» (FireFlex). Эта новейшая пенная система позволяет на стадии проектирования минимизировать большинство из возникающих потенциальных проблем, обеспечивая лучшую защиту от пожаров.

Конструкторы систем противопожарной защиты теперь разработали эффективный арсенал для борьбы с пожарами. Технология ICAF с точки зрения экологии представляет собой эффективное решение по защите трансформаторов от возможных рисков.

#### Литература

1. Дмитриенко, М.А. Особенности испарения капель воды в пламенах типичных горючих жидкостей / М.А. Дмитриенко, П.А. Стрижак, А.О. Жданова // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24. – № 9. – С. 25–31.

2. Дмитриенко, М.А. Исследование процессов смешения парокapельных и высокотемпературных газовых смесей [Электронный ресурс] / М.А. Дмитриенко, А.О. Жданова, М.В. Забелин, П.А. Стрижак // Современные проблемы науки и образования. – 2014 – № 3. – С. 1–8. – Режим доступа : <http://www.science-education.ru/117-1354>. – Дата доступа : 15.03.2018.

УДК 621.3

## УЯЗВИМОСТИ НИЗКОУРОВНЕВЫХ ПРОТОКОЛОВ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ АТАКИ НА АСУ ТП

Плешко Д.Ю.

Научный руководитель – Сапожникова А.Г.

Промышленные системы управления (ICS, АСУ ТП) за последние годы вышли на принципиально новый уровень благодаря развитию информационных технологий и сети Интернет. Однако новый виток автоматизации несет свои проблемы: некорректное применение технологий защиты и обработки данных приводит к серьезным уязвимостям.

В связи с этим промышленные системы управления все чаще становятся мишенью для злоумышленников и киберармий. На смену отдельным червям Stuxnet (2010) и Flame (2012) пришли более изощренные схемы многоступенчатых атак. Так, для распространения трояна Havex в 2014 году хакеры взламывали сайты производителей ПО для управления промышленными предприятиями (SCADA) и заражали официальные дистрибутивы SCADA-систем, которые затем устанавливались на предприятиях, что позволило злоумышленникам получить контроль над системами управления в нескольких европейских странах.

Современные АСУ ТП представляют собой сложные многоуровневые архитектуры, глубоко интегрированные с остальной инфраструктурой предприятия.

Времена, когда программируемые логические контроллеры (PLC, промышленные контроллеры) могли находиться в одном сегменте сети вместе с КИС и интернет-серверами, постепенно проходят, и сейчас высокая сегментированность и иерархичность являются неотъемлемыми свойствами АСУ ТП. Эти свойства могут создать ложное ощущение безопасности инфраструктуры, поскольку на первый взгляд двумя основными точками проникновения в сеть предприятия для атакующего являются демилитаризованная зона и КИС. Таким образом, для того чтобы получить доступ в промышленный сегмент сетевой инфраструктуры, атакующий должен преодолеть множество межсетевых экранов, систем обнаружения и предупреждения вторжений и других систем защиты. К сожалению, многоуровневая инфраструктура все еще остается уязвимой по отношению к атакам с нижних уровней, причем эти уровни зачастую защищены гораздо хуже.

В качестве примера можно рассмотреть уязвимости в инфраструктурах, в состав которых входят устройства, использующие протокол HART для обмена данными. Этот протокол (дистанционно управляемый измерительный преобразователь, адресуемый через магистраль) представляет собой промышленный стандарт передачи данных для интеллектуальных полевых приборов. Он был разработан в конце 1980-х компанией Rosemount, а сегодня используется в промышленных устройствах множества производителей, в том числе ABB, Endress & Hauser, Emerson, Honeywell и др., чаще всего – для подключения датчиков и удаленных систем ввода-вывода к PLC. При помощи шлюзов HART и HART-модемов управлять устройствами HART можно и с компьютера. Предназначенные для этого программные средства включают в себя HMI-системы (SCADA), OPC-серверы (OLE for Process Control) и системы PAS (Plant Asset management Software).

HART является типичным протоколом со схемой передачи данных типа «управляющий – управляемый» (master – slave), когда PLC или компьютер отправляют некоторую команду датчику либо системе ввода-вывода, а тот, в свою очередь, присылает ответ. В основном его применяют для настройки удаленных устройств, а также для считывания их состояния. HART может использовать различные физические среды, но самая популярная из них – токовая петля (4–20 мА). Скорость передачи по ней составляет 1200 бод, при этом цифровой сигнал может накладываться на аналоговую составляющую.

В токовой петле за сигнал отвечает не напряжение, а ток, поэтому она более устойчива к помехам, так что длина линий HART может составлять до 3 км. Данные свойства, а также способность HART работать во взрывоопасных зонах (классов 0, 1 и 2) позволяют

использовать HART-устройства на объектах критической важности, таких как электростанции, химические заводы, нефтегазовые платформы и др. Типичные места применения RTU, использующих HART, – это зоны повышенной опасности. Кроме того, благодаря высокой дальности действия устройства HART можно размещать за территорией предприятия, например, для контроля утечек и экологической обстановки на электростанциях и химических заводах, на трубопроводах, подстанциях и магистралях в нефтегазовой промышленности, на электростанциях и в других местах, где датчик должен находиться на определенном расстоянии от контроллера или НМІ.

Тем не менее, из-за использования токовой петли в качестве среды передачи данных протокол HART уязвим к различного рода атакам. Во-первых, злоумышленник может, подключившись к линии HART с помощью устройства с высоким импедансом, незаметно прослушивать линию, получая таким образом информацию об инфраструктуре. Во-вторых, он может перенастроить какой-либо датчик или подделать его. Например, если атакующий изменит адрес Polling ID датчика на новый, а потом ответит управляющему устройству со старым Polling ID, то PLC или компьютер будут считать, что работают с реальным датчиком, в то время как на самом деле это датчик поддельный, имитируемый злоумышленником. Возможность подделки данных от датчиков является собой реальную угрозу безопасности АСУ ТП. Но это далеко не весь спектр проблем, который может возникнуть из-за слабой защиты линий HART.

Современные программные средства, работающие с HART, например, OPC-серверы и PAS-системы, обладают возможностью глубокой интеграции с другими элементами инфраструктуры, в том числе с системами MES (Machine Execution System) и ERP (Enterprise Resource Planning). Эта интеграция может проходить через PAS-системы, которые взаимодействуют с устройствами на базе HART при помощи спецификации FDT/DTM. Технология FDT/DTM создана FDT Group, чтобы упростить разработку систем PAS и работу с полевыми устройствами. В основе технологии лежат COM-контейнеры и COM-объекты, взаимодействующие между собой посредством XML-сообщений. Иными словами, данные, полученные от полевых датчиков, упаковываются в XML-сообщения и передаются в PAS-систему, откуда они могут быть переданы на более высокие уровни – в MES или ERP.

Если в компоненте, работающем с датчиком, недостаточно корректно реализована (или вообще отсутствует) фильтрация входных данных, то злоумышленник может, изменив конфигурацию или подделав датчик, вызвать инъекцию XML-кода внутри PAS-системы. Это чревато серьезными последствиями, поскольку в таком случае злоумышленник проникает на верхние уровни иерархии АСУ ТП, даже если они отделены от нижних при помощи МСЭ. Инъекция кода XML может привести к атакам отказа в доступе, чтению произвольных файлов, атаке на механизмы аутентификации и даже к выполнению произвольного кода в системе. Все это в худшем случае может спровоцировать полную компрометацию инфраструктуры как на нижних, так и на верхних уровнях.

Рассмотрим пример такой атаки, приведенной на рисунке 1.

Злоумышленник, получив доступ к токовой петле (1), сначала прослушивает проходящие по ней пакеты и таким образом получает информацию об инфраструктуре и устройствах, взаимодействующих с линией. После чего он отправляет специализированный пакет, который изменит определённые параметры датчика (в данном случае – параметр long tag, длинный символьный идентификатор) таким образом, чтобы стала возможной инъекция XML-кода. Либо он может использовать вышеописанную методику и подделать датчик посредством смены Polling ID. Поскольку размер обычного пакета HART редко превышает 70 байт, атакующему необходимо подгрузить дополнительные инструкции XML. Это можно сделать через ссылку на внешний документ. Когда PAS-система начнет взаимодействовать с датчиком (2), данные, содержащие инъекцию XML, передаются на уровень выше (3), в MES или другие системы. На этом уровне внедряется ссылка на XML-документ, находящийся на внешнем или локальном Web-сервере, после чего происходит загрузка внешней схемы XML

(4). Таким образом (5) атакующий может читать произвольные файлы на сервере с MES-системой или использовать методы SSRF для расширения диапазона атаки.



Рисунок 1. Схема хакерской атаки на нижние уровни

Так насколько сложно злоумышленнику получить доступ к линии токовой петли? Если устройства находятся вне территории предприятия, то зачастую линия HART – это три-четыре провода, которые могут быть упакованы в отдельный кабель-канал или использовать канал с другими промышленными линиями. Например, в нефтегазовом секторе такая линия может проходить параллельно с трубопроводом. Всё, что требуется от злоумышленника, – это получить кратковременный (5–10 минут) доступ к линии. Причём не обязательно нарушать её целостность – при определенных конфигурациях достаточно просто подключиться к ней.

Какими могут быть последствия такого рода атак? Помимо вышеперечисленных возможностей по подделке показаний датчиков, перехвату управления актуаторами, атакам отказа в доступе на НМИ-, OPC- и PAS-системы, чтению произвольных файлов существует гораздо более страшная угроза по отношению к инфраструктуре: в случае успешной компрометации MES- или PAS-системы за счет глубокой взаимосвязи компонентов в АСУ ТП злоумышленник может перехватить контроль над всем производственным процессом, от нижних уровней до верхних.

Это становится возможным благодаря тому, что при сегментировании и изолировании различных АСУ ТП пока редко учитывается тот факт, что атака извне может произойти не только со стороны Интернета или КИС, но и с уровня промышленных протоколов или полевых устройств.

Какие меры можно принять для защиты? К сожалению, в случае использования протокола HART остается лишь гарантирование физической безопасности линий токовой петли. Кроме того, необходимым является аудит инфраструктуры АСУ ТП, в том числе и программных средств, интегрированных с HART, для того чтобы злоумышленник, даже получив доступ к токовой петле, не смог проникнуть на другие уровни и сегменты инфраструктуры.

Современные подходы к проектированию инфраструктур АСУ ТП позволили устранить старые болезни в области информационной безопасности таких систем. Тем не менее, усиливая защиту верхних сегментов системы (КИС, ДМЗ и др.), не стоит забывать и

про защиту нижних уровней, так как вектор атаки может быть направлен не только сверху вниз (из КИС/Интернета к ПЛК/полевым устройствам), но и наоборот: от промышленных шин передачи данных между полевыми устройствами – на уровни MES, ERP и в конечном итоге КИС.

Перечисленные выше факты указывают на гипотетическую возможность влияния уязвимостей низкоуровневых протоколов на решения, принимаемые на основе данных АСУ ТП, что в свою очередь свидетельствует об относительной небезопасности систем, использующих в своём составе устаревшие протоколы.

#### **Литература**

1. Казиев, В.М. Введение в системный анализ и моделирование / В.М. Казиев. – М. : ИНТУИТ, 2001. – 72 с.
2. Чичкарёв, Е.А. Системный анализ сложных систем управления / Е.А. Чичкарёв. – Пермь : ПГТУ, 2005. – 59 с.

УДК 621.389

**МОДУЛИ ИНДИКАЦИИ МНЕМОСХЕМ**

Русецкий К.И.

Научный руководитель – Климкович П.И.

Для удобства наглядного восприятия функциональных схем объектов, контролируемых либо управляемых, применяют мнемосхемы – графические изображения схем этих объектов. Мнемосхема может отображать, например, цех станков с ЧПУ, какой-нибудь технологический процесс или систему, например, энергетическую сеть. Другими словами, мнемосхема являет собой информационную условную модель системы или процесса в виде символов, обозначающих части системы, а также их связи.

Мнемосхема отражает графически структуру всей системы, облегчая тем самым работу оператора, который, благодаря такой схеме, сам легче запоминает структуру системы, взаимосвязи параметров, назначение тех или иных органов управления, приборов, станков и т. д.

Мнемосхемы всегда создают придерживаясь ряда принципов, которые сформировались за много лет практического применения мнемосхем. И одним из главных принципов является лаконичность. Мнемосхема не должна содержать ничего лишнего, она должна быть как можно более простой.

Придерживаются также таких принципов, как:

- принцип унификации, который подразумевает выделение на мнемосхеме и использование в ней наиболее значимых особенностей объектов;
- принцип акцентирования элементов управления и контроля;
- принцип автономности, согласно которому важно обособлять друг от друга части мнемосхемы, соответствующие автономно управляемым и контролируемым агрегатам и объектам системы;
- принцип структурности, согласно которому они должны иметь структуру, отличающуюся от других структур, и легко запоминаться;
- принцип пространственного соответствия элементов управления и контроля;
- принцип использования стереотипов и привычных ассоциаций.

Условные обозначения параметров должны ассоциироваться у оператора со стандартными обозначениями данных параметров, которые общеприняты, и вместо абстрактных значков лучше использовать символы, обозначающие именно соответствующие процессы и объекты как показано на рисунке 1.

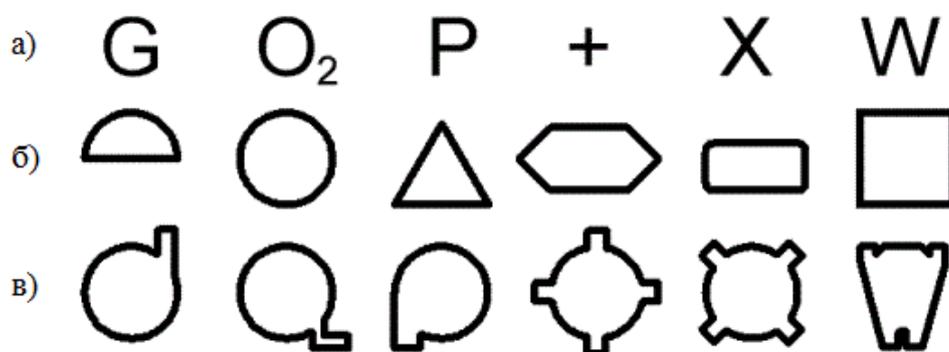


Рисунок 1. Пример различных обозначений одних и тех же параметров:  
а) буквенные обозначения; б) их условные обозначения; в) мнемосимволы

Практика показывает, что использование мнемосимволов приводит к снижению числа ошибок и к сокращению времени, которое оператор затрачивает на распознавание символа на 40 %.

Изобретение, представленное на рисунке 2, относится к области электротехники и может быть использовано в системах электроснабжения промышленных предприятий, городов и сельскохозяйственных районов в распределительных шкафах для индикации состояния внутреннего оборудования распределительного шкафа.

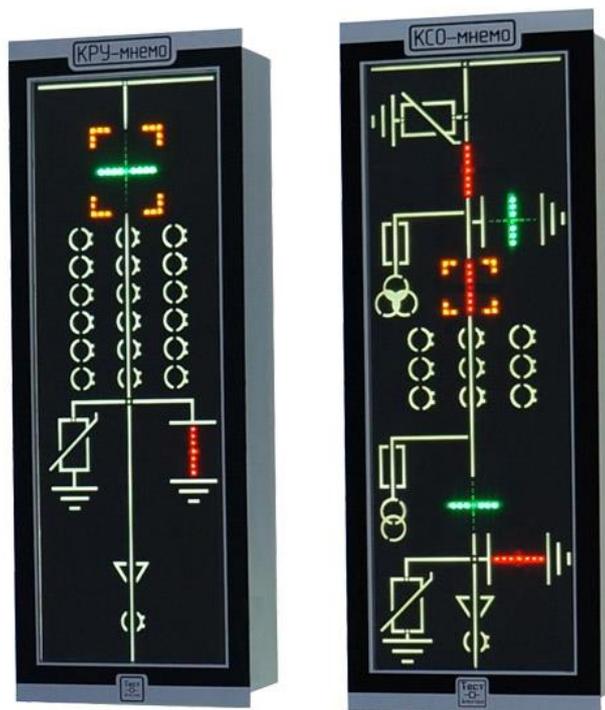


Рисунок 2. Модуль индикации мнемосхем КРУ/КСО-Мнемо VII

Известны конструктивно сходные модули индикации мнемосхемы распределительного шкафа, содержащие прямоугольный корпус и параллельно смонтированные в нем на стойках разные панели: основную панель в виде двухсторонней печатной платы с расположенными на ее поверхности функциональными элементами: узлом питания, преобразующим входное напряжение питания в напряжение для снабжения всех узлов модуля; входным узлом, принимающим информацию от основных электроаппаратов распределительного шкафа об их текущем состоянии; микроконтроллером, принимающим информацию от входного узла и на ее основе управляющим модулем индикации мнемосхемы распределительного шкафа в соответствии с запрограммированной логикой, и узлом индикации, принимающим сигналы управления от микроконтроллера и организующим индикацию текущего состояния оборудования распределительного шкафа в виде светящейся графической мнемосхемы, а также отдельно расположенную и наглядно демонстрирующую светящуюся мнемосхему распределительного шкафа со статическими и динамическими зонами ее графического рисунка панель индикации.

В качестве панели индикации во всех этих известных модулях индикации используется модульный промышленный графический дисплей высокого разрешения.

Недостатком всех этих известных модулей мнемосхемы распределительного шкафа является их информационная избыточность, т. к. мнемосхема состояния шкафа представляет собой графический рисунок, большая часть которого неизменна в период всего срока службы модуля, то есть статична. При этом даже текущее состояние оборудования шкафа может не меняться тысячи часов. И только некоторые зоны графического рисунка мнемосхемы шкафа содержат изменяемые (динамические) элементы, изображение которых меняется в зависимости от состояния оборудования шкафа.

Кроме того, модульный промышленный графический дисплей достаточно дорогой по цене, так как имеет сложную конструкцию, обеспечивающую отображение неизменной и изменяющейся графической и текстовой информации на всем поле индикации.

В Беларуси модульные промышленные графические дисплеи не производятся, их закупают за рубежом.

Мнемосхемы составляют мнемонические диспетчерские щиты, которые предназначены для отображения статической и динамической информации и находят широкое применение в энергетике, теплоснабжении и газоснабжении, водопроводных системах и других областях. Щиты являются неперенными атрибутами диспетчерских служб предприятий электрических сетей и крупных промышленных предприятий. Наши разработки призваны дать наиболее современные щиты по доступным ценам белорусского производителя.

Использование в работе мнемосхем приводит к снижению числа ошибок и к сокращению времени их выявления.

Модули индикации мнемосхем ежегодно модернизируются, улучшая свое качество работы, а также простоту восприятия процессов, указанных на них.

### Литература

1. Модуль светодиодной индикации мнемосхемы распределительного шкафа [Электронный ресурс] / Модуль светодиодной индикации. – Режим доступа : <http://www.findpatent.ru/patent/260/2604664.html>. – Дата доступа : 20.04.2018.
2. Что такое мнемосхема [Электронный ресурс] / Мнемосхемы – Режим доступа : <http://electricalschool.info/automation/1752-что-такое-mnemo-skhema.html>. – Дата доступа : 22.04.2018.
3. Автоматизация-2000 [Электронный ресурс] / Автоматизация-2000. – Режим доступа : <http://a2000.by/prod/mnemo-2/>. – Дата доступа : 24.04.2018.
4. Электронные средства сбора, обработки и отображения информации [Электронный ресурс] / Электронные средства сбора, обработки и отображения информации. – Режим доступа : [http://www.ie.tusur.ru/books/COI/page\\_38.htm](http://www.ie.tusur.ru/books/COI/page_38.htm). – Дата доступа : 24.04.2018.

УДК 621.3

## АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ЗАЩИТЫ БАЗ ДАННЫХ МЕТОДАМИ СОВРЕМЕННОЙ КРИПТОГРАФИИ

Федосевич Э.А.

Научный руководитель – Сапожникова А.Г.

В работе приведены результаты сравнительного анализа надежности, технологичности и удобства пользователей при различных методах реализации криптографической защиты баз данных в зависимости от целей и задач такой защиты. Показано, что при естественных предположениях о возможностях потенциального злоумышленника (противника) криптографическая защита данных в основных распространенных типах баз данных может обеспечить наибольшую надежность защиты при минимальных затратах по сравнению с любым другим способом защиты данных, не внося значительного неудобства в работу пользователей.

Современная криптография позволяет наиболее эффективно решать многие практические задачи в области защиты информации, которые возникают перед организацией, использующей компьютеры. В частности, задачу защиты баз данных, которая в силу требований действующего законодательства и в силу практической необходимости на сегодняшний день стоит практически перед каждой реально работающей организацией.

Во многих случаях для решения задачи надежной защиты базы данных чисто организационных мер и встроенных в систему управления базами данных средств защиты оказывается недостаточно. Например, немаловажной особенностью защиты информации в базах данных является наличие файлов-триггеров, с помощью которых выполняются запросы. В таких файлах данные для запросов хранятся в открытом виде. При наличии у злоумышленника физического доступа к месту установки системы управления базой данных, просмотр информации, содержащейся в триггерах, не составляет труда.

Криптографические методы защиты данных, хранимых и обрабатываемых как записи базы данных можно грубо разделить на два основных класса: методы защиты от несанкционированного просмотра данных при помощи их шифрования как в процессе хранения, так и процессе передачи по каналам связи на компьютеры пользователей: методы авторизации доступа пользователей к различным разделам базы данных, а также аутентификации блоков данных (записей базы данных)

Шифрование непосредственно записей базы данных (или даже отдельных их частей) на различных ключах при использовании современных стойких алгоритмов позволяет радикально решить проблему надежного разграничения доступа к различным разделам базы данных и не нуждается в больших затратах на физическую защиту непосредственно самих носителей данных.

Аутентификация отдельных разделов базы данных, отдельных записей или даже отдельных их наиболее важных частей с помощью технологии электронной подписи позволяет гарантировать защиту от несанкционированных изменений в базе данных с любой наперед заданной степенью детализации и документирования. Следует отметить тот факт, что на сегодня ни один способ защиты баз данных, кроме криптографического, не может обеспечить того уровня надежности защиты данных и удобства пользователей, которые обеспечиваются криптографическими технологиями.

Однако, как показывает практика, в опоре исключительно на криптографические методы защиты баз данных есть и заметные недостатки. Так, достаточно сложная для понимания средним пользователем техника применения криптографических методов, в частности, методов управления ключами шифрования, аутентификации и паролями доступа к данным и ресурсам приводит к тому, что обычный пользователь невольно «перепоручает» большинство своих обязанностей по работе с ключами системным администраторам. А это, в свою очередь, приводит к таким явлениям как несанкционированный доступ

администраторов баз данных даже к тем их разделам, к которым они доступ заведомо иметь не должны.

Наиболее надежным и удобным, как для пользователей, так и для администраторов базы данных, представляется такой, при котором шифруются отдельные записи на индивидуальных ключах, причем сам процесс шифрования и расшифрования блока данных происходит на компьютере пользователя. а его индивидуальный пользовательский ключ для шифрования данных позволяет сформировать только ключи шифрования расшифрования тех записей базы данных, доступ к которым ему разрешен. При этом пользовательские криптографические ключи могут генерироваться и храниться в защищенной памяти аппаратного токена пользователя. Такого рола схема управления ключами может быть построена по принципу, описанному в работе.

Кроме того, представляется заманчивым использовать гомоморфные шифры, которые позволяют осуществлять управление базой данных непосредственно с зашифрованными записями и не требуют предоставления прав доступа к данным администраторам базы.

Для этого должны быть разработаны достаточно эффективные гомоморфные шифры, которые бы не замедляли работу базы данных на порядок. Это – предмет дальнейших исследований и разработок.

Современные криптографические методы защиты данных не имеют альтернативы ни по надежности защиты, ни по эффективности и удобству пользователей. Однако, неправильное или неаккуратное их применение, в частности, нерешенные проблемы управления ключами пользователей могут свести на нет все эти преимущества.

Важным фактором при выборе криптографических методов защиты в базах данных является структура хранения информации в базах данных и необходимость ее удаленной обработки. Существуют два основных принципа защиты данных на удаленном сервере. Первый предполагает выполнение операций с данными через систему управления базой данных на компьютерах пользователей или промежуточных серверах (прокси-серверах). При такой схеме защиты применяется один тип шифрования ко всей базе данных.

Второй принцип защиты предполагает применение разных типов шифрования для различных полей таблицы, при этом на прокси-серверах кодируются сами данные. При таком применении криптографических методов защиты производить операции над данными и устанавливать систему управления базой данных можно на удаленном сервере (или в облачной инфраструктуре).

Обеспечение эффективной защиты информационных ресурсов предполагает соблюдение высоких критериев комплексности, как необходимого условия сохранения конфиденциальности критически важной информации практически в любых областях деятельности. Система безопасности баз данных представляет собой комплексное решение защиты информации.

Криптография представляет собой лишь часть такой комплексной защиты. В многоуровневой системе безопасности – это последний внутренний уровень защиты. Она используется для аутентификации пользователей, невозможности отказа от совершенного действия (non-repudiation), шифрования пользовательских данных для защиты от несанкционированного просмотра.

Шифрование в криптографии представляет собой способ скрытия данных с помощью ключа или пароля, т. е. хранение и передачу особо важных данных в зашифрованном виде. Исходные данные невозможно получить из зашифрованных без знания соответствующего ключа или пароля для дешифрования. Могут использоваться как симметричные (одноключевые), так и асимметричные (двухключевые) криптосистемы.

В серверах БД на этапе подключения к БД производится идентификация и аутентификация (проверка подлинности) пользователей. В дальнейшем пользователь или процесс получает доступ к данным согласно его набору полномочий. В случае разрыва соединения пользователя с базой данных текущая транзакция откатывается, и при

восстановлении соединения требуется повторная идентификация пользователя и проверка его полномочий.

Наиболее общий способ идентификации и аутентификации – использование имени и пароля. Эта информация оценивается системой для определения, является ли субъект допустимым пользователем. В серверах БД пароли хранятся в зашифрованном виде. Применяется шифрование на основе алгоритма MD5, который использует необратимую хэш-функцию. Требование необратимости обязательно, иначе пароли можно будет получить, используя обратимое шифрование данных. Алгоритм MD5 является усовершенствованным алгоритмом MD4. Алгоритм используется для проверки подлинности данных, когда происходит их передача в зашифрованном виде. Следует отметить, что алгоритм MD5 уязвим к некоторым атакам, например, возможно создание двух сообщений с одинаковой хэш-суммой.

С широким распространением в современном мире электронных форм документов (в том числе и конфиденциальных) и средств их обработки особо актуальной стала проблема установления подлинности и авторства безбумажной документации. Реализация требования невозможности отказа не позволяет, кому бы то ни было отрицать, что он отправил или получил определенный файл или данные. В конце обычного письма или документа исполнитель или ответственное лицо ставит свою подпись. В конце электронного документа ставится электронная цифровая подпись, которую получают, используя алгоритм цифровой подписи, основанный на использовании асимметричных криптоалгоритмов. Например, в основу алгоритма цифровой подписи DSA (Digital Signature Algorithm) в стандарте DSS (Digital Signature Standard), положены асимметричные криптоалгоритмы Эль-Гамала и RSA. При возникновении споров отказаться от подписи невозможно в силу ее неподделываемости, проверить подлинность подписи может любой абонент, знающий открытый ключ.

Что касается шифрования пользовательских данных, то процесс шифрования данных в серверах БД претерпел значительные изменения. Ранее использовалась концепция API, который позволяет обращаться к провайдерам службы шифрования – Cryptographic Service Provider (CSP), реализующим тот или иной алгоритм шифрования. Процедура шифрования была достаточно сложной. Например, в MS SQL Server (до 2005 версии) шифрование реализовывалось с помощью команд API, которые вызывались специальными командами из библиотек MSSQLCryptography.dll [4].

Сложность так же заключалась в объеме кода, который необходимо было прописать для подключения библиотек, обработки ошибок и включения самого шифрования. В него входило объявление библиотек, передача дескриптора, указатели начала и конца текста, размер входных данных и буфера и др. Кроме того при переполнении буфера вызывалась ошибка, которая позволяла исключить возможность извлечения секретных данных путем заполнения буфера лишней информацией.

В настоящее время большинство серверов БД имеют встроенные механизмы шифрования и шифрование стало более доступно и менее ресурсозатратно. Но наличие встроенных механизмов не исключает использования библиотек CryptoAPI, который широко используют приложения БД.

Обычно сервер БД поддерживает несколько встроенных механизмов шифрования: специальные функции шифрования, асимметричные ключи, симметричные ключи, сертификаты, прозрачное шифрование данных – TDE.

Специальные функции шифрования вызываются с передачей параметров. В этом случае можно шифровать отдельные элементы по мере того, как они вставляются, или обновляются в базе данных. Для их вызова удобнее всего использовать хранимые процедуры и триггеры сервера БД.

Асимметричные ключи. Асимметричный ключ состоит из закрытого ключа и соответствующего открытого ключа. Отправитель шифрует данные при помощи открытого ключа получателя, который свободно может получить любой человек или программа. Когда пользователь получает данные, он расшифровывает их при помощи своего закрытого ключа.

Открытый ключ в этом случае расшифровать данные не может. На выполнение асимметричных операций шифрования и дешифрования требуется сравнительно много ресурсов, но они обеспечивают более надежную защиту, чем симметричное шифрование. Асимметричный ключ можно использовать для шифрования симметричного ключа перед его сохранением в базе данных. Использование в асимметричном шифровании пары ключей (в сравнении с симметричным шифрованием, у которого используется только один ключ) повышает сложность криптоанализа для злоумышленника. Обычно в серверах БД встроена реализация асимметричного алгоритма RSA с ключами длиной 512, 1024 и 2048 бит. Чем длиннее ключ, тем сложнее осуществить его вскрытие, но и тем дольше будут выполняться операции шифрования и дешифрования.

При использовании асимметричных криптоалгоритмов возникает проблема распространения множества открытых ключей, которая решается с помощью построения Инфраструктуры Открытых Ключей (Public Key Infrastructure – PKI), на основе базы данных цифровых сертификатов.

Симметричные ключи используются как для шифрования данных, так и для шифрования других ключей. При шифровании симметричными ключами отправитель и получатель имеют один и тот же ключ. Главное преимущество такого подхода состоит в том, что производительность шифрования и дешифрования гораздо выше, чем при использовании асимметричных ключей. Данные при использовании симметричного ключа шифруются и дешифруются быстро, и он вполне подходит для повседневной защиты конфиденциальных данных, хранящихся в базе данных. Обычно в серверах БД встроена реализация нескольких наиболее распространенных и надежных симметричных алгоритмов, как блочных, так и поточных: DES, Triple\_DES, Triple\_DES\_3KEY, DESX, RC2, RC4, RC4\_128, AES с ключами длиной 128 (Rijndael), 192 и 256 бит.

Сертификаты – это по существу асимметричные ключи, которые содержат дополнительные метаданные. Эти метаданные включают в себя такую информацию, как время окончания и центр сертификации, выдавший данный сертификат. В случае если необходимо удостовериться в том, что отправитель или получатель данных является тем за кого себя выдает, сертификаты помогают решить эту проблему. Центры сертификации создают сертификат со своей подписью, который отправляется тому пользователю, который его заказал. Когда он будет использовать этот сертификат для отправки данных, получатель сможет проверить его в центре сертификации и удостовериться в подлинности отправителя. Отличие сертификатов от ключей состоит в задании промежутка времени, в течение которых они действуют и уникальных метаданных, указывающих на владельца сертификата. Существуют самозаверительные сертификаты. Например, в своих последних версиях MS SQL Server автоматически создает самозаверительный сертификат при своем первом запуске. Этот сертификат используется для шифрования подключения при выполнении аутентификации MS SQL Server. TDE (Transparent Data Encryption) – прозрачное шифрование данных. Прозрачное шифрование данных (TDE) является особым случаем шифрования с использованием симметричного ключа.

#### Литература

1. Шаньгин, В.Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях / В.Ф. Шаньгин. – М. : ДМК Пресс, 2012. – 592 с.
2. Баричев, С.Г. Основы современной криптографии / С.Г. Баричев, В.В. Гончаров, Р.Е. Серов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2001. – 120 с.
3. Назначение Secret Disk Server NG // [http://www.aladdm-rd.ru/catalog/secret\\_disk/server/2016/](http://www.aladdm-rd.ru/catalog/secret_disk/server/2016/).

УДК 621.3

## ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПРОЛЕТОВ ТИПОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОРУ 110–330 КВ

Шкловский И.С., Зарихта К.С.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Пономаренко Е.Г.

Под электродинамической стойкостью гибких проводов электроустановок понимают их способность противостоять электродинамическому действию токов короткого замыкания (КЗ) до и после автоматического отключения цепи КЗ без повреждений. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) указывает на ток КЗ в 20 кА, по достижении которого необходимо производить расчет гибких шин на электродинамическую стойкость. С возрастанием токов КЗ их электродинамическое действие становится ключевым фактором, определяющим габариты и механические характеристики токоведущих конструкций с гибкими проводами при проектировании.

Гибкость проводов распределительных устройств позволяет им принимать форму, обусловленную внешними нагрузками. При протекании по ним токов КЗ проводники соседних фаз начинают взаимодействовать: вначале они отталкиваются, затем сближаются. В результате может произойти их сближение на недопустимо малое расстояние по условию электрической прочности изоляционного промежутка.

Наибольшие сближения проводников соседних фаз в пролетах наблюдаются при двухфазных коротких замыканиях. Таким образом, более вероятное КЗ на отходящих воздушных линиях электропередачи (ЛЭП) может сопровождаться вторичным КЗ на шинах распределительного устройства (РУ) из-за их недопустимого сближения с последующим отключением всех присоединений. При схлестывании большие токи КЗ ведут к пережогу проволок проводов, что может явиться причиной их обрыва.

Параметры электродинамической стойкости разных видов оборудования к токам короткого замыкания устанавливаются заводами-изготовителями. Как правило, в качестве указанного параметра принимается наибольшее действующее значение начального периодического тока КЗ или ударный ток КЗ, электродинамическое действие которого выдерживает электрооборудование в течение времени автоматического отключения цепи без повреждений, препятствующих его дальнейшей исправной работе. Для проводников главных схем электростанций и подстанций токи электродинамической стойкости указываются только для комплектных токопроводов, которые поставляются на место установки в готовом виде.

Для жестких и гибких шин ток электродинамической стойкости зависит не только от физико-механических параметров, но и геометрических характеристик пролета распределительного устройства и способа установки отдельных фаз друг относительно друга. Поэтому токи электродинамической стойкости для указанных токоведущих частей электроустановок энергосистем могут быть определены при их проектировании или реконструкции распределительного устройств.

ПУЭ предписывают проверять на схлестывание или недопустимое сближение гибкие провода РУ, если ток КЗ равняется или превышает значение в 20 кА. Отсюда можно сделать вывод, что ток электродинамической стойкости гибких шин должен быть не менее 20 кА. Однако большинство современных электрических аппаратов высокого напряжения имеют токи электродинамической стойкости значительно более 20 кА. К тому же отметим, что токи КЗ, например, на стороне 110 кВ в отдельных частях Белорусской энергосистемы уже превысили 40 кА. Поэтому актуальной задачей является как определение токов электродинамической стойкости сборных шин РУ, так и анализ способов их повышения в соответствии с требованиями практики сегодняшнего дня.

Ток, при котором минимальные расстояния между проводниками фаз, а также между проводниками и заземленными частями не превышают допустимых изоляционных

расстояний, определяемых при рабочих напряжениях, считается током электродинамической стойкость гибких шин.

Определение токов электродинамической стойкости несколько усложняется тем, что в пролетах применяются провода с разными сечениями, разные типы изоляторов в гирлянде, что, безусловно, влияет на величину тока электродинамической стойкости.

Численные эксперименты показывают, что наибольшие сближения проводников соседних фаз в пролетах с отпайками наблюдаются при двухфазных коротких замыканиях. Это объясняется тем, что при трехфазном коротком замыкании средняя фаза получает значительно меньший импульс электродинамических усилий (ЭДУ), чем крайние фазы, и движется преимущественно в вертикальном направлении. При двухфазном коротком замыкании фазы, участвующие в процессе, получают близкие по величине импульсы и движутся практически с одинаковой скоростью как при отталкивании, так и при сближении.

В некоторых конструкциях ячейкового пролета существует опасность сближения спусков соседних фаз, так как они находятся непосредственно под шинами в одной плоскости. В месте крепления к шине спуск повторяет ее движение. После прохождения точки наибольшего сближения шины начинают удаляться друг от друга, при этом соседние спуски некоторое время продолжают сближаться по инерции за счет изгиба. Сближение спусков, таким образом, может оказаться большим, чем сближение шин.

В целом при выборе расчетных климатических режимов следует ориентироваться на сочетание климатических условий, предложенные ПУЭ для расчета воздушных линий (ВЛ) и ОРУ. Наибольшему сближению проводников способствуют режимы с максимальной температурой, так как при этом гибкие шины имеют максимальный провес, а соответственно и большие горизонтальные отклонения. Если шины ОРУ могут быть длительно загружены током, близким по величине к допустимому, то максимальная температура провода должна быть принята равной 70 °С. В качестве расчетного следует рассматривать также режим с максимальным скоростным напором ветра.

Характер движения гибких шин при КЗ, их траектории, максимальные отклонения, сближения и тяжения зависят от продолжительности КЗ. Очевидно, что наибольшее электродинамическое воздействие на провода оказывают КЗ с наибольшей продолжительностью, когда импульс ЭДУ имеет максимальное значение. Поэтому в качестве расчетных следует рассматривать такие режимы, когда продолжительность КЗ будет наибольшей.

Повторное КЗ в цикле неуспешного автоматического повторного включения (АПВ) при некоторых продолжительностях бестоковой паузы, как показывают численные расчеты, может привести к большему сближению проводников. Однако для пролетов с отпайками это влияние незначительно. Основная опасность неуспешного АПВ в том, что перед повторным КЗ шины соседних фаз могут достигнуть своего максимального сближения. Тогда в момент включения тока повторного КЗ ЭДУ значительно возрастают, что приводит к увеличению отклонений, а также механических усилий в проводниках, опорных и изоляционных конструкциях. При достаточном уровне остаточного напряжения на шинах в этот момент возможен пробой воздушного изоляционного промежутка.

Компьютерный расчет токов электродинамической стойкости пролетов типовых ОРУ 110–330 кВ производится с помощью, разработанной на кафедре «Электрические станции» БНТУ компьютерной программы FleBus. В ней применяется расчетная модель провода в виде гибкой упругой нити.

### Литература

1. Сергей, И.И. Анализ токов электродинамической стойкости гибких проводов электроустановок / И.И. Сергей, Е.Г. Пономаренко // Энергетика. (Изв. выс. учеб. заведений и энерг. объедин. СНГ). – 2009. – № 1. – С. 10–18.

2. Васильев, А. А. Электрическая часть станций и подстанций : учеб. пособие для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков. – 2-е изд., доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

УДК 621.3

## ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ

Юсенис Я.И.

Научный руководитель – Климкович П.И.

Программно-технические комплексы представляют собой совокупность микропроцессорных средств автоматизации (микропроцессорных контроллеров, устройств связи с объектом УСО), дисплейных пультов оператора и серверов различного назначения, промышленных сетей, которые позволяют связать перечисленные компоненты, программного обеспечения контроллеров и дисплейных пультов оператора. ПТК предназначены, в первую очередь, для создания распределенных систем управления технологическими процессами различной информационной мощности (от десятков входных/выходных сигналов до сотни тысяч) в самых разных отраслях промышленности.

Закладываемые при разработке ПТК принципы типизации, унификации и агрегатирования позволяют добиться полной совместимости всех элементов комплекса, включая контроллеры, УСО, дисплейные пульта оператора, интерфейсы и протоколы сетевого обмена и др. Такой подход позволяет существенно снизить время на проектирование и монтаж АСУ ТП, проведение пуско-наладочных работ.

Все универсальные микропроцессорные ПТК подразделяются на классы, каждый из которых рассчитан на определенный набор выполняемых функций и соответствующий объем получаемой и обрабатываемой информации об объекте управления:

- Контроллер на базе персонального компьютера (PC).
- Локальный программируемый контроллер (plc).
- Сетевой комплекс контроллеров (plc, network).
- Распределенные маломасштабные системы управления (dcs, smaller scale).
- Полномасштабные распределенные системы управления (dcs, full scale).

В настоящее время на рынке промышленной автоматизации присутствует несколько сотен самых разнообразных ПТК как отечественных, так и зарубежных производителей. Все они отличаются своей структурой, информационной мощностью, эксплуатационными характеристиками (диапазон температур, влажности, возможность использования во взрыво- и пожароопасных производствах), стоимостью и др.

Современные ПТК, как правило, включают станции инжиниринга, выполненные на базе персональных компьютеров в офисном исполнении. С их помощью осуществляется инженерное обслуживание контроллеров: программирование, наладка, настройка. В некоторых ПТК станции инжиниринга позволяют производить также инженерное обслуживание рабочих станций.

Еще одна сторона современных ПТК связана с активным проникновением Internet-технологий на уровень промышленной автоматизации. Сегодня все ведущие производители инструментального программного обеспечения для систем управления технологическими процессами, как зарубежные, так и отечественные, встраивают поддержку данных технологий в свои продукты.

### Литература

1. Автоматизированные системы управления технологическими процессами [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/031/66031/37473?p\\_page=1](http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/031/66031/37473?p_page=1). – Дата доступа : 27.04.2018.

УДК 621.3

## АККУМУЛИРУЮЩИЕ ПЛИТЫ

Плехов П.Ю., Чусовитин Д.С., Яроменок А.Е.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.

Мы видим свою цель в том, чтобы заставить работать ту энергию, которая обычно теряется. Ежедневно, даже работая в офисах, люди проделывают пеший путь длиной в тысячи шагов. При этом расходуется немалое количество энергии, но она кроме собственно передвижения не приносит никакой пользы. А есть ведь способы заставить работать её во благо.

Мы хотим превратить механическую энергию наших шагов, передаваемых на поверхность, по которой мы ходим, в электрическую. Давление ноги на поверхность при одном шаге создает от 5 до 7 джоулей энергии, что означает, что от каждого шага можно собирать от 5 до 7 ватт электроэнергии. В последствии эту энергию можно аккумулировать и использовать для освещения, зарядки гаджетов и прочих малопотребляющих электроприборов.

Этот принцип и механизм запатентовал 26-летний (Кембалл-Кук, 2018) на последнем году обучения в Университете Лафборо в 2009 году [1]. Через некоторое время он создал прототип данного покрытия и основал успешную на сей день компанию по разработке плит для аккумулирования энергии от механического воздействия PavegenSystems. Данная продукция находит успешное применение в школах, на танцполах, футбольных стадионах, тротуарной плитке и даже в тренажерных залах. Успех плиток уже был доказан в Школе грамматики SimonLangton в Кенте. С 2010 года затраты на освещение сократились благодаря плитам Pavegen более чем на 50 %. Однако производство находится только в Лондоне и доступно только под заказ (минимум 2×4 м). В РБ аналогов не существует. Пока что.

Перейдем к технической составляющей нашего проекта:

Умная плитка от Pavegen вырабатывает электроэнергию за счет пьезоэлементов.

Пьезоэлемент – электромеханический преобразователь, с помощью которого механическая энергия преобразуется в электрическую (прямой пьезоэффект), а электрическая в механическую (обратный пьезоэффект).

Пьезоэлектрические вещества (пьезоэлектрики), в частности пьезокерамика, имеет то свойство, что при деформации под действием внешнего механического давления на их поверхности возникают электрические заряды. Этот эффект называется прямым пьезоэлектрическим эффектом и был открыт в 1880 г. братьями Кюри.

Пьезоэлектрические вещества всегда обладают одновременно и прямым, и обратным пьезоэффектом [2]. Не обязательно, чтобы вещество было монокристаллом, эффект наблюдается и в поликристаллических веществах, предварительно поляризованных сильным электрическим полем во время кристаллизации, или при фазовом переходе в точке температуры Кюри при охлаждении для сегнетоэлектриков (керамические пьезоэлектрические материалы на основе цирконата-титаната свинца) при наложенном внешнем электрическом поле.

Полная энергия, сообщенная пьезоэлементу внешней механической силой, равна сумме энергии упругой деформации и энергии заряда ёмкости пьезоэлемента. Вследствие обратимости пьезоэффекта возникает пьезоэлектрическая реакция: возникшее вследствие прямого пьезоэффекта электрическое напряжение создаёт (в результате обратного пьезоэффекта) механические напряжения и деформации, противодействующие внешним силам. Это проявляется в увеличении жесткости пьезоэлемента. Если электрическое напряжение, возникающее вследствие пьезоэффекта, исключить, например, закоротив электроды пьезоэлемента, то обратного пьезоэлектрического действия наблюдаться не будет и произойдёт уменьшение жесткости пьезоэлемента.

Исследования пьезоэффекта показали, что он объясняется свойством элементарной ячейки структуры материала. Так как элементарная ячейка является наименьшей симметричной единицей материала, путём её многократного повторения можно получить микроскопический кристалл. Необходимой предпосылкой для появления пьезоэффекта является отсутствие центра симметрии в элементарной ячейке.

Механическое сжатие или растяжение, действующее на пьезоэлектрическую пластину параллельно направлению поляризации, приводит к деформации всех элементарных ячеек. При этом центры тяжести зарядов взаимно смещаются внутри элементарных ячеек, и в результате получается заряд на поверхности.

Связь между приложенной силой и результирующим ответом пьезоэлемента зависит от: пьезоэлектрических свойств пьезокерамики, размера и форм образца, направления электрического и механического возбуждения.

Процесс изготовления пьезокерамики разделяется на несколько этапов [3]. При осуществлении синтеза заданного сегнетоэлектрического соединения исходное сырьё (окислы или соли, например, двуокись титана и окись бария) измельчается и смешивается в количествах, соответствующих стехиометрическому составу соединения, а затем подвергается термической обработке при температурах 900–1300 °С, в процессе которой происходит химический синтез. Используется также так называемый метод осаждения из водных растворов, при котором температура синтеза благодаря идеальному перемешиванию компонентов снижается до 750–1000 °С. Из порошкообразного синтезированного материала прессованием (а также литьём под давлением) получают заготовки необходимой конфигурации и размеров для будущих пьезоэлементов, которые затем подвергаются обжигу по строго определенному температурному режиму, в большой степени определяющему свойства пьезокерамики. Механическая обработка детали после обжига обеспечивает ей точно заданную форму и размеры. На деталь наносятся электроды из серебра, никеля, платины и др., причем наибольшее распространение получил метод вжигания серебра. Для поляризации керамики к электродам подводится электрическое напряжение. С целью уменьшения напряженности поля  $E$  при поляризации образец нагревают до температур, близких к точке Кюри (т. к. при этом домены обладают большей подвижностью), а затем медленно охлаждают в присутствии поля.

Пьезоэлектрические материалы нашли применение в широком ряде областей, таких как медицинские инструменты, контроль промышленных процессов, системах производства полупроводников, бытовых электрических приборах, системах контроля связи, различных измерительных приборах и в других областях. Коммерческие системы, которые используют пьезоэлектрические материалы – помпы, швейные машины, датчики (давления, обледенения, угловых скоростей и т. д.), оптические инструменты, лазерные принтеры, моторы для автофокусировки камер и многие другие. При этом область применения данных материалов постоянно растет. Применение пьезоэлемента обычно сводится к четырем категориям: сенсоры, генераторы, силовые приводы, и преобразователи.

В генераторах, пьезоэлектрические материалы могут генерировать напряжение, которого достаточно для возникновения искры между электродами, и таким образом могут быть использованы как электроды для воспламенения топлива, для газовых плит и для сварочного оборудования. Альтернативно, электрическая энергия, генерируемая пьезоэлектрическими элементами, может накапливаться. Такие генераторы являются превосходными твердыми аккумуляторными батареями для электронных схем [4, 5].

Перейдем к коммерческой модели.

Альтернативные источники энергии представляют громадный бизнес-потенциал для бизнеса в Беларуси. Существуют десятки доходных проектов, реализованные в странах Северной Америки и Европы, но не представленные в РБ. Отчасти причина – в скромном интересе к подобным проектам со стороны государства. Кризис вынуждает предпринимателей обращать внимание на экономные бизнес-идеи, связанные с альтернативной энергетикой. Одна из таких идей – укладка на улицах, в офисных коридорах,

торговых центрах и других местах массового скопления людей специального покрытия, аккумулирующего кинетическую энергию шагов и преобразующего ее в электрическую. На наш взгляд самыми эффективными местами являются пункты входа | выхода из метро, танцпол в ночных клубах, футбольное поле, входы | выходы в корпуса БНТУ и даже тренажёрный зал.

Плитка эстетично выглядит и легко монтируется. Плиты умеют не только преобразовывать, но и накапливать энергию, что обещает сделать инновационные плитки перспективной идеей 2018–2019 года для бизнеса. Можно только догадываться, какой доход способно принести подобное покрытие в больших городах. Также невозможно не отметить экологический эффект данного типа выработки электроэнергии, так как для производства можно использовать вторичные материалы (сталь, алюминий, резина), тем самым поддерживая безотходное производство. В зависимости от использования, срок окупаемости одной плитки, по нашей оценке, может составлять всего один год. А срок эксплуатации каждой плитки, по оценкам экспертов, составляет 5 лет, или 20 миллионов шагов.

Важное уточнение! Поскольку бизнес имеет социальную окраску, его доходность зависит от интереса чиновников к подобному проекту. В плюсе будет тот, кто сумеет организовать укладку такого покрытия с одобрения и вместе с городскими властями.

Для производства аккумулирующих плит исходя из способа изготовления нам потребуется: оксид бария (диоксид титана) и оборудование для его обработки (пьезоэлемент) и сталь, алюминий, композит (нажимая пластина). Всё сырьё доступно. Однако плитки и пьезоэлементы можно закупать сразу цельными, что значительно снизит начальные инвестиции, после чего собирать отдельные части в единый цельный механизм. В итоге мы имеем: по оценкам экспертов, плитка, установленная в оживленном месте, принимает 1,2 шага в 10 секунд; каждое нажатие генерирует 5 Вт энергии; стоимость 1 кВт·ч энергии в РБ на 2018 год составляет 0,1218 рублей.

Экономия электроэнергии одной плитки в год составит 1200 \$, что уже окупит плитку и обеспечит дальнейшую выгоду в течение оставшихся 4 лет службы.

В перспективе процесс изготовления будет упрощён и удешевлен, что положительно скажется на возможностях установки плит во множестве мест вплоть до использования повсеместно и даже вывода данного типа выработки энергии на государственный уровень наряду с действующими электростанциями.

#### Литература

1. Лоуренс Кембалл Кук, Pavegen.com, 2018.
2. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Т. I. Механика / Д.В. Сивухин. – М., 1979.
3. ОСТ 11 0444-87. Материалы пьезокерамические.
4. Голямина, И.П. Ультразвук / И.П. Голямина. – М. : Советская энциклопедия, 1979.
5. Крауткремер, Й. Справочник. Ультразвуковой контроль материалов / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – М. : Металлургия, 1991.

УДК 621.3

## ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИХ РЕАКТОРОВ

Позняк Д.О., Войтович А.В.

Научный руководитель – доцент Бобко Н.Н.

Основными потребителями токоограничивающих реакторов являются генерирующие станции, распределительные подстанции, электрические сети, крупные промышленные предприятия, энергоемкие объекты инфраструктуры.

Наиболее современными и инновационными являются сухие реакторы (РТСТ), которые пришли на смену существующим, благодаря своим значительным преимуществам перед конструкциями другого типа. Основными достоинствами РТСТ являются их массогабаритные показатели, срок службы и электродинамическая стойкость.

Разные производители сухих реакторов предлагают различные конструктивные решения основных составляющих элементов токоограничивающего реактора, таких как:

- обмотки;
- прессующая система;
- изоляторы;
- вводные и выводные шины;
- крепление реактора к фундаменту.

Наиболее прогрессивной и технологичной считается конструкция реакторов, обмотки которых изготавливаются из алюминиевой ленты. Обмотки надежно скрепляются с помощью конструкций, выполненных из немагнитного материала. Изоляция реактора состоит из изоляции проводника, межслоевой изоляции и пропиточного лака. Пропитка лаком осуществляется методом вакуум-давления, являющимся самым эффективным и позволяющим в максимальной степени использовать полезные свойства лака. Плотная намотка ленточного проводника в сочетании с пропиткой делает конструкцию очень жесткой и устойчивой к механическим и электродинамическим нагрузкам в аварийных режимах.

Одним из преимуществ сухих реакторов, является высокая динамическая стойкость. Что стало возможным благодаря применению современных изоляционных материалов и технологических особенностей производства.

Другим преимуществом является повышенная энергоэффективность. Разработанная компанией «Трансформер» уникальная математическая модель процессов, протекающих в ленточной обмотке, позволила в значительной степени снизить дополнительные потери за счет оптимизации сечения ленты и геометрии обмоток. Ленточная технология в совокупности с применением данной модели обеспечивают высокую энергоэффективность оборудования.

Токоограничивающие реакторы РТСТ являются более компактными в сравнении с бетонным аналогом. Сухие реакторы позволяют эффективно заменить бетонные реакторы в существующей камере с увеличением числа подключений.

РТСТ выдерживают значительные электродинамические нагрузки в аварийных режимах. В совокупности с инновационным проектированием, возникающие в аварийном режиме в обмотке электродинамические усилия распределяются по всей высоте ленты, а не сосредотачивать в отдельных проводниках.

Основной недостаток реакторов из ленты состоит в наличии мощного эффекта вытеснения тока, что предъявляет повышенные требования как к методикам их расчета, так и к технологии производства. Поэтому остается актуальным производство сухих реакторов с проводниками в виде кабелей или многожильного провода, что создает конкурентную среду в этой области, способствующую дальнейшему развитию существующих и появлению новых конструкций и технологий производства реакторов.

УДК 621.3

## ПАКЕТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕХНИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ MATLAB

Журкевич В.В.

Научный руководитель – Климкович П.И.

MatLab (Matrix Laboratory) – это пакет прикладных программ, предназначенный для решения задач технических вычислений.

Как язык программирования MatLab был разработан в конце 1970-х годов Кливом Моулером, в университете Нью-Мексико. MatLab – это высокоуровневый интерпретируемый язык программирования, отличительной особенностью которого является оперирование с векторами и матрицами.

На сегодняшний день насчитывается более одного миллиона пользователей MatLab.

Simulink – это система имитационного блочного моделирования динамических систем, являющаяся подсистемой MatLab. Средства моделирования Simulink основываются на программных средствах MatLab, но позволяют обойтись без использования в явном виде языка MatLab и создавать модели из стандартных блоков в графическом виде. При необходимости дополнительные блоки могут быть написаны пользователем как на языке MatLab, так и на других языках (С, VHDL и др.).

Визуальное представление дает возможность значительно упростить процесс создания модели, поиска ошибок, модификации модели другими пользователями, что в целом позволяет добиваться результатов гораздо быстрее, чем при использовании языка MatLab в чистом виде. Кроме того, пользователю предоставляется возможность автоматической генерации кода на языках С++, VHDL, Verilog по созданной модели, что позволяет переносить модель системы сразу после отладки на кристалл (микроконтроллеры, ПЛИС).

Вычислительная система MatLab предназначена для выполнения сложных инженерных, научно-технических расчетов практически в любой области науки и техники, и особенно подходит для математического моделирования в области электротехники, радиотехники, автоматики. В MatLab входит система динамического моделирования Simulink, которая содержит большое количество библиотечных модулей различных радиотехнических, электронных и электротехнических элементов и устройств.

При составлении моделей сложных систем может использоваться в нужном количестве библиотечные модули источников сигналов, функциональных элементов систем автоматического регулирования, устройств электроэнергетических систем, в том числе и в трехфазном исполнении (синхронные и асинхронные электродвигатели, генераторы, трансформаторы, линии электропередачи, выключатели и др.).

Важнейшей особенностью MatLab является возможность создания пользователем своих библиотечных модулей, которые включаются в состав библиотеки Simulink.

При проведении исследований в среде MatLab переходных и аварийных режимов электроэнергетических систем не всегда удается получить результаты, в точности, совпадающие с результатами математического моделирования, полученными традиционным способом.

Это отличие получается вследствие различной степени точности представления реальных объектов математическими моделями, используемыми в MatLab и при реализации программ вычислительного эксперимента разными авторами.

Компьютерные системы, такие как MatLab, позволяют исследовать различные режимы работы электротехнических и электронных устройств, проводя вычислительный эксперимент в среде самой системы динамического моделирования. При этом используются модели, имеющиеся в библиотеке моделирующей системы, а математические уравнения моделей устройств или сложных систем, формируются и решаются автоматически.

Таким образом, при использовании систем динамического моделирования исключаются такие этапы математического моделирования, как составление математического описания объектов, разработка алгоритмов решения математических моделей и написание компьютерных программ вычислительного эксперимента.

Эти этапы заменяются в системах динамического моделирования этапом создания модели исследуемого объекта из стандартных модулей, имеющихся в библиотеке моделирующей системы.

Основным недостатком такого способа реализации математического моделирования является либо отсутствие в библиотеке системы динамического моделирования стандартных модулей, необходимых для построения модели реального устройства, либо упрощенное представление объекта библиотечным модулем, неприемлемое в условиях исследования конкретных режимов его работы.

Устранение этого недостатка может решаться созданием новых модулей самим пользователем и включением их в библиотеку. Возможность пополнения библиотеки модулями пользователя придает системам динамического моделирования практически безграничные возможности по проведению вычислительного эксперимента.

Программа Simulink является приложением к пакету MatLab. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым, пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования, пользователю не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний, требующихся при работе на компьютере и, естественно, знаний той предметной области в которой он работает.

Simulink является достаточно самостоятельным инструментом MatLab. В нем имеются библиотеки блоков для разных областей применения (например, Power System Blockset - моделирование электротехнических устройств, Digital Signal Processing Blockset – набор блоков для разработки цифровых устройств и т. д.).

При моделировании можно выбирать метод решения дифференциальных уравнений, а также способ изменения модельного времени (с фиксированным или переменным шагом). В ходе моделирования имеется возможность следить за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные устройства наблюдения, входящие в состав библиотеки Simulink. Результаты моделирования могут быть представлены в виде графиков или таблиц.

Преимущество Simulink заключается также в том, что он позволяет пополнять библиотеки блоков с помощью подпрограмм написанных как на языке MatLab, так и на языках C++, Fortran и Ada.

#### Литература

1. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

УДК 621.3

## ПРОБЛЕМА ВНЕДРЕНИЯ АЭС В БЕЛАРУСИ

Смоляков Е.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.

Вопрос строительства Белорусской атомной электростанции поднимался еще в 1990-х годах. Было определено более 72 площадок, которые пригодны для размещения и строительства станции. Из них было выбрано 4 возможных варианта: Верходвинская, Краснополянская, Кукшиновская и Островецкая площадки. В ноябре 2008 года в результате тщательного отсеивания в качестве окончательного места для строительства АЭС была выбрана Островецкая площадка.

По данным геофизических изысканий и проведенным сейсморазведочным работам величина проектного землетрясения определена на уровне 6 баллов, что не влияет на безопасность, современные движения земной коры не превышают нормативных значений, основанием основных сооружений будут служить глинистые и песчаные грунты прочные и средней прочности. Площадка обеспечена ресурсами пресных подземных вод (для питьевых нужд). По результатам гидрологических исследований основным источником технического водоснабжения для подпитки системы охлаждения АЭС является река Вилия. Длина технических водоводов составит около 6 км. Существует источник резервного водоснабжения – водохранилище Ольховской ГЭС. Несущая способность грунтов высокая. Грунтовые воды безнапорные, залегают на глубинах более 15 м. По результатам изучения условий землепользования выявлено, что 90 % земель – сельскохозяйственные угодья. К зонам радиоактивного загрязнения указанная площадка не относится. Протяженность подъездных железнодорожных путей составит около 32 км, автомобильных дорог – 4 км от трассы Р-48. Запрещающих и неблагоприятных факторов для размещения АЭС нет.

Целесообразность строительства атомной электростанции в Республике Беларусь обусловлена следующими факторами:

- низкой обеспеченностью собственными топливными ресурсами;
- необходимостью диверсификации видов энергоносителей и замещения части импортируемых ископаемых природных ресурсов – природного газа и нефти;
- возможностью снижения себестоимости производимой энергосистемой электроэнергии; возможностью производства электроэнергии с целью экспорта;
- включение в энергобаланс Республики Беларусь ядерного топлива позволит повысить экономическую и энергетическую безопасность страны;
- замещается значительная часть импортируемых энергоресурсов (до 5,0 млн. тонн условного топлива в год) и изменяется структура топливно-энергетического баланса страны;
- введение в энергобаланс АЭС приведет к снижению себестоимости производимой энергосистемой электроэнергии за счет уменьшения затрат на топливо;
- работа атомных электростанций в значительно меньшей мере зависит от непрерывности поставок и колебаний цен на топливо, чем станций на органическом топливе;
- строительство АЭС приводит к необходимости решения вопроса включения данной станции в белорусскую энергосистему с наименьшими потерями с экономической и энергетической стороны.

С конца 1960-х годов начинается бум ядерной энергетики. В это время возникло две иллюзии, связанные с ядерной энергетикой. Считалось, что энергетические ядерные реакторы достаточно безопасны, а системы слежения и контроля, защитные экраны и обученный персонал гарантируют их безаварийную работу, а также считалось, что ядерная энергетика является «экологически чистой», т. к. обеспечивает снижение выброса парниковых газов при замещении энергетических установок, работающих на ископаемом топливе.

Иллюзия о безопасности ядерной энергетики была разрушена после нескольких больших аварий в Великобритании, США и СССР, апофеозом которых стала катастрофа на

чернобыльской АЭС. Катастрофа в Чернобыле показала, что потери при аварии на ядерном энергетическом реакторе на несколько порядков превышают потери при аварии на энергетической установке такой же мощности, использующей ископаемое топливо. В эпицентре аварии уровень загрязнения был настолько высок, что население ряда районов пришлось эвакуировать, а почвы, поверхностные воды, растительный покров оказались радиоактивно зараженными на многие десятилетия. При этом в отношении чернобыльского выброса многое остается неизвестным, и риск здоровью населения от аварийных выбросов этой АЭС существенно занижен, т. к. в большинстве стран СНГ отсутствует хорошая медицинская статистика. Рядом исследователей США было установлено, что с мая по август 1986 года, наблюдался значительный рост общего числа смертей среди населения, высокая младенческая смертность, а также пониженная рождаемость, связанные с высокой концентрацией радиоактивного йода – 131 из чернобыльского облака, накрывшего США.

За четыре летних месяца возросло количество смертей от пневмонии, разных видов инфекционных заболеваний, СПИДа по сравнению со средним числом смертей за этот период в 1983–85 годах. Все это с высокой статистически достоверной вероятностью связано с поражением иммунной системы чернобыльскими выбросами. Такой же точной статистики нет и для большинства других стран, исключая Германию. На юге Германии, где чернобыльские выпадения были особенно интенсивными, младенческая смертность возросла на 35 %.

Стоит отметить, что при строительстве белорусской АЭС уделено достаточно внимания вопросам безопасности самой станции. В проекте применяются самые современные средства и системы безопасности: четыре канала систем безопасности (дублирующие друг друга), устройство локализации расплава, двойная защитная оболочка здания реактора, система удаления водорода, системы пассивного отвода тепла; предусмотрена защита станции от разнообразных внешних воздействий.

Высокая степень безопасности Белорусской АЭС обеспечена множеством факторов. Основные из них – это принцип самозащитности реакторной установки, наличие нескольких барьеров безопасности и многократное дублирование каналов безопасности. Необходимо отметить также применение активных (то есть требующих вмешательства человека и наличия источника энергоснабжения) и пассивных (не требующих вмешательства оператора и источника энергии) систем безопасности.

Система безопасности современных российских АЭС состоит из четырех барьеров на пути распространения ионизирующих излучений и радиоактивных веществ в окружающую среду [1]. Первый – это топливная матрица, предотвращающая выход продуктов деления под оболочку тепловыделяющего элемента. Второй – сама оболочка тепловыделяющего элемента, не дающая продуктам деления попасть в теплоноситель главного циркуляционного контура. Третий – главный циркуляционный контур, препятствующий выходу продуктов деления под защитную герметичную оболочку. Наконец, четвертый – это система защитных герметичных оболочек, исключая выход продуктов деления в окружающую среду.

Однако опасность ядерной энергетики лежит не только в сфере аварий и катастроф. Даже без них около 250 радиоактивных изотопов попадают в окружающую среду в результате работы ядерных реакторов. Эти радиоактивные частицы вместе с водой, пылью, пищей и воздухом попадают в организмы людей, животных, вызывая раковые заболевания, дефекты при рождении, снижение уровня иммунной системы и увеличивают общую заболеваемость населения, проживающего вокруг ядерных установок.

Департамент общественного здравоохранения штата Массачусетс с 1990 года установил, что у людей, живущих и работающих в двадцатимильной зоне АЭС «Пилигрим», около города Плимут, в 4 раза выше заболеваемость лейкемией, чем ожидалось. Статистически заметное увеличение случаев заболеваний лейкемией и раком обнаружено в окрестностях АЭС «Троян» в городе Портленд, штат Орегон. Заболеваемость лейкемией детей в поселке около британского ядерного центра в Селлафилде в 10 раз выше, чем в

среднем по стране, и, несомненно, связана с его работой. Это стало известно в 1990 году, а недавно официально подтверждено Британским комитетом по радиологии.

Даже когда АЭС работает нормально, она обязательно выбрасывает изрядное количество радиоактивных изотопов инертных газов. Также как радиоактивный йод концентрируется в щитовидной железе, вызывая ее поражение, радиоизотопы инертных газов, в 70-е годы, считавшиеся абсолютно безвредными для всего живого, накапливаются в некоторых клеточных структурах растений хлоропластах, митохондриях и клеточных мембранах.

Радиоизотопы газов вызывают и такой феномен как столбы ионизированного воздуха над АЭС. Эти образования могут наблюдаться с помощью обыкновенных радиолокаторов на расстоянии в сотни километров от любой АЭС. Одним из основных выбрасываемых инертных газов является криптон-85. Уже сейчас ясна его роль в изменении электропроводности атмосферы. Количество криптона-85 в атмосфере (в основном за счет работы АЭС) увеличивается на 5 % в год. Уже сейчас количество криптона-85 в атмосфере в миллионы раз выше, чем до начала атомной эры. Этот газ в атмосфере ведет себя как тепличный газ, внося тем самым вклад в антропогенное изменение климата Земли. Криптон трудно улавливается фильтрами и очень подвижен в атмосфере (в том числе и потому, что не поглощается ни Мировым океаном, ни почвами). Масштабы образования криптона-85 при работе реактора на несколько порядков выше, чем всех остальных радионуклидов. Криптон как химический элемент не вовлекается в биологические процессы. Однако он поглощается тканями тела при дыхании и хорошо растворяется в жировых тканях человека и животного, блокируя электропроводность тканей. Малые дозы облучения криптоном-85 повышают частоту рака кожи, он очень опасен для беременных. Количество криптона-85 в атмосфере ежегодно увеличивается. Сейчас содержание криптона-85 в атмосфере в миллионы раз выше, чем до «начала атомной эры».

Нельзя не упомянуть и проблему другого бета-излучателя, образующегося при всякой нормальной работе АЭС, трития, или радиоактивного водорода. Доказано, что он легко связывается с протоплазмой живых клеток и тысячекратно накапливается в пищевых цепочках. Кроме того, надо добавить загрязнение тритием грунтовых вод практически вокруг всех АЭС. Ничего хорошего от замещения части молекул воды в живых организмах тритием ждать не приходится. Когда тритий распадается (период полураспада 12,3 года), он превращается в гелий и испускает сильное бета-излучение. Это особенно опасно для живых организмов, так как может поражать генетический аппарат клеток.

Тритий может замещать водород во всех соединениях с кислородом, серой, азотом. А эти элементы входят в животных организмов. Доказано, что он легко связывается протоплазмой живых клеток и накапливается в пищевых цепях. Когда тритий распадается, он превращается в гелий и испускает бета-излучение. Эта трансмутация должна быть очень опасной для живых организмов, т. к. при этом поражается генетический аппарат клеток.

Любая АЭС наносит биосфере и населению существенный вред, обусловленный выбросами образующихся в реакторе радионуклидов. Это и детская лейкемия, и повышенный уровень младенческой смертности, и рак груди, и многие другие беды жителей, живущих недалеко от АЭС, подтвержденные исследовательскими центрами с мировым именем.

В процессе работы АЭС образуются жидкие, газообразные, аэрозольные и твердые радиоактивные отходы. Причем, часть газообразных не улавливается полностью очистными системами и попадает в окружающую среду. Реактор типа ВВЭР образует в год около 40000 Ки газообразных радиоактивных отходов.

В мире быстрыми темпами растет стоимость вывоза, переработки и захоронения облученного ядерного топлива (ОЯТ). Российский соответствующий «сервис» стоит уже около 1000 долларов за килограмм! В других странах – еще дороже. К тому же многие страны вообще запретили ввоз на свою территорию чужих ядерных отходов.

Имеющиеся хранилища облученного ядерного топлива рассчитаны на сроки эксплуатации, которые в десятки раз короче сроков активности помещенных туда отходов. Они уже ненадежны, но никто и нигде не знает, что делать с ними дальше. Ответственность перекладывается на плечи будущих поколений.

Для любой электростанции, вне зависимости от того, на каком топливе она работает, по умолчанию предпочтительна работа в базовом режиме несения нагрузки. Дело в том, что работа в переменном графике неизбежно снижает суммарное число часов использования установленной мощности и, как следствие, ухудшает ключевые показатели экономической эффективности.

Но в энергосистемах большинства стран мира в базовом режиме работают, как правило, АЭС. У атомных станций доля топливных затрат в себестоимости ниже, чем у газовых и угольных ТЭС, но их строительство обходится дороже – при прочих равных эти факторы делают работу АЭС в маневренном режиме менее выгодной с экономической точки зрения. В последнее время взгляд на то, каким должен быть оптимальный режим работы АЭС, постепенно меняется. Хотя средняя доля атомной генерации в энергобалансе, например, России составляет 20 %, в некоторых частях энергосистемы страны вклад АЭС значительно выше (в ОЭС Центра – более 42 %, Северо-Запада – 36 %, Средней Волги – 31 %) [2]. Это означает, что вопрос функционирования энергоблоков АЭС в маневренном режиме для обеспечения стабильной работы энергосистемы необходимо рассматривать уже сейчас.

Способность АЭС участвовать в регулировании нагрузки энергосистемы – один из решающих факторов развития атомной энергетики в стране, а также продвижения российского предложения на мировом рынке. В связи с этим в отрасли задумались, как сделать блоки АЭС, особенно вновь вводимые или перспективные, например, ВВЭР-ТОИ, более маневренными при том же уровне надежности и безопасности.

Маневренность электростанций играет очень важную роль в моменты просадок потребления. График потребления электроэнергии изменяется в течение дня, что требует перевода отдельных электростанций на пониженную мощность выработки, так как излишек энергии невозможно накапливать. Это значит, что выработка электроэнергии зависит от потребления в данный момент времени.

Регулирование мощности в энергосистеме может осуществляться в четырех основных режимах. Работа в базовом режиме предполагает, что поддерживается номинальная мощность энергоблока при незначительных отклонениях.

Первичное регулирование частоты энергосети – это автоматическое регулирование, основанное на изменении локальной частоты в сроки от нескольких секунд, чтобы установить баланс между производством и нагрузкой, а также ее стабилизации.

Вторичное регулирование частоты энергосети, ручное или автоматическое, производится на объекте генерации для восстановления частоты и полезной мощности до их стационарных значений в течение нескольких минут. Режим суточного регулирования мощности подразумевает использование программы изменения мощности, предусматривающей несколько (как правило, одно или два) изменений мощности энергоблока в течение суток.

С технической точки зрения работа энергоблоков АЭС в маневренном режиме возможна, что неоднократно было продемонстрировано на практике в различных странах мира. Наибольший опыт в этом направлении имеет Франция, где еще в 1970-х годах была сделана ставка на атомную генерацию как основу энергобаланса страны. Предсказуемо встал вопрос о начале практических исследований маневренных возможностей АЭС с легководными реакторами под давлением (PWR, аналог российских ВВЭР), из которых в настоящий момент на 100 % состоит французский атомный парк [3].

В результате работа атомной генерации в режиме слежения за нагрузкой во Франции была обоснована и успешно отработана. Четвертое поколение энергоблоков французских АЭС электрической мощностью 1400 МВт с реакторами проекта N4 изначально

разрабатывалось с учетом возможности изменения мощности в диапазоне от 30 до 100 % в течение суток. При уменьшении мощности АЭС со значения, близкого к номинальному, до нуля или до уровня нагрузки собственных нужд наблюдается так называемое отравление реактора и возникает опасность попадания в «йодную яму». Снижение эффективного коэффициента размножения может оказаться настолько глубоким, что реактор станет на некоторое время подкритичным и введение его в работу окажется возможным только через несколько часов после остановки. Для увеличения же запаса реактивности необходимы сложные дорогостоящие меры. Влияние отравления реактора на маневренные характеристики АЭС наиболее значимо в конце рабочей кампании, когда запас реактивности мал.

Полный суточный график нагрузки энергетической системы складывается из графиков отдельных потребителей. Кроме того, учитываются расход электроэнергии на собственные нужды электростанций и потери в электрических сетях. Конфигурация суточных графиков энергосистемы в основном определяется особенностями графиков нагрузки различных потребителей, долями в суммарной нагрузке коммунально-бытового сектора, одно-, двух-, трехфазных и непрерывно работающих предприятий. Методика определения проектно-расчетных и плановых показателей по расходу топлива на тепловых электростанциях при наличии энергетических характеристик оборудования и с учетом оптимальных режимов его использования (оптимальных суточных графиков нагрузки) изложена в инструкции и методических указаниях по нормированию удельных расходов топлива на тепловых электростанциях. Эти вопросы изучаются в курсе «Организация, планирование и управление производством».

Запланировано, что на станции будет два энергоблока с реакторами типа ВВЭР-1200 (В-491) мощностью до 1200 МВт каждый. Проектируемая мощность АЭС составляет 2,4 тыс. МВт. Поколение 3 – усовершенствованные реакторы повышенной безопасности и надежности. На основе усовершенствованных реакторов третьего поколения будет развиваться мировая ядерная энергетика в нынешнем столетии. Белорусской АЭС заложено максимальное расчетное землетрясение (МРЗ) 8 баллов по шкале MSK-64, а также защита от разнообразных внешних воздействий, не считая цунами. В проекте также предусмотрена двойная защитная оболочка здания реактора, система удаления водорода, системы пассивного отвода тепла. Данный проект соответствует современным международным требованиям по ядерной и радиационной безопасности.

Сегодня вся страна потребляет 36–37 миллиарда киловатт-часов (кВт·ч) электроэнергии в год. Практически полностью мы обеспечиваем себя этим электричеством сами, вырабатывая его более чем на 95 % из российского газа. Почти половину белорусской электроэнергии сегодня генерируют две крупные ГРЭС – Лукомльская и Березовская. Остальное в основном производится на ТЭЦ, которые, кроме электричества, снабжают белорусов и теплом. Запуск двух реакторов АЭС к 2020 году добавит к этому еще 18 миллиардов кВт·ч – то есть плюс почти 50 % от того, что Беларусь потребляет. Базовых путей выхода из ситуации – три: продавать излишки, потреблять больше электричества или выключать какие-то из существующих мощностей.

У России и Украины достаточно своего электричества, на наших границах у них даже есть свои АЭС – Смоленская и Ровенская. Остаются западные соседи, и с ними начинаются проблемы.

Избытка в энергосистеме быть не может, электроэнергию пока нельзя накапливать. Если мы не найдем нового применения электричеству с АЭС, придется снижать мощность существующих электростанций – ГРЭС или ТЭЦ, потому что работать не на полную мощность сама атомная станция не может.

Артем Быстрик прогнозирует, что выключать придется блоки Лукомльской ГРЭС. А скорее – переводить их на горячий резерв – то есть держать «на подхвате» у реактора АЭС на случай экстренного выхода его из строя. Дело в том, что атомной станции все равно будут нужны такие альтернативные мощности в горячем резерве, чтобы в случае чего заменить

один из реакторов. Мощность каждого из них – 1200 МВт. Мощность всей Березовской ГРЭС меньше, а значит, переводу в режим горячего резерва, судя по всему, подвергнут Лукомльскую.

Однако и это не решит проблемы избытка энергии, если не получится выполнить планы ученых и нарастить электропотребление. Что-то придется отключать. Но здесь начинаются новые проблемы. Во-первых, под существующие станции проведена вся логистика – линии электропередач. Во-вторых, обе ГРЭС – градообразующие предприятия для Новолукомля и Белоозерска, на них работают тысячи человек. Посчитать социальные и экономические последствия такого сценария едва ли возможно.

Вопрос перехода на атомную энергию в Беларуси остается открытым для обсуждения. Есть множество факторов, как за строительство атомной электростанции, так и против. Строительство АЭС влечет за собой множество трудностей, как с экономической, так и с технической точек зрения. Необходимо решить вопрос переизбытка электроэнергии и разгрузки других электростанций, так как при мощности блоков белорусской атомной электростанции в 1110 МВт процесс изменения ее нагрузки становится затруднительным для энергосистемы. Экологическая сторона вопроса также является спорной, ведь атомная электростанция требует наличия высококвалифицированных специалистов, свободных обслуживать блоки и саму станцию, что ставит перед нами задачу подготовки кадров за кратчайшие сроки.

#### Литература

1. РУП «Белорусская атомная электростанция»: [Электронный ресурс]. Минск, 2010-2018. – Режим доступа : <http://belaes.by>. – Дата доступа : 18.04.2018.
2. Андриющенко, А.И. Оптимизация режимов работы и параметров тепловых электростанций / А.И. Андриющенко, Р.З. Амиров. – М. : Высшая школа, 1983. – 255 с.
3. Атомная энергетика в структуре мирового энергетического производства в XXI веке // Энергия. – № 1. – 2006. – С. 2–10.

УДК 621.3

## ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Шавлюкевич Р.В.

Научный руководитель – Баран А.Г.

Генератор сигналов – это устройство, позволяющее получать сигнал определённой природы, имеющий заданные характеристики. Генераторы применяются для проверки и настройки радиоэлектронных устройств, каналов связи, при поверке, настраивать высокочастотные приборы, применяемые в вычислительной технике, автоматике, при калибровке средств измерений и в других целях.

Генераторы характеризуются диапазоном генерируемых частот; точностью установки частоты и постоянством ее градуировки; стабильностью генерируемых сигналов по времени, частоте, амплитуде и форме; искажением генерируемых сигналов заданной формы; зависимостью параметров выходного сигнала от внешней нагрузки и пределами их регулировки; степенью экранирования паразитных электромагнитных полей.

Разновидности по диапазону частот генерируемых сигналов: инфранизкочастотные – до 20 Гц; низкочастотные – от 20 Гц до 200 кГц (звуковые – от 20 Гц до 20 кГц; ультразвуковые – от 20 кГц до 200 кГц); высокочастотные – от 200 кГц до 50 МГц; сверхвысокочастотные с коаксиальным выходом – от 50 МГц до 10 ГГц; сверхвысокочастотные с волноводным выходом – выше 10 ГГц.

Разновидности по форме генерируемых сигналов: Г2 – шумовых сигналов – источники переменных напряжений с бесконечно широким сплошным спектром частот и калиброванным уровнем; Г3 – измерительные генераторы синусоидальных сигналов низкой частоты; Г4 – синусоидальных сигналов высокой частоты; Г5 – периодических импульсов прямоугольной формы; Г6 – сигналов специальной формы (треугольной, трапецеидальной, пилообразной, синус-квадратной и др.); Г8 – качающейся частоты – маломощные источники колебаний со специальным, часто линейным законом изменения частоты.

Измерительные генераторы сигналов низкой частоты применяются для проверки и настройки радиоэлектронных устройств: промежуточных и усилительных каналов радиоприемных и телевизионных устройств, каналов связи радиопередающих устройств, настройке и ремонте профессиональных и любительских усилителей.

Низкочастотные генераторы различаются по способу построения: LC-генераторы; RC-генераторы; генераторы на биениях.

Недостатки LC-генераторов – громоздкость колебательного контура и сложность его перестройки.

RC-генераторы отличаются простотой схемы и хорошими характеристиками.

Недостатки генераторов на биениях – сложность схемы и относительная нестабильность низкой частоты.

Достоинства – выходное напряжение не зависит от частоты, весь диапазон выходных частот плавно меняется при изменении емкости переменного конденсатора в колебательном контуре.

Диапазон частот этих низкочастотных генераторов от 1 мкГц до 20 МГц. Большинство моделей может обеспечивать не только синусоидальный, но и иные формы сигнала: меандр, пилообразный, импульс, наклон. Максимальная амплитуда выходного сигнала – до 20 В.

Отдельную группу образуют генераторы сигналов специальной формы. Эти приборы обеспечивают потребности измерения и диагностики приборов, используя сигналы синусоидальной, треугольной, пилообразной и прямоугольной формы с использованием модуляции его внешним или встроенным сигналом. Наряду с настольными генераторами в

этой группе представлены компактные модели для удобства применения в полевых условиях и при выездной работе ремонтников.

Генераторы высокой частоты представлены, главным образом, в виде генераторов ТВ сигналов. Их диапазон составляет от 100 кГц до 150 МГц, причем может присутствовать не только видеосигнал, но и частотно-модулированный аудио сигнал.

Основным назначением генераторов сигналов высокой частоты является вычисление синусоидального электромагнитного сигнала с заданными пользователем характеристиками. Данные генераторы применяются при настройке радиоприемников и других различных приборов, использующихся в областях, не требующих измерений или преобразования сигналов.

Формы сигналов: синусоида, затухающая синусоида, меандр, прямоугольник, пилообразная форма, треугольная форма, перепад, импульс.

Для синусоидальной формы волны, время периода сигнала также можно выражать в градусах, либо в радианах, учитывая, что один полный цикл равен  $360^\circ$  ( $T = 360^\circ$ ), или, если в радианах, то  $2\pi$ . Период и частота являются обратными друг другу величинами. С уменьшением времени периода сигнала, его частота увеличивается и наоборот.

Меандры широко используются в электронных схемах, так как они имеют симметричную прямоугольную форму волны с равной продолжительностью полупериодов. Практически все цифровые логические схемы используют сигналы в виде меандра на своих входах и выходах.

Прямоугольные сигналы отличаются от меандров тем, что длительности положительной и отрицательной частей периода не равны между собой. Прямоугольные сигналы поэтому классифицируются как несимметричные сигналы.

Треугольные сигналы, как правило, это двунаправленные несинусоидальные сигналы, которые колеблются между положительным и отрицательным пиковыми значениями. Треугольный сигнал представляет собой относительно медленно линейно растущее и падающее напряжение с постоянной частотой. Скорость, с которой напряжение изменяет свое направление равна для обеих половинок периода, как показано ниже.

Пилообразный сигнал – это еще один тип периодического сигнала. Как следует из названия, форма такого сигнала напоминает зубья пилы. Пилообразный сигнал может иметь зеркальное отражение самого себя, имея либо медленный рост, но очень крутой спад, или чрезвычайно крутой, почти вертикальный рост и медленный спад.

Меры безопасности при работе с электрооборудованием предусматривает использование защитного заземления; зануления; изоляции токоведущих частей; применения пониженного напряжения; использование изолирующих подставок и резиновых перчаток.

#### Литература

1. Измерения в электронике. Справочник, т. 1. / Под ред. В.А. Доброхорова. – М.-Л. : Энергия, 1965. – 298 с.
2. Измерения в электронике. Справочник, т. 2. / Под ред. В.А. Доброхорова. – М. : Сов. радио, 1977. – 271 с.
3. Основы электроизмерительной техники. / Под ред. М.И. Левина. – М., 1972. – 544 с.
4. Приборы электронные измерительные. Общие технические требования. ГОСТ 9763-67. – М., 1967.
5. Справочник по электронно-измерительным приборам / Под ред. К.К. Илюнина. – Л. : Энергия, 1973. – 217 с.

УДК 621.3

## КОНСТРУКЦИИ ПОФАЗНО-ЭКРАНИРОВАННЫХ ТОКОПРОВОДОВ

Матяс Т.В., Ильковский И.Н.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Булат В.А.

Экранированные генераторные токопроводы предназначены для электрического соединения генераторов мощностью 100 МВт (иногда 60 МВт) и выше с блочными трансформаторами и трансформаторами собственных нужд, а также нулевых выводов генератора. Пофазно-экранированные токопроводы обладают большей надежностью, чем токопроводы с общим экраном, тем более открытые. Поэтому токопроводы генераторов АЭС, КЭС, а также мощных ГЭС и ТЭЦ выполняют только пофазно-экранированными.

В токопроводах этого типа в качестве проводников используют исключительно алюминиевые трубы кольцевого сечения. Диаметр трубы и толщину стенки определяют из теплового расчета, руководствуясь установленными максимальными температурами для проводников и кожухов. Кожухи токопровода изготавливают из листового алюминия толщиной 4–6 мм в виде секций длиной 10–12 м. Диаметр кожухов определяется диаметром проводников и двойной высотой изоляторов. Последние вводят в кожухи снаружи через отверстия в стенках и укрепляют болтами. В случае необходимости любой изолятор можно вынуть и заменить другим. Расстояние между изоляторами по длине токопровода составляет 4–5 м, т. е. значительно больше обычных расстояний в неэкранированных токопроводах сборного типа. Проводники плотно прилегают к головкам изоляторов.

Изготовленные таким образом секции собирают в трехфазную систему на месте установки и связывают поперечными двутавровыми балками. Продольная несущая конструкция для токопроводов с непрерывной системой кожухов не требуется, поскольку кожухи обладают значительной жесткостью и могут быть установлены на опорах с пролетом до 15–20 м. Как проводники, так и кожухи отдельных секций соединяют сваркой. Чтобы обеспечить свободную деформацию проводников и кожухов при изменении температуры, предусматривают тепловые компенсаторы. Во избежание проникновения в кожухи пыли и влаги их надежно герметизируют.

В токопроводах могут быть встроены разъединители, заземлители, измерительные трансформаторы тока и напряжения. Токопроводы для блочных агрегатов генератор-трансформатор изготавливают с ответвлениями для присоединения трансформаторов собственных нужд.

Большая часть токопроводов с номинальным током вплоть до 15–20 кА работает с естественным воздушным охлаждением. Имеются токопроводы, выполненные с проточной вентиляцией и водяными охладителями. При этом размеры проводников и кожухов могут быть уменьшены. Целесообразность такой конструкции должна быть проверена соответствующим технико-экономическим расчетом с учетом местных условий.

В пофазно-экранированных токопроводах (рисунок 1) проводники каждой фазы вместе с опорными изоляторами охвачены проводящими заземленными экранами-кожухами, назначение которых заключается в следующем:

- обеспечить безопасность обслуживания;
- защитить проводники, изоляторы от пыли, влаги, случайного попадания посторонних предметов;
- исключить возможность междуфазных замыканий в пределах токопровода;
- уменьшить электродинамические силы взаимодействия между проводниками при внешних КЗ;
- устранить нагревание индуктированными токами стальных несущих конструкций, арматуры железобетонных стен и перекрытий.

Последние два требования могут быть выполнены, если внешнее магнитное поле (вне кожухов) будет возможно полнее компенсировано токами, индуктированными в кожухах.

Это и имеет место в токопроводах с непрерывной замкнутой системой кожухов типа ТЭН (токопровод экранированный, непрерывный).

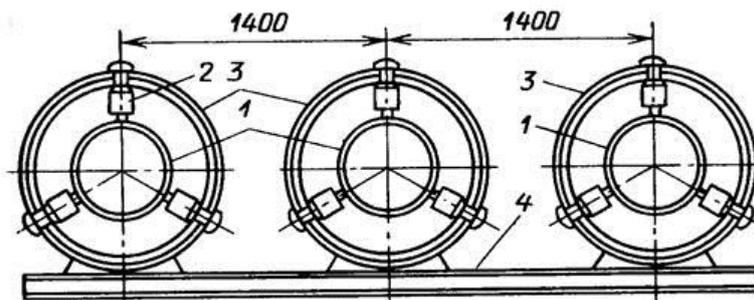


Рисунок 1. Пофазно-экранированный токопровод для генератора 500 МВт, 20 кВ, 18 кА:  
1 – шины; 2 – изолятор; 3 – кожухи; 4 – стальная балка

Как видно из рисунка 2, секции кожухов каждой фазы соединены между собой сваркой. По концам токопровода кожухи трех фаз соединены с помощью приваренных алюминиевых перемычек в виде плит или труб. Заземляют экраны в одной точке, для чего одну из перемычек присоединяют к контуру заземления электростанции.

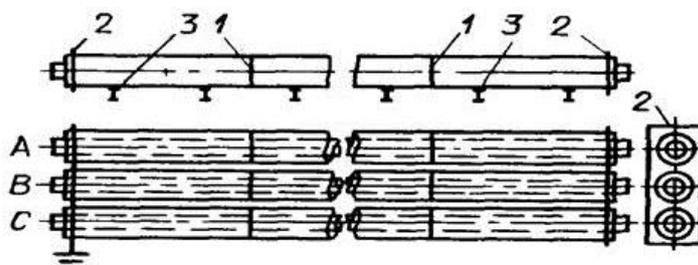


Рисунок 2. Схема непрерывной замкнутой системы кожухов токопровода:  
1 – место сварки; 2 – алюминиевые перемычки; 3 – поперечные балки

Таким образом, кожухи образуют замкнутую трехфазную систему. В рабочем режиме в них индуктируются токи, приблизительно равные токам в проводниках, но направленные противоположно. Они проходят вдоль кожухов, распределяясь равномерно по периметру, и переходят из одного кожуха в два других по концам токопровода. Геометрическая сумма их равна нулю. Эти токи в дальнейшем называются циркулирующим и в отличие, от вихревых токов, замыкающихся в пределах кожуха каждой фазы. Циркулирующие токи уменьшают внешнее магнитное поле токопровода.

Если бы токи в кожухах в точности соответствовали токам в проводниках и находились с ними в фазе, то внешнее магнитное поле отсутствовало бы. Однако кожухи обладают активным сопротивлением. Вследствие этого токи в кожухах не точно совпадают по фазе с токами в проводниках и внешнее магнитное поле компенсируется не полностью. Однако в рабочем режиме индукция внешнего поля настолько мала, что опасность нагревания стальных конструкций индуктированными в них вихревыми токами практически отсутствует.

### Литература

1. Семчинов, А.М. Токопроводы промышленных предприятий / А.М. Семчинов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоиздат, 1982. – 208 с.
2. Васильев А.А. Электрическая часть станций и подстанций / А.А. Васильев, И.П. Крючков. – М. : Энергия, 1980. – 608 с.
3. Современные токопроводы : учеб. пособие для СПТУ. – М. : Высшая школа, 1988. – 80 с.

УДК 621.3

## ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СИСТЕМЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД

Башаркевич Я.В., Башаркевич Е.К.

Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

Одним из принципиальных вопросов при построении системы собственных нужд является выбор источника питания. Наиболее простым решением, получившим распространение, является схема с непосредственной электрической связью системы собственных нужд с сетью энергосистемы. Недостатком такой схемы является зависимость напряжения и частоты в системе собственных нужд от режима энергосистемы. Другим решением может быть питание собственных нужд от электрически не связанного с сетью энергосистемы генератора на валу главного агрегата или на валу вспомогательной турбины.

Однако автономные источники энергии или генераторы на валу основного агрегата для питания собственных нужд значительно увеличивают стоимость единицы, установленной мощности электростанций, усложняют их эксплуатацию и являются менее надежными, чем при электроснабжении системы собственных нужд от основного генератора через отпайку. Вероятность безотказной работы трансформатора собственных нужд гораздо выше, чем генератора, турбины, источника пара и их механизмов собственных нужд. При использовании стационарных турбогенераторов собственных нужд требуется обеспечить еще более высокую надежность питания их механизмов собственных нужд. Кроме того, пуск и самозапуск электродвигателей от сети энергосистемы проходит в лучших условиях, чем пуск от источника ограниченной мощности.

Электроснабжение собственных нужд от автономных источников могло бы оказаться полезным при авариях, сопровождающихся глубоким понижением частоты и напряжения, когда падает производительность механизмов, а при глубоком понижении напряжения теряется также устойчивость двигательной нагрузки. Это приводит к прекращению подачи питательной воды, срыву вакуума турбин, сбросу нагрузки и отключению агрегатов. В результате в системе может начаться лавинообразное снижение частоты и напряжения.

Однако автономный источник не может устранить основной причины тяжелой системной аварии – несоответствия между нагрузкой и располагаемой мощностью станций. Независимое от сети питание собственных нужд может в ряде случаев лишь задержать развитие аварии, но не исключить ее. Кардинальным решением вопроса является правильное использование средств системной автоматики и прежде всего частотной разгрузки после исчерпания вращающегося резерва мощности. Поэтому основной схемой питания системы собственных нужд станций всех типов в настоящее время является схема надежность и устойчивость которой обеспечивается:

- широким применением в системе собственных нужд асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, пуском их от полного напряжения сети без всяких регулирующих устройств и отказом от защиты минимального напряжения на ответственных механизмах;

- успешным самозапуском электродвигателей при восстановлении напряжения после отключения коротких замыканий в энергосистеме и в сети собственных нужд;

- применением быстродействующих релейных защит и выключателей на всех элементах системы и подсоединениях собственных нужд;

- широким внедрением устройств системной автоматики (автоматическая частотная разгрузка, автоматический ввод резервного питания и резервных механизмов собственных нужд, автоматическое регулирование и форсировка возбуждения генераторов).

В последнее время на некоторых тепловых электростанциях США и Великобритании устанавливаются специальные автономные агрегаты с малым временем пуска для питания системы собственных нужд в аварийных условиях. В нормальном режиме электродвигатели механизмов питаются от трансформатора собственных нужд блока. При понижении частоты или напряжения в системе автоматически запускаются газотурбинные агрегаты, и при

определенном понижении режимных параметров их генераторы включаются на шины распределительного устройства собственных нужд, а питание от трансформаторов собственных нужд прекращается. Вся операция от пуска ГТУ из холодного состояния до перевода на нее нагрузки собственных нужд занимает две-три минуты. Экономически применение таких агрегатов может быть оправдано лишь при совмещении резервирования питания собственных нужд с выдачей пиковой мощности.

УДК 621.3

## ИНДИКАТОРЫ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Жук А.Д.

Научный руководитель – Климкович П.И.

Короткое замыкание (КЗ) возникает при соединении двух проводов цепи, присоединенных к разным зажимам источника через очень малое сопротивление, которое сравнимо с сопротивлением самих проводов.

КЗ могут возникнуть при перенапряжениях в результате грозовых явлений, прямых ударов молнии, механических повреждений изолирующих частей, ошибочных действий обслуживающего персонала.

Большинство линий электропередач проходит в сельской, лесистой местности и труднодоступных районах, и в случае возникновения аварий, связанных с коротким замыканием, определить участок ВЛЭП, на котором произошло короткое замыкание, очень сложно.

Для облегчения решения таких задач разработали индикаторы короткого замыкания. ИКЗ представляет собой микропроцессорное устройство, позволяющее сигнализировать о прохождении токов ненормальных режимов в месте установки прибора. Устанавливая данные приборы на ВЛЭП или на подстанциях, сеть разделяют на участки. Поврежденный участок сети будет находиться между последним сработавшим и первым не сработавшим индикатором короткого замыкания. Некоторые индикаторы (роторного типа), после срабатывания нужно перезапускать. Другие индикаторы (жидкостного типа) состоят из жидкости и гранул, содержащихся в прозрачном корпусе и перезапуска не требуют.

Для определения, есть ли сбой в работе линии, индикатор ищет в ней определенную последовательность условий, и при обнаружении начинает мигать. С помощью набора микропереключателей внутри индикатора пользователь может запрограммировать критерии функционирования в соответствии с конкретными требованиями.

В данной работе наглядно представлено, почему ИКЗ помогают сэкономить время и деньги. Внедрение индикаторов короткого замыкания в энергетике улучшает социальную обстановку в общественном плане за счёт значительного сокращения времени ликвидации аварии, следовательно, и времени отключения потребителей.

При установке индикаторов короткого замыкания, сокращается время отыскания повреждения в два раза. При установке и эксплуатации более сложных модификаций приборов ИКЗ, экономическая эффективность заметно увеличится, поскольку, при незначительном увеличении их стоимости, значительно возрастает их функциональность.

Сберечь энергетикам деньги сможет, прежде всего, быстрое противодействие силам природы, а значит использование индикаторов короткого замыкания. В этой работе наглядно показано, с использованием данных от работы реальных приборов в реально существующих участках распределительных сетях 6–35 кВ.

### Литература

1. Федосенко, Р.Я. Надежность электроснабжения / Р.Я. Федосенко. – М. : Госэнергоиздат, 1954. – 134 с.
2. Демченко, В.Т. Указатель места прохождения токов короткого замыкания в электрических сетях 6–10 кВ / В.Т. Демченко. – Л. : Госэнергоиздат, 1999. – 288 с.
3. Овчинников, А.А. Надежность распределительных электрических сетей / А.А. Овчинников. – М. : Информэлектро, 1982. – 81 с.

УДК 620.9

## ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Мазанович М.Е.

Научный руководитель – Климкович П.И.

Одним из быстро развивающихся направлений создания новых конструкций выключателей переменного тока высокого и сверхвысокого напряжения, отличающихся меньшими габаритами и отвечающих требованиям современной энергетики по коммутационной способности и надежности, является применение дугогасящих сред, более эффективных по сравнению с воздухом и маслом. Интенсивное внедрение вакуумной и элегазовой аппаратуры обусловлено тем, что пока не найдено способов эффективного дугогашения, способных конкурировать с дугогашением в элегазе или вакууме. Не получено и новых видов диэлектриков, по электроизоляционным, дугогасительным и эксплуатационным свойствам превосходящих элегаз или вакуум.

Основные достоинства элегазового оборудования определяются уникальными физико-химическими свойствами элегаза. При правильной эксплуатации элегаз не стареет и не требует такого тщательного ухода за собой, как масло.

В элегазовых выключателях основные и дугогасительные контакты силовой цепи находятся в среде элегаза. Подробнее о том, что такое элегаз будет сказано ниже. Принципиальное отличие элегазовых выключателей от выключателей других типов – гашение дуги в среде элегаза [1, с. 35].

Одним из немногочисленных недостатков элегаза является способность разлагать влагосодержащие синтетические изоляционные материалы при соприкосновении с ними. Поэтому рекомендуется применять в элегазовых конструкциях стойкие изоляционные материалы, например, тефлон.

К недостаткам элегаза следует отнести высокую температуру сжижения. При давлении 1,5 МПа она составляет всего 6 °С. Чтобы избежать сжижения элегаза, в выключателях с высоким давлением гасящей среды предусматривают автоматические нагреватели, поддерживающие постоянную температуру элегаза.

Схема анализа – такая же, как при масляной изоляции: отбор проб дефектного элегаза, содержащего продукты разложения от теплоты дуги. Исследование дефектного элегаза включает в себя анализ ПР элегаза, содержания влаги в газе, определение интенсивности и длительности горения дуги. Основными инструментами, используемыми при анализе ПР, является газовый хроматограф с термоэлектронной ловушкой и пламенный спектрофотометр.

По конструкции различают колонковые и баковые выключатели. Колонковые ни внешне, ни по размерам принципиально не отличаются от маломасляных, кроме того, что в современных элегазовых выключателях 220 кВ только один разрыв на фазу. Баковые элегазовые выключатели имеют гораздо меньшие габариты по сравнению с масляными, имеют один общий привод на три полюса, встроенные трансформаторы тока.

Колонковые выключатели требуют относительно небольшого количества элегаза для заполнения, при этом обеспечивается утечка элегаза на уровне не более 0,5 % в год, что достигается специально подобранными материалами для уплотнения и подтверждается многолетним опытом эксплуатации [1, с. 98].

– имеют самосмазывающиеся приводные механизмы, надежную, простую дугогасительную камеру и испытанные на практике контактные системы, которые обеспечивают бесперебойную работу силовых выключателей и продлевают срок службы – даже при высокой частоте коммутаций;

– удобны при транспортировке – они перевозятся в полностью собранном и испытанном состоянии или в виде собранных, испытанных на заводе и готовых к перевозке блоков, что снижает транспортные расходы, затраты на монтаж;

– предназначены для работы в диапазоне температур от –45 до +40 °С.

Баковые элегазовые выключатели (рисунок 1) имеют ряд преимуществ перед колонковыми выключателями, а именно:

- отличная сейсмостойкость;
- высокий уровень безопасности;
- низкое влияние загрязнений на работу выключателя;
- меньшая площадь для установки, т. к. трансформаторы тока уже встроены в баковый выключатель.

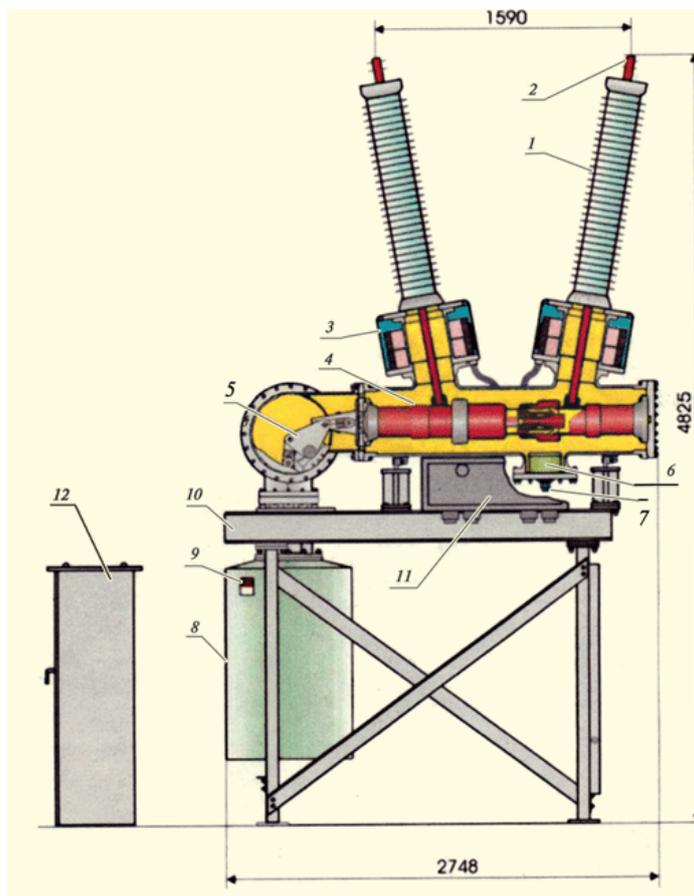


Рисунок 1. Баковый элегазовый выключатель

Разработаны конструкции выключателей нагрузки с элегазом на 35, 110, 220 кВэ. Выключатели 35 и 110 кВ имеют по одной камере на полюс, в выключателе 220 кВ – две камеры на полюс. Кроме того, разработаны конструкции выключателей на два и три направления. Такой аппарат заменяет два или три выключателя, что дает значительную экономию при установке их на подстанциях.

Элегазовые выключатели могут отключать не только ток нагрузки, но и ток КЗ. Такие выключатели имеют дугогасительные устройства с автопневматическим дутьем.

Объектом испытания в элегазовых выключателях является, прежде всего, фазная изоляция выключателей, состояние самих камер (испытание на разрыв), состояние контактов выключателей как основных, так и дугогасительных, временные характеристики выключателей, и, при испытании выключателей на выкатном элементе (тележке), соосность входа выключателей на тележке с приёмными элементами ячейки КРУ, глубина входа и равномерность входа по фазам, а также состояние контактов ячейки и выключателя. Последние испытания обычно проводятся именно для выкатного элемента ячейки, а не для элегазового выключателя.

Выключатели нагрузки элегазовые во многом напоминают конструкцию отделителей. Однако для успешного отключения тока в них предусматриваются устройства для вращения дуги в элегазе. В подвижный и неподвижный контакты встроены постоянные магниты из феррита, которые создают магнитные поля, направленные встречно. При размыкании

контактов образуется дуга, ток которой взаимодействует с радиальным магнитным полем, в результате чего создается сила  $F$ , перемещающая дугу по кольцевым электродам. Вращение дуги в элегазе способствует быстрому гашению. Чем больше отключаемый ток, тем больше скорость перемещения дуги, это защищает контакты от обгорания. Контактная система описанной конструкции помещается внутри фарфорового корпуса, заполненного элегазом и герметически закрытого. Давление внутри камеры 0,3 МПа. Так как потеря элегаза недопустима, гасительная камера выключателя должна работать по замкнутому циклу. Подпитка при возможных утечках происходит из баллона со сжатым элегазом.

Элегазовые выключатели могут отключать не только ток нагрузки, но и ток КЗ. Такие выключатели имеют дугогасительные устройства с автопневматическим дутьем.

Для колонкового исполнения, полюс представляет собой вертикальную колонну, состоящую из двух (и более) изоляторов, в верхнем из которых размещено дугогасительное устройство (ДУ), а нижний - служит опорой ДУ и обеспечивает ему требуемое изоляционное расстояние от заземленной рамы. Внутри опорного изолятора размещена изоляционная штанга, соединяющая подвижный контакт ДУ с приводной системой аппарата.

Для бакового исполнения, полюс представляет собой металлический цилиндрический бак, на котором установлены два изолятора, образующие высоковольтные вводы выключателя. ДУ в таком выключателе размещено в заземленном металлическом корпусе.

Для комбинированного исполнения, полюс представляет собой металлический корпус в виде сферы, на котором установлены фарфоровые изоляторы, образующие высоковольтные вводы выключателя, в одном из которых размещено дугогасительное устройство, а в другом встроенные трансформаторы тока.

В верхней части изолятора обычно устанавливается фильтр – поглотитель влаги и продуктов разложения элегаза под действием электрической дуги.

Также на всех современных выключателях установлен предохранительный клапан – устройство с тонкостенной мембраной, разрывающейся при давлении, возникающем при внутреннем коротком замыкании, но не достигающем значения, при котором испытываются собственно изоляторы.

В настоящее время все элегазовые выключатели оснащаются устройствами контроля давления элегаза внутри камеры. Эти устройства могут различаться по конструкции и соответственно могут обеспечивать либо визуальное отображение давления (манометры), либо обеспечивают контроль давления с выводом сигнала (датчики давления). И в том и в другом случае контроль наличия утечки элегаза проводится по показаниям (или по отсутствию сигнала с датчика) контрольных приборов выключателя.

### Литература

1. Афанасьев, В.В. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения / В.В. Афанасьев. – 2-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 310 с.

УДК 621.3

## УСТАНОВКИ МОНИТОРИНГА ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Савицкий П.Ю.

Научный руководитель – Баран А.Г.

В последние годы все более широкое распространение в Беларуси и за рубежом находит мнение о необходимости замены испытаний силовых кабельных линий повышенным напряжением постоянного тока, превышающем рабочее напряжение ( $U_{\text{раб}}$ ) в 3–6 раз, на диагностику изоляции с помощью измерения частичных разрядов (ЧР), токов утечки, абсорбционных токов и других методов с приложением напряжения  $(1–1,5)U_{\text{раб}}$ .

Дело в том, что проведение испытаний кабеля, находящегося в эксплуатации продолжительное время, повышенным напряжением отрицательно влияет на изоляцию и снижает срок эксплуатации.

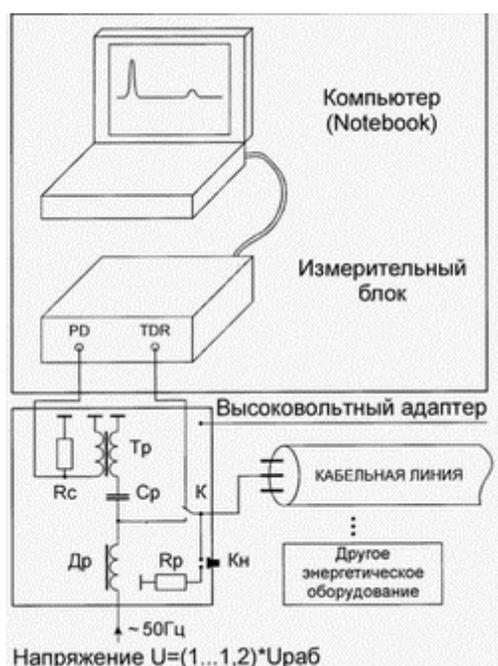
В отличие от испытаний диагностика изоляции кабельной линии относится к неразрушающим методам контроля.

Одним из прогрессивных методов диагностики является метод измерения ЧР, позволяющий не только определить уровень частичных разрядов в кабельной линии, но и определить их местонахождение по длине.

Частичный разряд частично шунтирует изоляцию кабельной линии. Частичные разряды появляются в слабом месте кабельной линии под воздействием переменного напряжения и приводят к постепенному развитию дефекта и разрушению изоляции.

Частичные разряды возникают в пустотах в твердой изоляции (бумажной или полиэтиленовой), в многослойных системах электродов/проводников, имеющих несколько слоев твердой изоляции, а также в пузырьках газа (в случае жидкой изоляции) или вокруг электродов в газе (коронный разряд) и в большинстве случаев представляют собой воздушные или масляные промежутки в изоляции.

Частичные разряды опасны тем, что приводят к постепенному разрушению изоляции и возникновению электрического пробоя. С другой стороны, измерение частичных разрядов позволяет сегодня энергетическим компаниям заблаговременно определять места будущих повреждений в энергооборудовании, своевременно проводить ремонт и избегать серьезных аварий в работе станционного и сетевого оборудования.



PD – выход частичных разрядов;

TDR – вход/выход рефлектомера;

Rc – резистор согласования;

Tr – трансформатор связи;

Cp – разделительная емкость;

Др – дроссель;

Kn – кнопка проверки разряженности линии

Рисунок 1. Структурная схема измерений частичных разрядов в кабельных линиях

В момент появления частичного разряда в кабельной линии возникает два коротких импульсных сигнала, длительности которых десятки-сотни наносекунд. Эти импульсы распространяются к разным концам кабельной линии. Измеряя импульсы, достигшие начала кабеля, можно определить расстояние до места их возникновения и уровень. Структурная схема измерений частичных разрядов в кабельных линиях показана на рисунке 1.

Основными узлами измерительной схемы являются: компьютерный анализатор дефектов и частичных разрядов в кабельных линиях и высоковольтный адаптер.

Компьютерный анализатор дефектов и частичных разрядов в кабельных линиях может быть выполнен в виде совокупности измерительного блока и портативного компьютера (как показано на рисунке) или в виде специализированного измерительного прибора.

Высоковольтный адаптер служит для развязки компьютерного анализатора и источника воздействующего напряжения.

Системы мониторинга частичных разрядов различаются своими параметрами и количеством измерительных каналов.

#### **Литература**

1. Руссов, В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования / В.А. Руссов. – М. : Энергия, 2011. – 370 с.

УДК 621.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ ЕЕ ВКЛЮЧЕНИИ И ОБРЫВ НЕЙТРАЛЬНОГО ПРОВОДА В ПЕРИОД ПОСЛЕ КОММУТАЦИИ

Русецкий К.И., Журкевич В.В.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.

Рассмотрим переходный процесс в трехфазной электрической цепи при ее включении, а так же при обрыве нейтрального провода. Для исследования процесса нам потребуется воспользоваться программным обеспечением MatLab с пакетом компонентов Simulink. Смоделируем схему так, чтобы к каждой из фаз были подключены различные элементы. Исследуем влияние каждого из элементов, меняя их параметры, на дальнейшую работоспособность электрической цепи. Обрыв нейтрального провода будем проводить в период коммутационного режима при включении цепи (0,05 с), а так же и в после коммутационный период (0,5 с). На рисунке 1 представлена модель трехфазной электрической цепи, в которой мы исследуем переходный процесс. Частота источника 50 Гц. Сам обрыв нейтрального провода приводит к появлению переходного процесса.

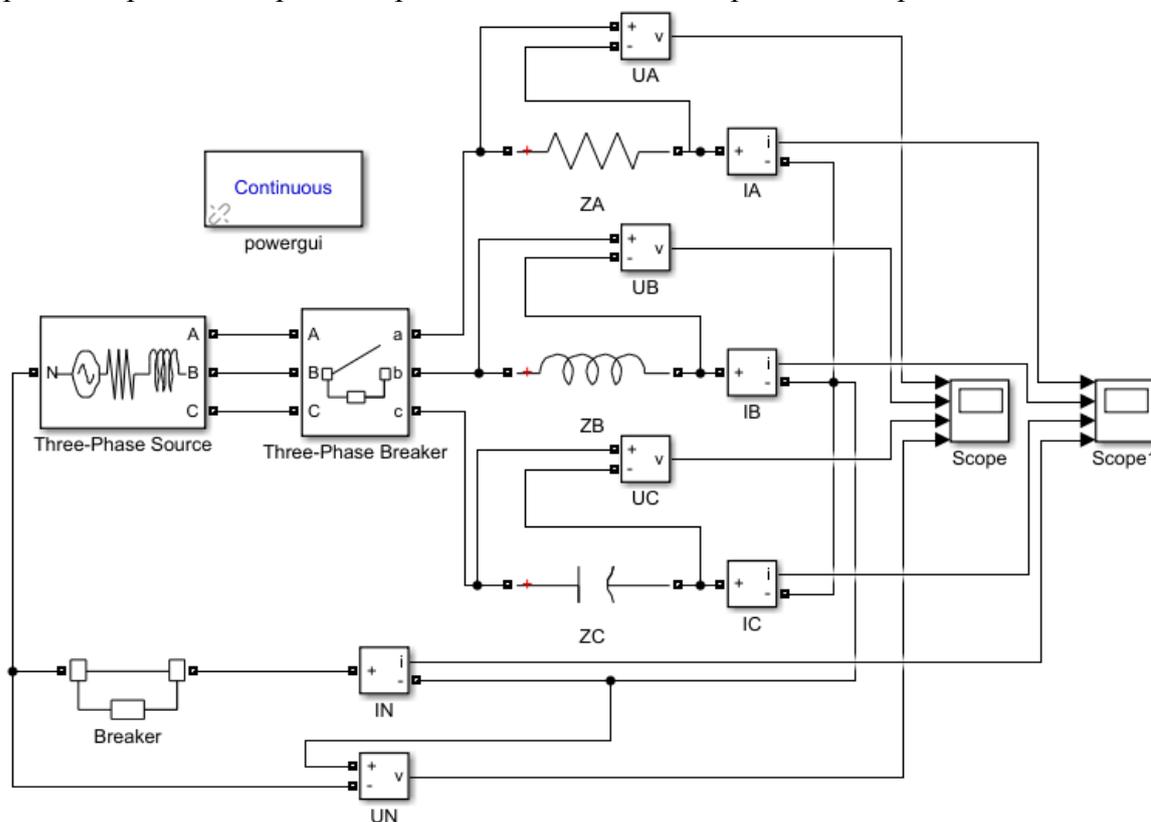
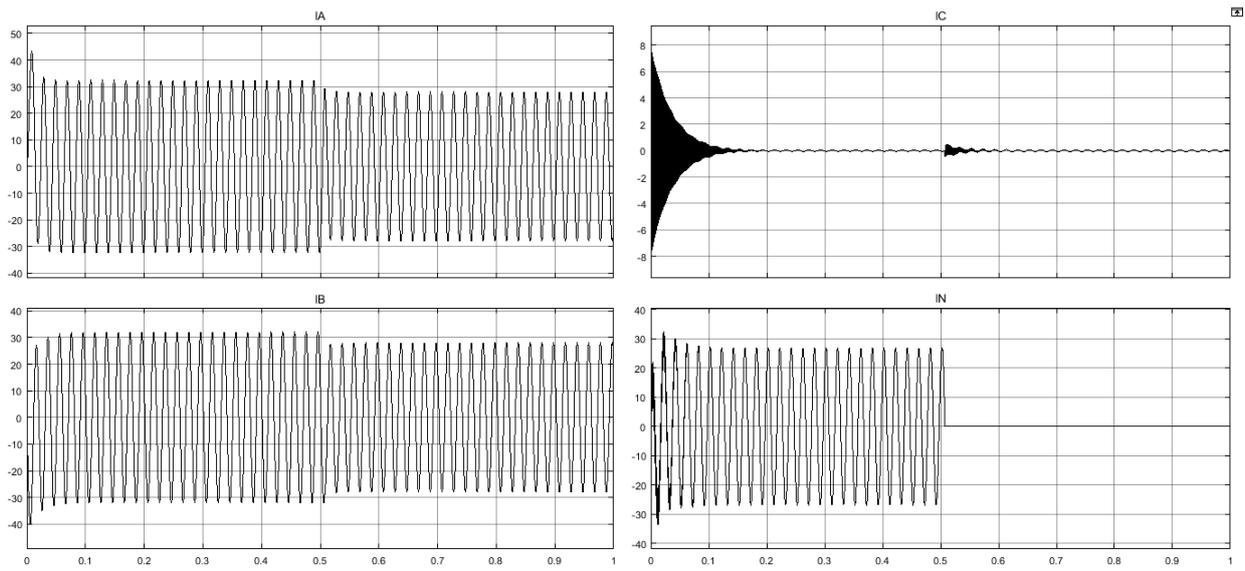


Рисунок 1. Модель исследуемой трехфазной электрической цепи

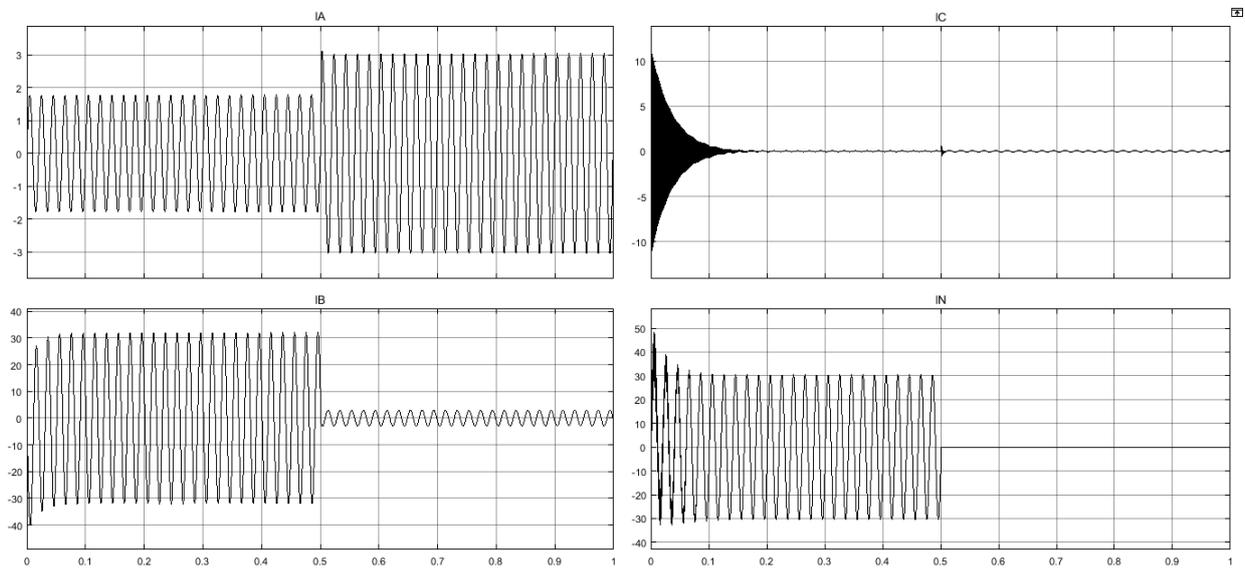
Исследуем обрыв нейтрального провода в период после коммутации (таблица 1).

Таблица 1. Начальные условия исследуемой модели

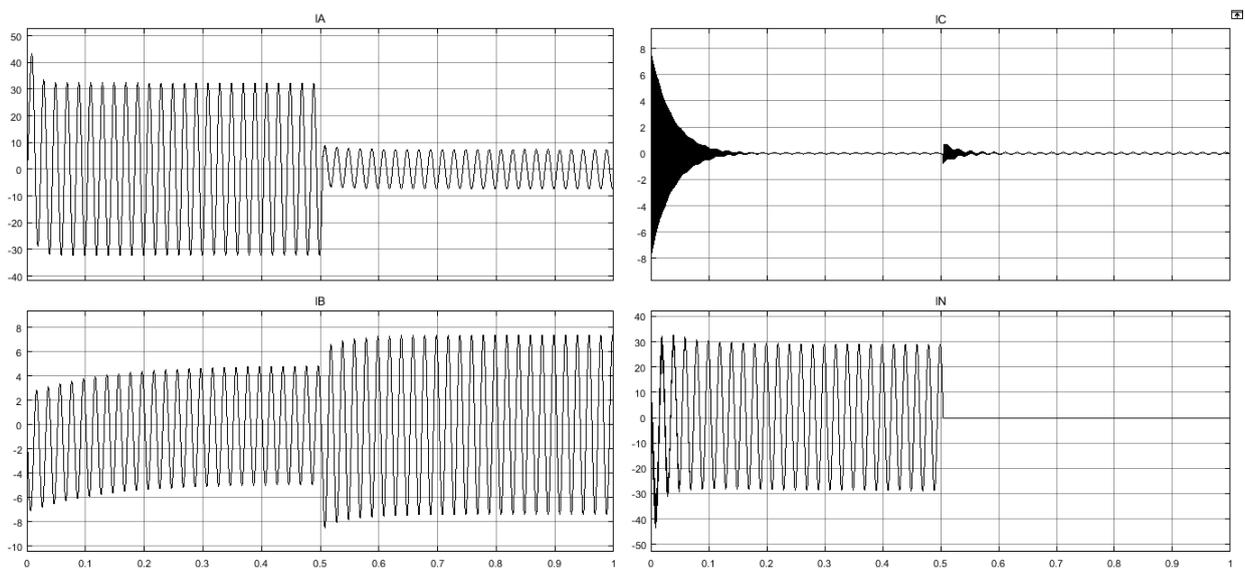
$U_{\phi}$ , В	220	220	220	220	220	220	220
$R$ , Ом	1	100	1	1	100	100	1
$L$ , мГн	1	1	100	1	100	1	100
$C$ , мкФ	1	1	1	100	1	100	100
Рисунок	2а и 3а	2б и 3б	2в и 3в	4а и 5а	4б и 5б	4в и 5в	6 и 7



а

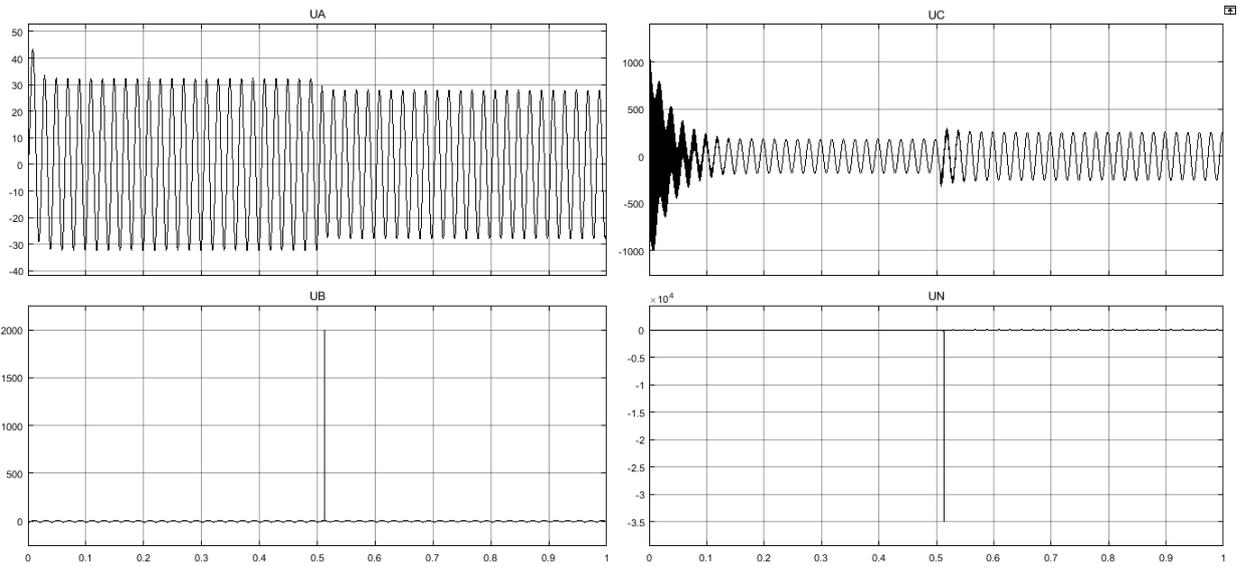


б

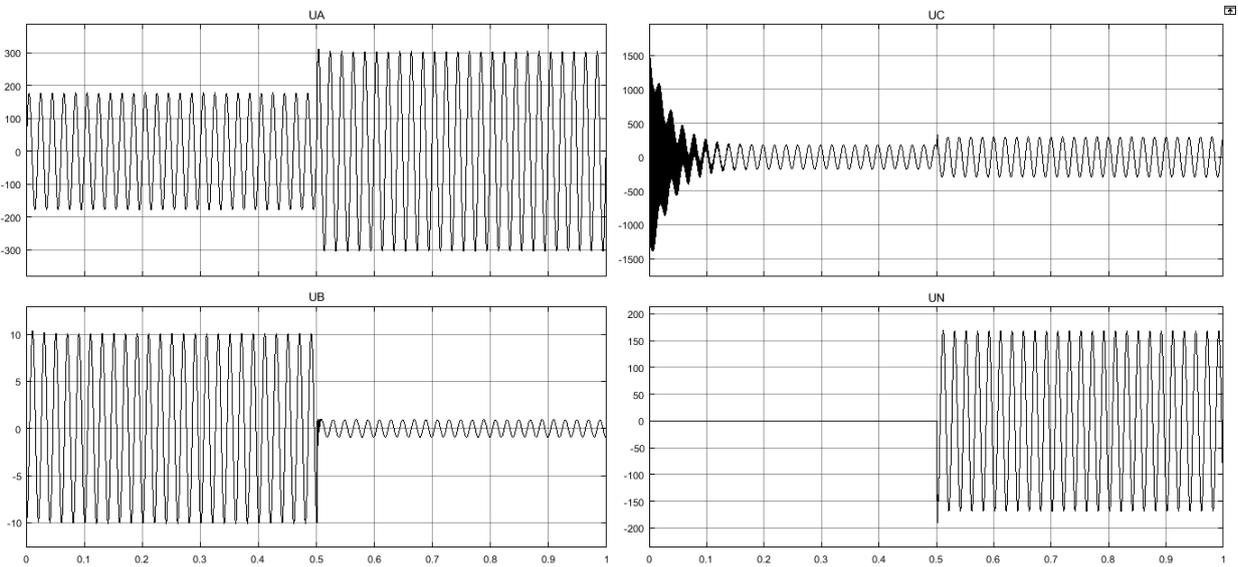


в

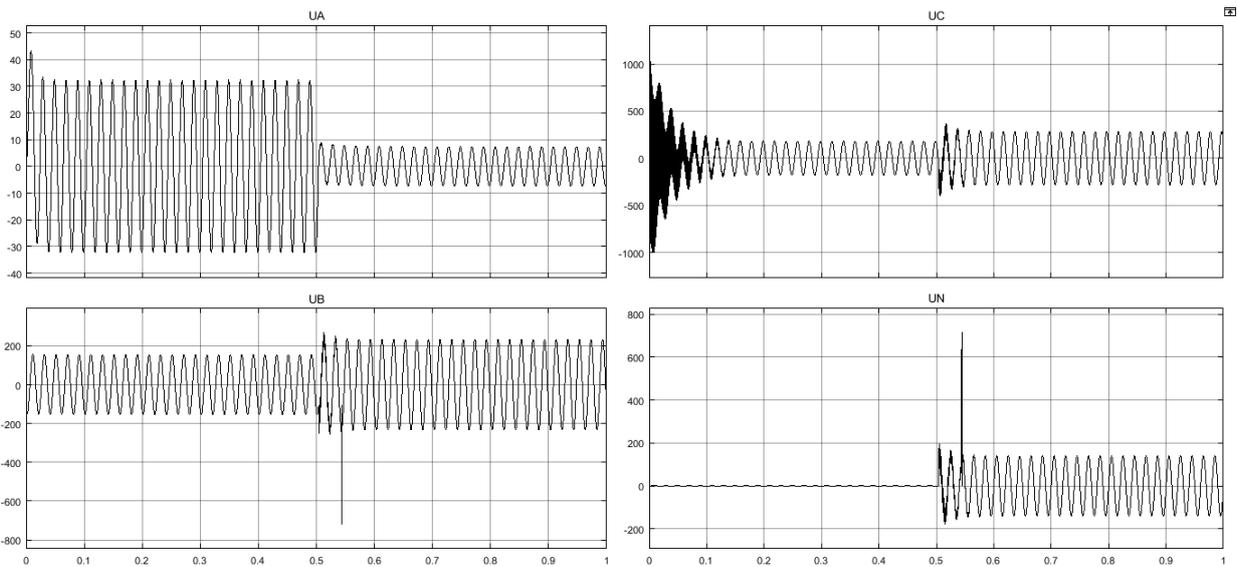
Рисунок 2. Осциллограммы токов при протекании переходного процесса



а

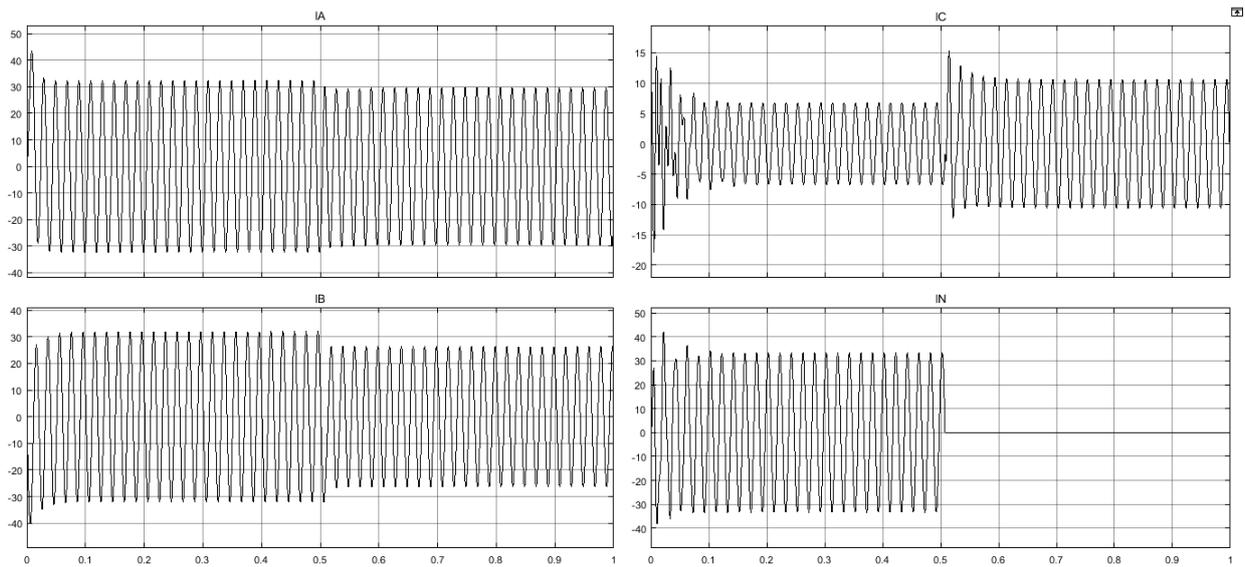


б

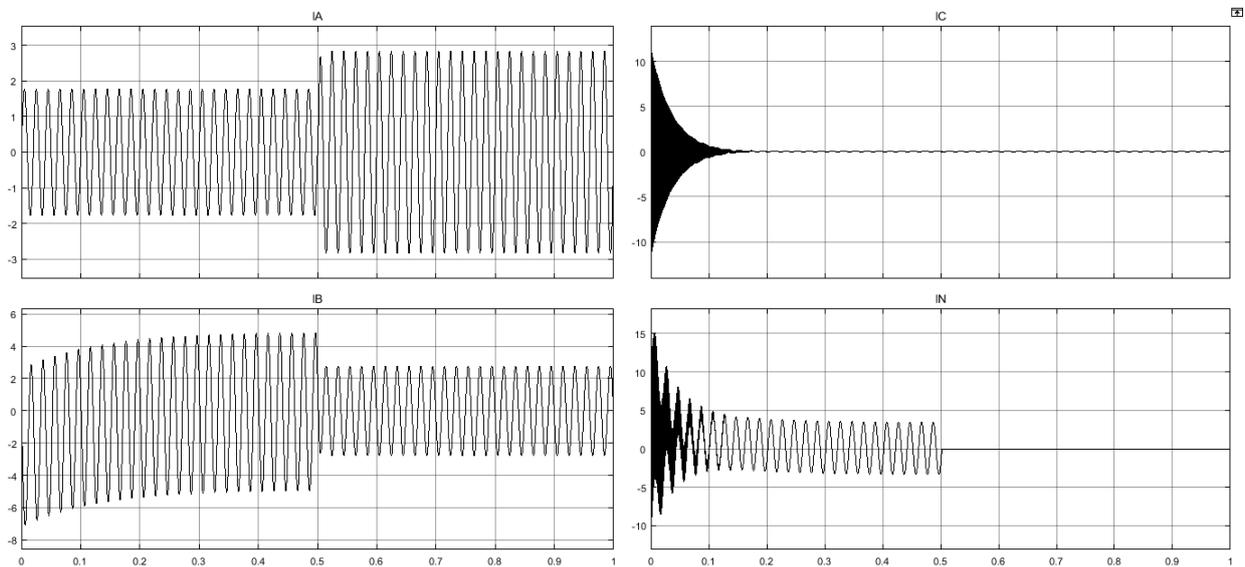


в

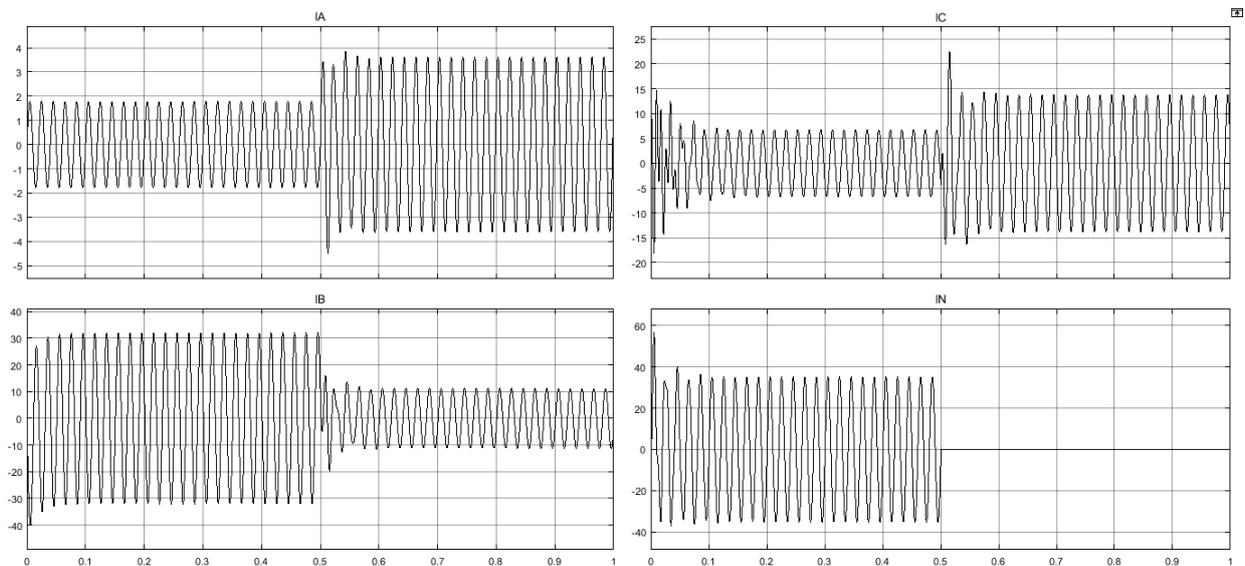
Рисунок 3. Осциллограммы напряжений при протекании переходного процесса



а



б



в

Рисунок 4. Осциллограммы токов при протекании переходного процесса

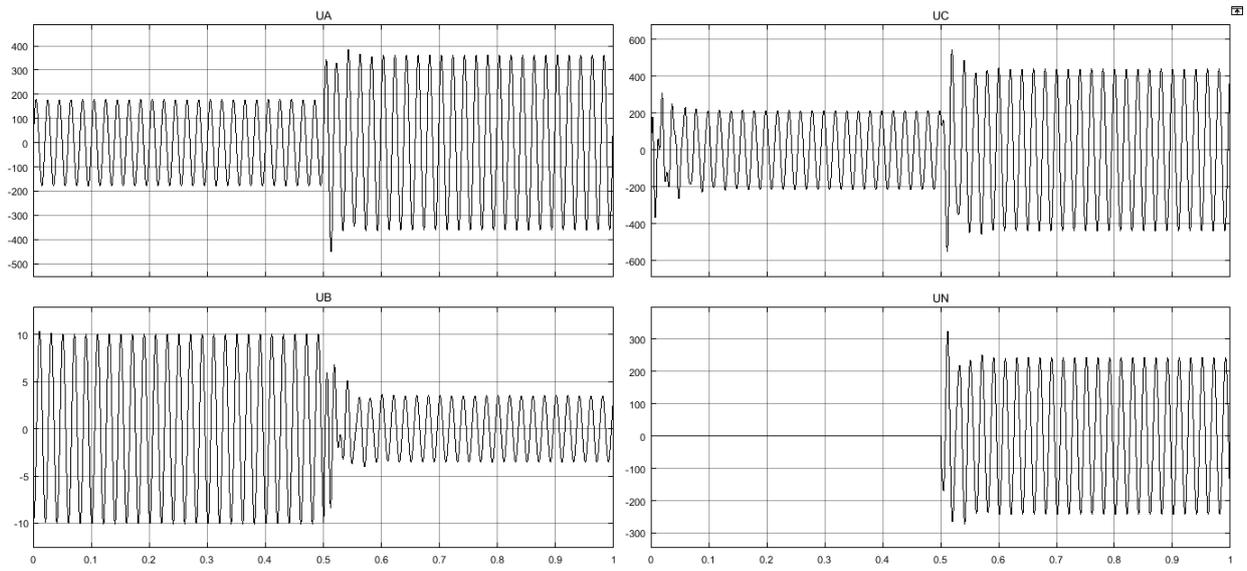
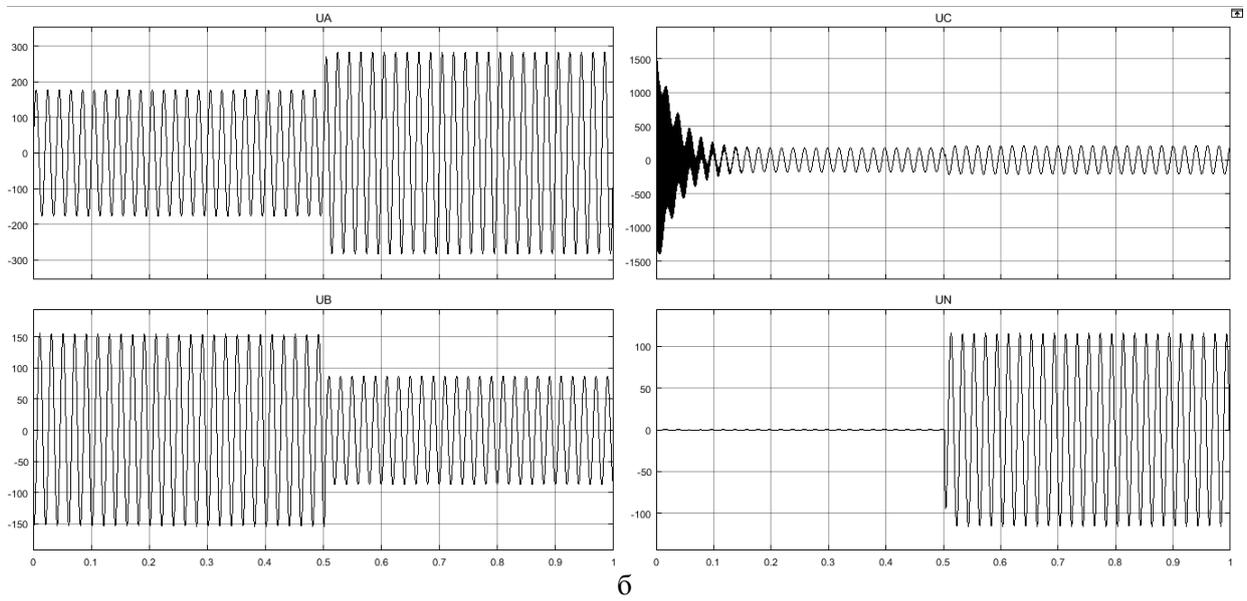
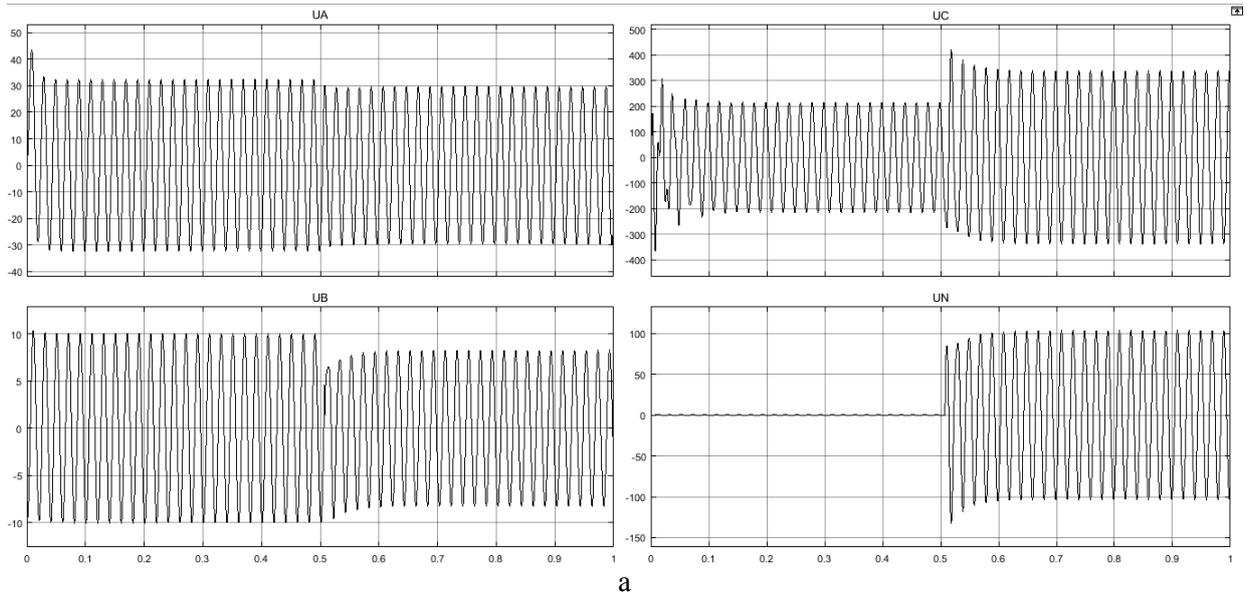


Рисунок 5. Осциллограммы напряжений при протекании переходного процесса

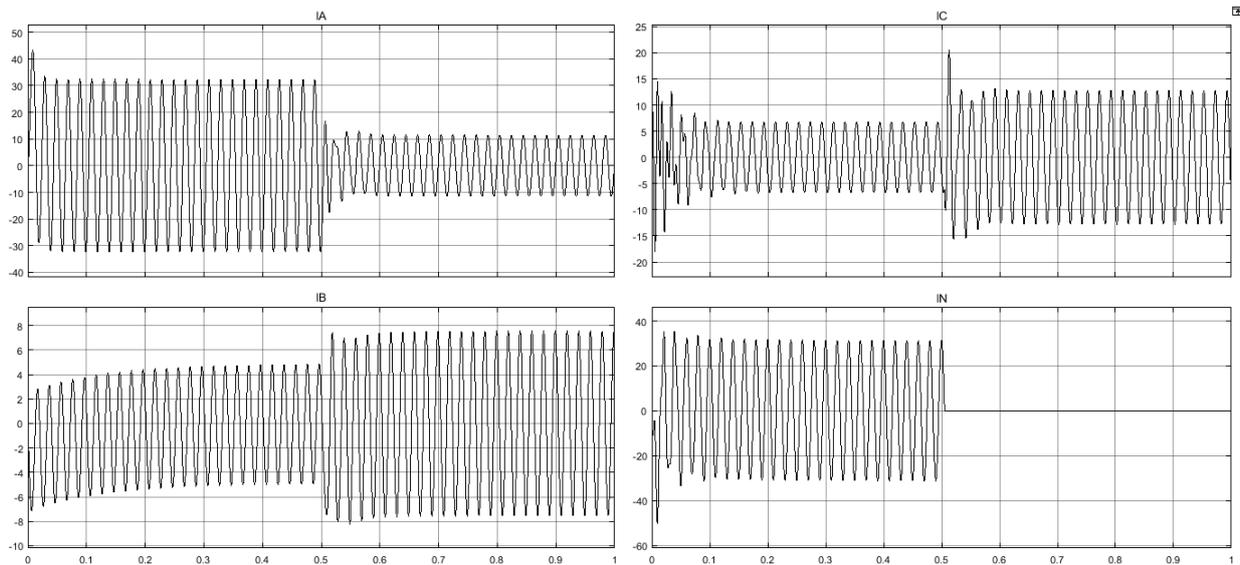


Рисунок 6. Осциллограммы токов при протекании переходного процесса

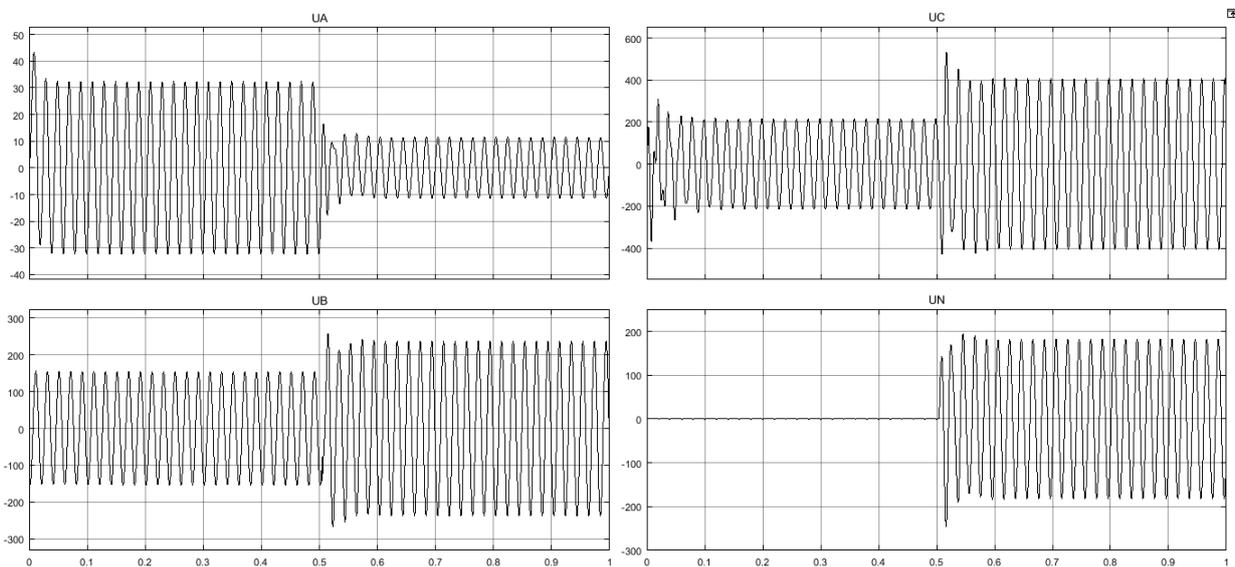


Рисунок 7. Осциллограммы напряжений при протекании переходного процесса

Таким образом, видим, что при различном соотношении параметров происходят различные процессы. В тех случаях, когда реактивное сопротивление превосходит активное при обрыве нейтрального провода происходит резкий скачек напряжения, что может привести к пробое изоляции и выводу из строя приборов.

УДК 621.3

**ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТКZ15**

Дедюль Ю.И.

Научный руководитель – доцент Бобко Н.Н.

Программа ТКZ для расчета токов несимметричных токов короткого замыкания (КЗ) ориентирована на учебный процесс и предназначена для расчета токов КЗ при выполнении курсовых и дипломных работ. Программа дает возможность рассчитать полное значение периодической составляющей сверхпереходного тока трехфазного, двухфазного, однофазного и двухфазного на землю КЗ, симметрические составляющие этого тока и распределение их по ветвям схемы. Нагрузки и активные сопротивления не учитываются. Сопротивления ветвей должны быть представлены в относительных единицах. Узлы с нулевым потенциалом (нейтрали генераторов) обязательно должны иметь номер ноль. Остальные узлы нумеруются целыми числами в возрастающем порядке. Один и тот же узел в должен иметь одинаковый номер.

Программа включает в себя главную программу ТКZ и подпрограмму ZHORTKA. Подпрограмма ZHORTKA полностью повторяет такую же подпрограмму в программах ZORKA и NAKLAD и тут не рассматривается. Текст программы ТКZ обеспечен комментариями, которые дают возможность понять реализацию алгоритмов, порядок создания файла исходных данных и расшифровки файла результатов.

Расчет режима короткого замыкания выполняется как расчет установившегося режима в схеме замещения, построенной для сверхпереходного режима. Математической моделью этого режима является модель на основе узловых потенциалов, которая представляет собой систему алгебраических уравнений, порядок которой равен количеству линейно зависимых узлов схемы. Входные данные о схеме замещения представляются в письменной форме, система узловых уравнений в памяти ЭВМ не формулируется, а свёртка схем замещения прямой последовательности, обратной последовательности и нулевой последовательности для заданного узла короткого замыкания выполняется на основе формул превращения многолучевых звезд в полные многоугольники. В процессе свёртывания выполняется запоминание информации о выведенных узлах схемы замещения. В результате свёртывания схемы замещения прямой последовательности и нулевой последовательности представляются эквивалентными ветвями, рассчитываются величины симметричных суммарных токов короткого замыкания в месте короткого замыкания. При необходимости расчета распределения токов по ветвям схемы выполняется расчет узловых напряжений в схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей и расчет симметричных суммарных токов короткого замыкания в ветвях схемы. Матрица узловых проводимостей в памяти ЭВМ не формируется, а превращение звезд в многоугольники происходит путем логичной и арифметической обработки массивов информации о ветвях схем прямой и нулевой последовательностей.

**Литература**

1. ГОСТ 27514-87. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – Введ. 1989-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 40 с.
2. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. Утв. 1998-03-23. М.: РАО энергетики и электрификации «ЕЭС России», 1998.
3. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.

УДК 621.3

## ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

Баран Ю.Г., Войтович А.В.

Научный руководитель – Романович С.М.

Геоинформационная система (ГИС) определения места повреждения (ОМП) воздушных линий (ВЛ) предназначена для оперативного определения участка распределительной сети 6–35 кВ, на котором произошло короткое (КЗ) или однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) (рисунок 1). Система предназначена для работы в сети с односторонним питанием.

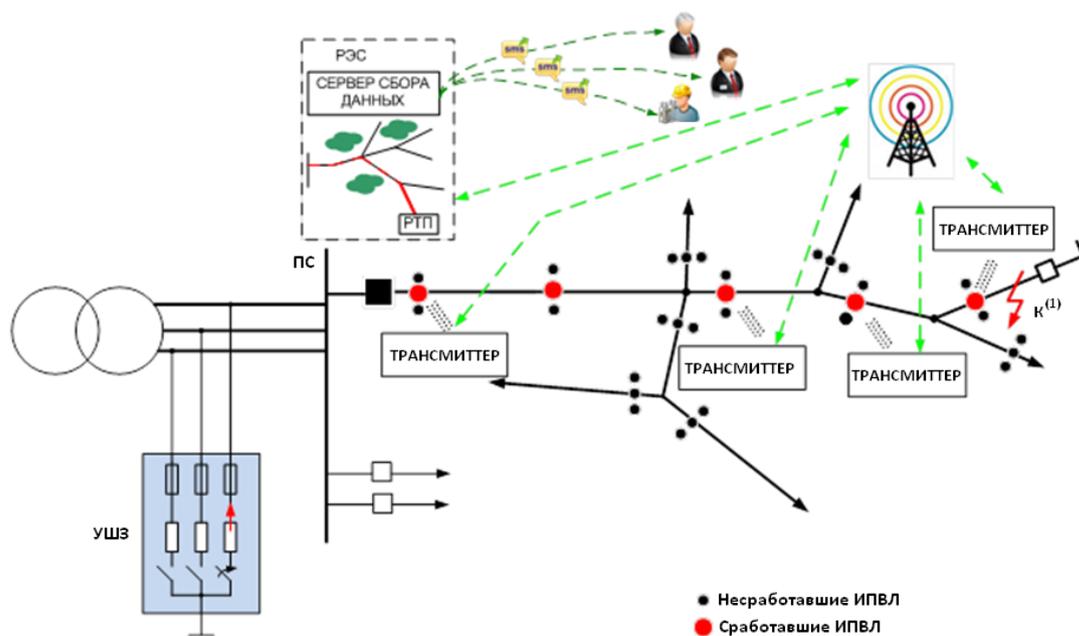


Рисунок 1. Структура системы ОМП ВЛ 6–35 кВ

В состав входят:

- индикаторы повреждения воздушных линий (ИПВЛ) с радиоканалом;
- трансмиттеры;
- устройство шунтирования замыкания (УШЗ);
- программный продукт топографического ОМП.

ИПВЛ устанавливаются через определенное расстояние непосредственно на провода ВЛ на развилках, вдоль протяженных или на границах труднодоступных участков в трех фазах. Монтаж ИПВЛ может вестись без снятия напряжения ВЛ при помощи установочного комплекта. В свою очередь трансмиттеры монтируются на опору вблизи индикаторов. Питание трансмиттеров осуществляется от солнечной батареи. При своем срабатывании ИПВЛ связываются с трансмиттером по радиоканалу на открытой для использования частоте и передают информацию о факте своего срабатывания и виде повреждения. Трансмиттер ретранслирует информацию о повреждении в головной центр по GSM-каналу. Программа топографического ОМП обрабатывает поступающую информацию, отображает поврежденный участок на карте с привязкой к карте местности и осуществляет оперативное оповещение персонала посредством SMS и e-mail рассылки.

По принципу действия ИПВЛ не срабатывает при набросах токов нагрузки, бросках тока намагничивания, внешних КЗ. ИПВЛ различает КЗ и ОЗЗ. В режиме КЗ на контролируемом участке фиксируется наброс тока более чем на 120 А с его последующим спадом до нуля (отключение повреждения). В свою очередь при внешнем КЗ происходит

отключение поврежденного участка смежным выключателем, а по линии сохраняется протекание тока нагрузки, и по этой причине ИПВЛ не срабатывает.

УШЗ обеспечивает работу ИПВЛ в режиме ОЗЗ. УШЗ устанавливается на шинах подстанции. При возникновении ОЗЗ (по факту появления напряжения нулевой последовательности) УШЗ кратковременно подключает резистор, тем самым увеличивая ток в поврежденной фазе на 30–40 А, что приводит к срабатыванию ИПВЛ.

Для обработки поступающей информации от ИПВЛ и трансмиттеров используется специализированный программный продукт топографического ОМП (рисунок 2). Программа отображает схему прохождения линий сетевого района. Схема строится на основе географических координат, получаемых во время монтажных работ – снимаются координаты точек установки трансмиттеров при помощи ГЛОНАСС/GPS навигаторов. По результатам анализа информации от трансмиттеров программа определяет поврежденный участок сети, отображает его на карте и осуществляет оповещение дежурного (ремонтного) персонала.

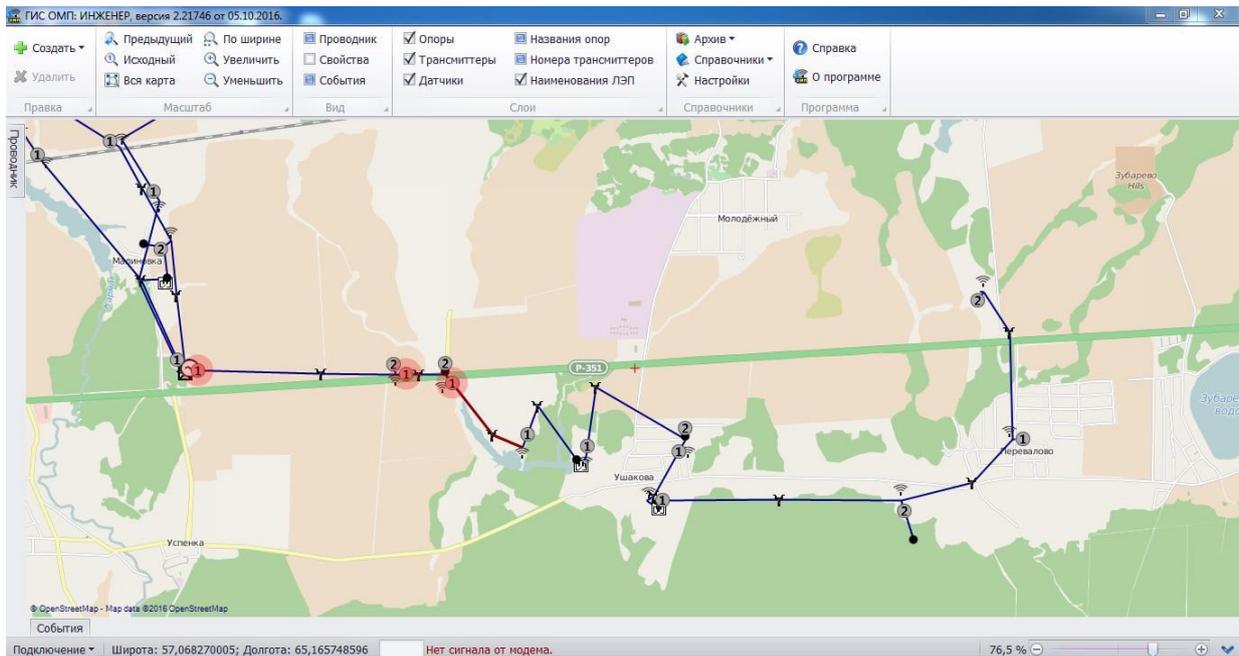


Рисунок 2

Система ОМП кабельных линий (КЛ) предназначена для оперативного определения участка распределительной сети 6–35 кВ, на котором произошло КЗ или ОЗЗ. Система предназначена для работы в распределительной сети с односторонним питанием (рисунок 3).

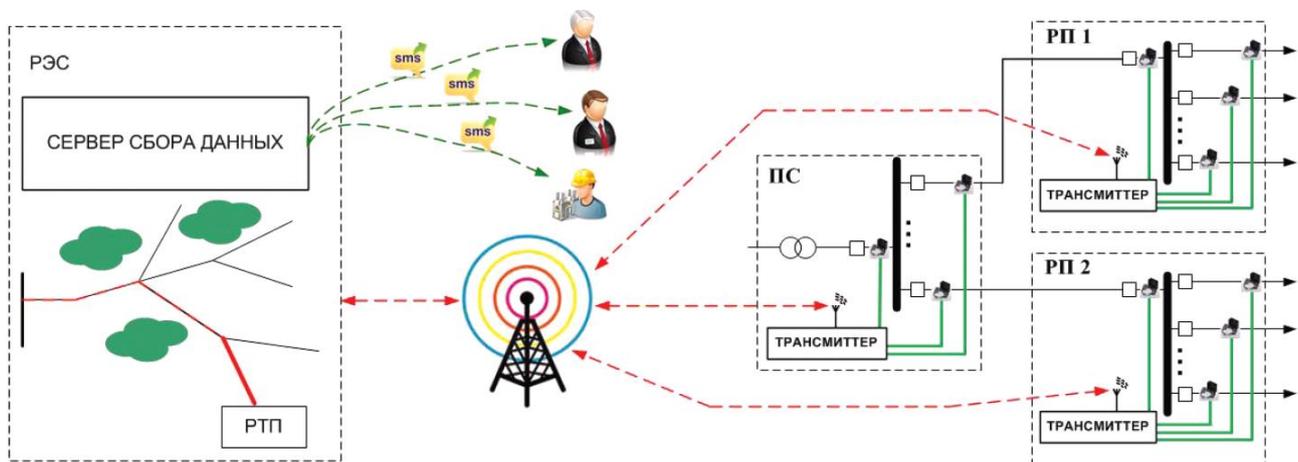


Рисунок 3. Структура системы ОМП КЛ 6–35 кВ

В состав системы входят:

- индикаторы повреждения кабельных линий (ИПКЛ);
- выносные панели индикации;
- трансмиттеры;
- программный продукт топографического ОМП.

Для детектирования КЗ и ОЗЗ имеются различные типы индикаторов. ИПКЛ для распознавания КЗ устанавливаются в ячейку КРУ на ПС/РП/РТП на кабельные муфты в трех фазах, а для детектирования ОЗЗ непосредственно на кабель. Монтаж индикаторов может вестись без снятия напряжения при помощи установочного комплекта. Сигнал о срабатывании ИПКЛ передается по оптоволокну на выносную панель индикации, монтируемую на щите релейного отсека ячейки КРУ. Для ретрансляции данных о срабатывании ИПКЛ на верхний уровень системы (РЭС, диспетчерские пункты) используются трансмиттеры, которые монтируются в ЗРУ, КРУН в любом удобном для этого месте. Питание трансмиттеров осуществляется от сети переменного оперативного тока объекта напряжением 220 В. Один трансмиттер может получать информацию от 6 выносных панелей индикации. Получив информацию о факте срабатывания ИПКЛ, трансмиттер ретранслирует данные о повреждении в головной центр по GSM-каналу. Программа топографического ОМП обрабатывает поступающую информацию, отображает поврежденный участок на карте и осуществляет оперативное оповещение персонала посредством SMS и e-mail рассылки.

По принципу действия ИПКЛ не срабатывает при набросах токов нагрузки, бросках тока намагничивания, внешних КЗ. В режиме КЗ на контролируемом участке фиксируется наброс тока более чем на 120 А с его последующим спадом до нуля (отключение повреждения). В свою очередь при внешнем КЗ происходит отключение поврежденного участка смежным выключателем, а по линии сохраняется протекание тока нагрузки, и по этой причине ИПКЛ не срабатывает.

#### Литература

1. Журкин, И.Г. Геоинформационные системы / И.Г. Журкин, С.В. Шайтура. – М. : КУДИЦ-ПРЕСС, 2009.
2. Геоинформационная система ОМП ВЛ и КЛ 6–35 кВ (ГИС ОМП) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://relematika.ru/produkty/6-35\\_kv/geoinformatsionnaya\\_sistema\\_omp\\_vl\\_i\\_kl\\_6\\_35\\_kv\\_gis\\_omp/](https://relematika.ru/produkty/6-35_kv/geoinformatsionnaya_sistema_omp_vl_i_kl_6_35_kv_gis_omp/). – Дата доступа : 05.05.2018.

УДК 621.311.001.57

## **АНАЛИЗ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

Чуприков Т.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.

Цифровое моделирование современных электроэнергетических систем в настоящее время является неотъемлемой частью повседневной исследовательской деятельности. Ниже перечислены некоторые наиболее важные сферы применения цифрового моделирования энергосистем:

- релейная защита и автоматика энергосистем;
- управление напряжением и частотой источников питания;
- крупномасштабное моделирование в реальном времени для создания моделей крупных энергосистем;
- обучение и профессиональная подготовка.

Время, необходимое для полного цифрового расчета, зависит от различных факторов, таких как размеры моделируемой энергосистемы, характеристики анализируемых переходных процессов, число точек наблюдения и, наконец, в большой степени, от производительности используемых компьютеров. В общем, основываясь на временном критерии можно выделить два типа моделирования.

Время вычисления каждого временного интервала превышает время, необходимое для смоделированного процесса на самом деле, таким образом, моделирование в целом может занимать несколько секунд или даже минут. Такого рода моделирование осуществляется в автономном режиме и называется автономным или независимым моделированием. Результаты обычно сохраняются в файлах, например, в формате Comtrade – это международный формат записи осциллограмм, предназначенный для хранения информации о значениях и параметрах электрических сигналов, и отображаются графически в виде временных диаграмм для последующего анализа или воспроизведения на специальном испытательном оборудовании и аналоговых усилителях непосредственно в тестируемое оборудование.

Время вычисления равно или меньше каждого временного шага в моделируемом процессе. Таким образом, результат каждого временного шага доступен в оперативном режиме в реальном времени, как если бы процесс запускался в естественной среде в реальной энергосистеме. Результат также можно сохранить в файлах и просмотреть позднее в графическом виде или воспроизвести различными способами, но самым большим преимуществом моделирования в реальном времени является возможность объединения в замкнутый цикл различного аппаратного обеспечения и изучения его функционирования, как если бы данное аппаратное обеспечение было установлено непосредственно в реальной энергосистеме. Такой вид моделирования называется цифровым моделированием замкнутого цикла в реальном времени (CSRTDS). Одним из важных требований, предъявляемых к данному виду моделирования, является строгий контроль временных шагов на протяжении всего времени в заданных пределах, в противном случае полученные результаты могут оказаться недостоверными.

Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Моделирование не в реальном времени не требует высокопроизводительных компьютеров, сохраненные файлы можно позднее воспроизвести на испытательном оборудовании, используя различные промежуточные аппаратные средства, например, усилители тока и напряжения, когда речь идет о проверке защиты. Недостатком является то, что нет возможности проанализировать непосредственный отклик смоделированной системы на определенные воздействия со стороны испытательного оборудования во время конкретного события. С другой стороны,

автономное моделирование дает возможность проанализировать чрезвычайно быстрые переходные процессы, которые невозможно смоделировать сегодня из-за очень коротких временных интервалов даже с использованием самых лучших компьютеров.

В области РЗА моделирование позволяет наглядно изучить принципы и особенности работы элементов энергетической системы, закрепить теоретические знания, полученные из учебников и специализированной литературы. Кроме того, компьютерная техника позволяет выполнить модель реального устройства релейной защиты и автоматики и проанализировать его поведение в различных режимах работы защищаемого объекта. Такой подход полезен как при разработке цифровых устройств, так и в процессе их наладки и эксплуатации.

Одним из наиболее эффективных инструментов, позволяющих выполнить всестороннее моделирование работы энергосистемы и устройства РЗА, в настоящее время является пакет прикладных программ MatLab. Библиотека блоков SimPowerSystems является дополнительной библиотекой Simulink и содержит набор блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств. Комбинируя возможности Simulink и SimPowerSystems, пользователь может не только имитировать работу устройств во временной области, но и выполнять различные виды анализа таких устройств. В частности, пользователь имеет возможность рассчитать установившийся режим работы системы на переменном токе, выполнить расчет полного сопротивления участка цепи, получить частотные характеристики, проанализировать устойчивость, а также выполнить гармонический анализ токов и напряжений. Несомненным достоинством SimPowerSystems является то, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Такой подход позволяет значительно упростить всю модель, а значит, повысить ее устойчивость и скорость работы. Кроме того, в модели с использованием блоков SimPowerSystems можно использовать блоки и остальных библиотек Simulink, а также функции самого MatLab, что дает практически неограниченные возможности для моделирования электротехнических систем. Библиотека SimPowerSystems достаточно обширна. В том случае, если все же нужного блока в библиотеке нет, пользователь имеет возможность создать свой собственный блок как с помощью уже имеющихся в библиотеке блоков, реализуя возможности Simulink по созданию подсистем, так и на основе блоков основной библиотеки Simulink и управляемых источников тока или напряжения.

Одним из наиболее функционально насыщенных является программный комплекс PSS®E, разработанный Siemens PTI. Программный комплекс PSS®E предназначен для расчета и анализа режимов работы электроэнергетических систем в установившемся и динамических режимах. Комплекс позволяет проводить всесторонний анализ работы системы в целом: линий электропередач, генерирующих источников, силового оборудования подстанций с целью нахождения оптимального режима их работы. Кроме того, он оказывает неоценимую помощь при проектировании новых объектов энергосистем как в части выбора параметров силового оборудования в нормальных режимах эксплуатации, так и в прогнозировании наиболее критичных, аномальных режимов работы сети. Программа позволяет моделировать аварийные режимы, такие как различные виды коротких замыканий, несимметрий в узлах сети и промежуточных точках оборудования энергосистемы. Программа позволяет провести детерминированный и вероятностный анализ надёжности. Для исследования динамической устойчивости системы в программе есть дополнительный модуль, позволяющий графически отобразить режимную информацию при различных видах возмущений.

Программный комплекс ETAP компании Operation Technology, Inc. (OTI) является комплексным инструментом для детального анализа систем переменного и постоянного токов. Базовый пакет ETAP представляет собой набор инструментов, встроенных расчетных модулей и инженерных библиотек, которые позволяют создавать, настраивать и управлять моделью энергосистемы. Базовые инструменты позволяют с легкостью создать однолинейную схему трехфазной или однофазной сети переменного или постоянного тока с

неограниченным количеством присоединений и элементов, включая детализированное представление измерительных приборов и компонентов системы заземления. Инженерные библиотеки включают полностью проверенные и утвержденные данные, основанные на опубликованных производителем параметрах оборудования.

Модуль расчёта установившегося режима ЕТАР позволяет провести расчёт установившегося режима для электрической схемы созданной вами электроэнергетической сети и отобразить на схеме результаты расчёта. Одновременно с расчётом производится проверка входящего в схему оборудования и соответствие результатов расчётным условиям. При несоответствии параметров оборудования или расчётных условий результатам расчёта ЕТАР генерирует сигналы предупреждения о нарушениях в системе. Выполненный расчёт может быть экспортирован в виде множества отчётов в различные сторонние программы, можно рассчитывать различные варианты схемы и сравнивать между собой их результаты с помощью анализатора.

Модуль расчёта коротких замыканий ЕТАР представляет собой автоматизированный комплекс по расчёту коротких замыканий в электроэнергетических системах. Он позволяет повысить производительность расчётов в сложных системах, экономя время и обеспечивая точные и надёжные результаты за короткое время. Автоматически составляется схема замещения для расчета короткого замыкания для всех точек энергосистемы. ЕТАР позволяет рассчитать короткие замыкания при различных типах повреждений в сетях с различными режимами заземления нейтрали, определить мгновенные, установившиеся токи и токи отключения короткого замыкания. Токи короткого замыкания определяются как результат подпитки со стороны всех входящих в систему источников, в том числе и от двигателей.

Модуль согласования устройств РЗА ЕТАР предоставляет возможность осуществлять эффективную координацию устройств релейной защиты в сетях переменного и постоянного тока. Построение схем защит осуществляется с помощью инструментов графического дизайнера однолинейных схем. ЕТАР поддерживает множество типов устройств защиты и коммутационных аппаратов, с помощью которых можно построить любую схему релейной защиты. Обширная библиотека устройств включает в себя оборудование ведущих мировых производителей. В случае необходимости, ЕТАР позволяет добавить в библиотеку отсутствующее в ней оборудование с нужными вам характеристиками. Встроенная система визуализации времятоковых характеристик обеспечивает эффективное задание уставок выбранных устройств защиты. В состав модуля входит функция определения последовательности срабатывания устройств защиты и коммутационных аппаратов, включающая в себя встроенный анализ коротких замыканий, пуска двигателей и графические средства визуализации последовательности срабатывания устройств. Также, модуль позволяет определить зоны действия защит. Кроме того, модуль РЗА позволяет производить тестирование реальных реле путём их подключения к ЕТАР через специальный интерфейс, позволяя проводить сравнение характеристик реле с данными, измеряемыми в установившемся режиме и во время переходного процесса. Результаты такого тестирования обеспечивают правильность срабатывания реле, в частности – при токах короткого замыкания, содержащих затухающие апериодические и колебательные компоненты.

ЕТАР предоставляет набор модулей для анализа динамических процессов в электроэнергетических системах. С их помощью ЕТАР позволяет моделировать различные изменения в схеме и производить расчёты для выбранного временного диапазона с учётом динамических моделей элементов.

Программный комплекс моделирования энергосистем PSCAD компании «ЭнЛАБ» является быстродействующим, точным и удобным инструментом для моделирования работы энергосистем и силовых электронных преобразователей при их проектировании, анализе, оптимизации и верификации. Программа PSCAD с модулем моделирование переходных процессов EMTDC предоставляет широкий выбор инструментов и богатую библиотеку компонентов для глубокого анализа работы энергооборудования.

PSCAD/EMTDC позволяет провести исследования переходных процессов в электроэнергетических системах, включая короткие замыкания, автоматическое повторное включение, броски тока, феррорезонанс, анализ потокораспределения и переходных процессов для взаимосвязанных энергосистем, как, например, включение нового оборудования, учёт пропускной способности, аварийных ограничений, оценка технических возможностей передачи и т. д.

Построение и изменение модели выполняется в графическом виде, характеристики и свойства каждого элемента модели задаются в виде табличных данных. Готовая модель наглядна, понятна для анализа и проверки, а для удобства работы она может быть многослойной: на главном слое сложные объекты представлены в виде укрупненных объектов, входя в которые можно увидеть детальное строение объекта.

Экспорт и импорт сигналов производится в форматах RTP, COMTRADE. Пользователи имеют возможность создавать в PSCAD собственные компоненты, которые могут быть представлены в виде «черного ящика» с собственным алгоритмом работы, описанным на языке высокого уровня (C++, Fortran, MatLab/Simulink и пр.). По файлам аварийных процессов, смоделированных в PSCAD, можно проводить проверку устройств РЗА.

PSCAD ориентирован на специалистов энергетиков и электротехников, и его использование для моделирования энергосистем предоставляет персоналу множество преимуществ:

- всесторонние исследования работы реального оборудования в условиях, максимально электрически близких к тем, которые имеют место в реальных энергосистемах;
- возможность разработки и отладки алгоритмов действия устройств управления, регулирования и защиты;
- возможность создания крупномасштабных моделей сетей с расчетом распределения потоков энергии;
- моделирование быстродействующих процессов, таких как удары молнии, пробой изоляции изоляторов, восстановление прочности промежутка в дугогасительной камере.

Внедрение новых технологий в современные энергосистемы – чрезвычайно ответственный шаг, оказывающий влияние не только на техническую сферу, но и на социально-экономические отношения в человеческом обществе. Для этого необходимы чрезвычайно высокое качество инструментальных средств, используемых для тестирования и разработки. Хорошо известно, что качество конкретного моделирования никогда не будет выше качества менее точной модели элемента энергосистемы, используемой в пределах всей смоделированной сети. В связи с этим, очень важно выбирать правильный инструментарий, с положительными отзывами, полученными по результатам надежной эксплуатации большого числа установок по всему миру. Можно ожидать, что с развитием цифровых компьютерных технологий будут развиваться и цифровые модели энергосистем, а моделируемые системы будут увеличиваться в объемах.

### Литература

1. Моделирование энергосистем в реальном времени с использованием RTDS [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://digitalsubstation.com/blog/2013/12/02/modelling>. – Дата доступа : 19.04.2018.
2. Новаш, И.В. Моделирование энергосистем и испытание устройств релейной защиты в режиме реального и модельного времени / И.В. Новаш // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2017. – Т. 60. – № 3. – С. 198–210.
3. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

УДК 621.3

## УКАЗАТЕЛИ ПОВРЕЖДЕННОГО НАПРАВЛЕНИЯ

Доливайло А.А.

Научный руководитель – Климкович П.И.

Нарушение нормального режима работы электроэнергетических систем, как правило, происходят из-за повреждения её элементов, в частности, линий электропередачи (ЛЭП). Причинами повреждений ЛЭП являются воздействия природных и технических факторов. К природным факторам относятся ветер, гололед, перепад температур, атмосферные перенапряжения, к техническим – короткие замыкания (КЗ), внутренние перенапряжения, нарушения правил технической эксплуатации, однофазные и многофазные замыкания, обрывы проводов и другие повреждения и т. п.

Повреждение линий электропередачи приводит к нарушению нормального режима работы электроэнергетических систем и, как следствие, к нарушению нормального электроснабжения потребителей, снижению качества электрической энергии и повышению потерь электроэнергии в сети. Для восстановления нормального режима работы необходимо как можно быстрее восстановить поврежденную линию. Основную часть времени восстановления поврежденной линии занимает процесс определения места повреждения.

Указатель поврежденного участка УПУ-1 основан на использовании магнитного датчика тока для дистанционного контроля тока в проводах линии и элемента отбора напряжения для автоматического возврата устройства в исходное состояние при восстановлении напряжения на линии.

Указатели предназначены для определения поврежденного участка при междуфазных КЗ в сети 6–10 кВ. Допускается использование указателя на линиях 20–35 кВ. Указатель срабатывает при резком увеличении тока в проводах контролируемой линии на 50 А и более. Возврат указателя обеспечивается при протекании тока в цепи отбора напряжения 50 мкА и более. Работа указателя обеспечивается при токах нагрузки линии до 100 А.

Указатель типа УПН-3 (рисунок 1) предназначен для определения направления к месту повреждений на линии электропередачи с ответвлениями. Указатели устанавливаются на линии в точках ответвлений. Указатели содержат преобразователи тока 1ПТ–3ПТ, включенные в цепи участков троса Т, фазосравнивающие элементы фиксации 1ЭФ–2ЭФ, элементы индикации 1ЭИ–2ЭИ и элемент возврата ЭВ. Буквами А, В и С обозначены фазные провода линии.

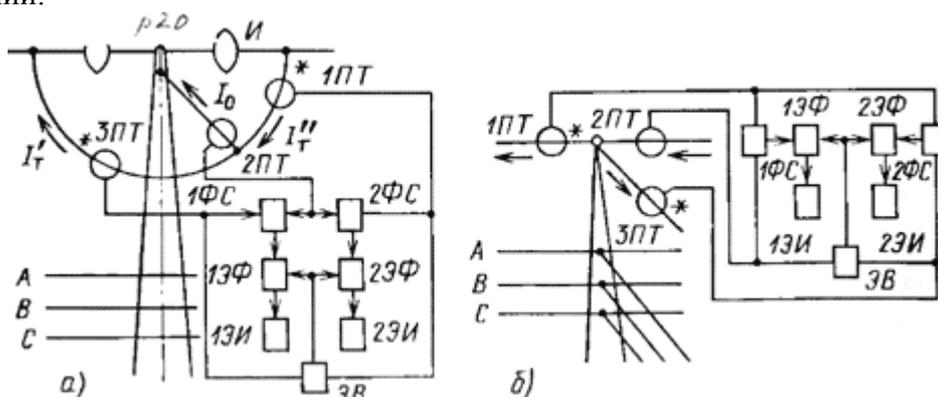


Рисунок 1. Структурные схемы указателей направления к месту повреждения ВЛ с тросов

При КЗ на участке линии, контролируемом преобразователем 2ПТ или 3ПТ, срабатывает соответственно элемент фиксации 1ЭФ или 2ЭФ. При повреждении участка линии до ответвления срабатывают элементы фиксации 1ЭФ и 2ЭФ.

Результаты испытаний показывают, что составляющие тока замыкания на реальных ВЛ снижаются до 5 А в опоре и 20–30 А в тросе практически через 15–30 пролетов от места

замыкания. Для эффективного применения указатели типа УПН-2 должны реагировать на значения тока соответственно 25 А в тресе и 5 А в опоре. При этом контролируемые указатели участка линии превышают по протяженности участки, выделяемые дистанционными средствами ОМП, что обеспечивает правильность действия указателей во всех режимах работы линии. Указатели модификации УПН-3, реагирующие на вынужденную составляющую тока в тресе ВЛ, практически могут не иметь ограничений по длине контролируемого ответвления линии.

Указатели направлений к месту повреждения достаточно просты и могут изготавливаться силами энергосистем.

Проведенный анализ методов и средств ОМП позволяет сделать следующие выводы:

- топографическое ОМП наиболее точное, но занимает значительное время;
- импульсное ОМП малоэффективно на неоднородных ЛЭП за счет появления «паразитных» отражений импульсов;
- двухстороннее ОМП по ПАР, хоть и обладает высокой точностью, однако требует значительных капитальных вложений и имеет невысокую надежность;
- одностороннему ОМП по ПАР присуща методическая погрешность за счет наличия неизвестной информации, к которой относится переходное сопротивление в месте повреждения и система с противоположного конца поврежденной линии.

На сегодняшний день ОМП ЛЭП имеет высокую погрешность. Принимая во внимание качественные изменения, произошедшие в области измерительных средств, а именно переход от аналоговых устройств к цифровым, выполненным на базе ЭВМ, появляется возможность усовершенствования методов и средств ОМП. При этом актуальным является усовершенствование наиболее дешевых и надежных методов и средств одностороннего ОМП по ПАР путем уменьшения влияния неизвестной информации на точность получаемых результатов.

УДК 621.3

## ПРИЕМНИКИ СОБСТВЕННЫХ НУЖД

Башаркевич Я.В., Башаркевич Е.К.

Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

Приемники собственных нужд (СН) подстанций по степени ответственности делятся на три группы. Первая группа – это приемники, отключение которых приводит к нарушению нормального режима эксплуатации, к частичному или полному отключению или к авариям с повреждением основного оборудования. Для питания электроприемников первой группы необходимо два источника с автоматическим включением резерва (I категория по ПУЭ).

Вторая группа – это приемники, отключение которых допустимо на 20–40 мин для подстанций с дежурным персоналом или до приезда обслуживающего персонала, если дежурного на подстанции нет. Восстановление питания у приемника этой группы осуществляется вручную (II категория по ПУЭ).

К третьей группе относятся приемники, отключение которых допустимо на более длительной время (III категория по ПУЭ).

По режиму включения в работу электроприемники СН подстанции разделяются на постоянно включенные в сеть (в том числе цепи управления и релейной защиты); включаемые периодически в зависимости от температуры наружного воздуха, от изменения режима, при перерывах и т. д.; включаемые во время ремонтов.

Постоянно включенные приемники 1-й группы: оперативные цепи, электродвигатели системы охлаждения трансформаторов аппаратура связи и телемеханики, электродвигатели системы смазки и охлаждения, синхронных компенсаторов.

Периодически выключаемые приемники 2-й группы: электродвигатели компрессоров, зарядно-подзарядные устройства аккумуляторной батареи, освещение, электроотопление помещений, электроподогрев аппаратуры и шкафов высокого напряжения; 3-й группы – вентиляция и технологическая нагрузка вспомогательного здания, мастерские.

Включаемые при ремонте приемники 1-й группы: электродвигатели насосов пожаротушения; 3-й группы – маслоочистительная установка, грузоподъемники.

Мощность потребителей СН подстанций невелика, поэтому они питаются от сети напряжение 380/220 кВ, которая получает питание от понижающих трансформаторов. На двухтрансформаторных подстанциях 35–750 кВ устанавливаются два ТСН, мощность которых выбирают в соответствии с нагрузками, с учетом допустимой перегрузки при выполнении ремонтных работ и отказах одного из трансформаторов. Предельная мощность ТСН составляет 630, 1000 кВА. Присоединение ТСН к сети зависит от системы оперативного тока. Постоянный оперативный ток используют на всех подстанциях 330–750 кВ и выше и на подстанциях с РУ 110–220 кВ со сборными шинами. Переменный или выпрямленный – на подстанциях 35–220 кВ без выключателей высокого напряжения.

На подстанциях может быть один или несколько щитов СН 380/220 кВ в зависимости от компоновки оборудования на ОРУ и в машинном зале. Питание потребителей 1-й группы осуществляется по радиальным схемам, а 2-й и 3-й – по магистральным.

Схемы СН подстанций для насосных станций заимствуются из типовых проектов ГЭС малой мощности и подстанций 110–220 кВ потребителей с развитой системой шин 6–10 кВ

Состав потребителей СН подстанций зависит от типа подстанции, мощности трансформаторов, наличия синхронных компенсаторов, типа электрооборудования. Наименьшее количество потребителей СН на подстанциях, выполненных по упрощенным схемам, без синхронных компенсаторов, без постоянного дежурства. Это электродвигатели обдува трансформаторов, обогрев приводов, шкафов КРУН, а также освещение подстанции.

На подстанциях с выключателями ВН дополнительными потребителями являются компрессорные установки (для выключателей ВНВ, ВВБ), а при оперативном постоянном токе – зарядный и подзарядный агрегаты. При установке синхронных компенсаторов необходимы механизмы смазки их подшипников, насосы системы охлаждения.

Наиболее ответственными потребителями СН подстанций являются оперативные цепи, система связи, телемеханики, система охлаждения трансформаторов, аварийное освещение, системы пожаротушения, электроприемники компрессорной.

Мощность трансформаторов СН выбирается по нагрузкам СН с учетом коэффициентов загрузки и одновременности, при этом отдельно учитываются летняя и зимняя нагрузки, а также нагрузка в период ремонтных работ на подстанции.

Предельная мощность каждого трансформатора СН должна быть не более 630 кВА. При технико-экономическом обосновании допускается применение трансформаторов 1000 кВА.

Два трансформатора СН устанавливают на всех двухтрансформаторных подстанциях 35–750 кВ.

Один трансформатор СН устанавливают на однострансформаторных подстанциях 35–220 кВ с постоянным оперативным током, без синхронных компенсаторов и воздушных выключателей с силовыми трансформаторами ТМ. В этом случае предусматривается складской резерв в энергосистеме.

Если на однострансформаторной подстанции установлен синхронный компенсатор, воздушные выключатели или трансформатор с системой охлаждения Д и ДЦ, то предусматриваются два трансформатора СН, один из которых присоединяется к местной сети 6–35 кВ.

Для питания оперативных цепей подстанций может применяться переменный и постоянный ток.

На подстанциях с оперативным переменным током трансформаторы СН присоединяются отпайкой к вводу главных трансформаторов. Это необходимо для возможности управления выключателями 6–10 кВ при полной потере напряжения на шинах 6–10 кВ.

Шины 0,4 кВ секционируются. Питание оперативных цепей переменного тока осуществляются от шин СН через стабилизаторы с напряжением на выходе 220 кВ.

На подстанциях с оперативным постоянным током трансформаторы СН присоединяются к шинам 6–35 кВ. Если отсутствует РУ 6–35 кВ, то трансформаторы СН присоединяются к обмотке НН основных трансформаторов.

Вне зависимости от системы оперативного тока целесообразно присоединять ТСН к независимому источнику, например, к линии 6–35 кВ от соседней подстанции.

УДК 621.3

## ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЦП 9010

Киянко А.С., Григорчук А.А.

Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

Преобразователи измерительные цифровые многофункциональные ЦП 9010 предназначены для преобразования параметров однофазных и трехфазных трехпроводных и четырехпроводных электрических цепей переменного тока частотой 50 Гц в цифровой код и передачи его по двум портам RS-485. Модификация ЦП 9010У (рисунок 1) предназначена для преобразования параметров однофазных и трехфазных трехпроводных и четырехпроводных электрических цепей переменного тока частотой 50 Гц в цифровой код и передачи его по двум портам RS-485, для линейного преобразования параметров электрических цепей в унифицированные выходные сигналы постоянного тока, коммутации внешних электрических цепей, приема дискретной информации отображения любых измеренных параметров на трех встроенных отсчетных устройствах. Отображение осуществляется с учетом коэффициентов трансформации первичных цепей.



Рисунок 1

Приборы предназначены для включения непосредственно или через измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Приборы могут применяться для измерения параметров электрических трехфазных цепей переменного тока в электрических установках, для комплексной автоматизации объектов электроэнергетики.

Работа прибора основана на преобразовании мгновенных значений входных сигналов в цифровой код и дальнейшей его обработки. Преобразованные значения параметров можно получить через порты RS-485(1) и (или) RS-485(2) по протоколам, а для ЦП 9010У и по показаниям приборов на аналоговых выходах. Измеренные значения параметров отображаются на ОУ.

ЦП 9010, ЦП 9010М состоит из следующих основных узлов: основания, крышки корпуса, клеммной колодки с зажимами для подключения внешних цепей, печатных плат с расположенными на ней элементами электрической схемы, питающего трансформатора (для приборов с питанием от сети) и входных трансформаторов тока.

ЦП 9010У состоит из следующих основных блоков, выполненных на печатных платах: блока измерителя, блока питания, блока аналоговых выходов, блока реле, блока дискретных входов, блока индикации. Перечисленные выше блоки конструктивно размещены в пластмассовом корпусе с лицевой панелью. На лицевую панель выведены три светодиодных семисегментных четырехразрядных ОУ с высотой цифр 20 мм, матричные светодиоды, информирующие о типе отображаемых параметров и три кнопки управления. Цвет свечения ОУ указывается потребителем при заказе и может быть красным, зеленым или желтым.

Перечень отображаемых параметров потребитель может изменить самостоятельно.

По заказу потребителя ЦП 9010У содержит 3 или 6 аналоговых выходов.

Выходной сигнал на каждом из аналоговых выходов пропорционален измеренному значению одного из параметров. Верхнее значение выходного аналогового сигнала указывается потребителем при заказе. Соответствие аналоговых выходов измеряемым параметрам может изменяться потребителем самостоятельно.

По заказу потребителя ЦП 9010У содержит 3, 6 или 9 реле.

Дискретные входы имеют встроенный источник напряжения с одним общим выводом для каждой группы из трех дискретных входов.

Дискретные входы предназначены для определения состояния внешних коммутирующих устройств типа «замкнуто - разомкнуто».

Максимальное сопротивление внешней замкнутой цепи для каждого дискретного входа 50 Ом.

Работа прибора основана на преобразовании мгновенных значений входных сигналов в цифровой код и дальнейшей его обработки. Преобразованные значения параметров можно получить через порты RS-485(1) и (или) RS-485(2) по протоколам, а для ЦП 9010У и по показаниям приборов на аналоговых выходах. Измеренные значения параметров отображаются на ОУ.

Связь с ПЭВМ осуществляется в соответствии с протоколом MODBUS режим RTU и протоколом в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60870-5-101. Связь с пассивными внешними устройствами осуществляется в соответствии с протоколом передачи данных «Энерго-Союз».

УДК 621.3

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Москалёв Н.В.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Дерюгина Е.А.

Ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН) – электрические аппараты, предназначенные для защиты оборудования энергосистем от коммутационных и грозовых перенапряжений. Основным элементом ОПН является нелинейный резистор – варистор (varistor, от англ. Vari(able) (Resi)stor – переменное, изменяющееся сопротивление).

В настоящее время варисторы для ограничителей изготавливаются как цилиндрические диски диаметром 28–150 мм, высотой 5–60 мм. На торцевой части дисков методом металлизации наносятся алюминиевые электроды толщиной 0,05–0,30 мм. Боковые поверхности диска покрывают глифталевой эмалью, что повышает пропускную способность при импульсах тока с крутым фронтом.

Применяемые до настоящего время вентильные разрядники, имеющими недостаточную нелинейность, часто не позволяли обеспечить необходимое ограничение перенапряжений. Более глубокое снижение перенапряжений требует уменьшения нелинейного последовательного сопротивления, что приводит к существенному увеличению сопровождающих токов. Включение нелинейных сопротивлений на рабочее напряжение без искровых промежутков оказывается невозможным вследствие большого тока через нелинейное сопротивление при фазном напряжении.

Применение искровых промежутков вызывает дополнительные трудности, связанные с необходимостью уменьшения сопровождающего тока до величины, надежно отключаемой промежутками. Значительное улучшение защитных характеристик разрядников было достигнуто при отказе от использования искровых промежутков. Это оказывается возможным в ОПН при использовании резисторов с резко нелинейной вольтамперной характеристикой. Выполненные на основе окиси цинка варисторы отвечают этим требованиям и применяются в ограничителях перенапряжений. ОПН комплектуются из большого числа последовательно и параллельно соединенных оксидно-цинковых варисторов. Число последовательно соединенных в колонку варисторов и число параллельных колонок в ограничителе перенапряжений определяется номинальным напряжением сети и зависит от требований к защитному уровню напряжения и пропускной способности ограничителей по току. Пропускная способность ОПН и характер их повреждения зависят от амплитуды и длительности протекающего через них тока. При импульсах тока большой длительности, характерных для коммутационных перенапряжениях, наблюдается существенных нагрев ОПН, в результате так воздействий может происходить проплавление в варисторах сквозных отверстий и их разрушение при токах с амплитудой 80–120 А. При кратковременных импульсах тока, характерных для грозовых перенапряжений, варисторы не разрушаются даже при воздействии импульсов с амплитудой 1000–1500 А. Дальнейшее увеличение тока может приводить к их перекрытию по боковой поверхности, однако, ток перекрытия может быть значительно увеличен, если покрыть боковую поверхность варисторов специальным изоляционным лаком или залить колонку варисторов полимерным компаундом.

Большинство крупных фирм производителей электротехнической продукции при разработке и выпуске ОПН используют те же конструкторские решения, технологии и дизайн, что и для производства других электроустановочных изделий. Это касается габаритных размеров, материала корпуса, применяемых технических решений для установки изделия в электроустановку потребителя, внешнего вида и других параметров. Дополнительно к конструкции ограничителей перенапряжений могут быть предъявлены следующие требования:

– корпус устройства должен быть выполнен с соблюдением требований по защите от прямого прикосновения (класс защиты не ниже IP20);

- отсутствие риска возгорания устройства защиты или короткого замыкания в линии в случае его выхода из строя в результате перегрузки;
- наличие простой и надежной индикации выхода из строя, возможность подключения дистанционной сигнализации.

В настоящее время вентильные разрядники практически сняты с производства и в большинстве случаев отслужили свой нормативный срок службы. Построение схем защиты изоляции оборудования как новых, так и модернизируемых подстанций, от грозовых и коммутационных перенапряжений теперь выполняется только с использованием ОПН.

При выборе защитных устройств на оксидно-цинковых варисторах необходимо обращать внимание на следующие параметры:

- Номинальное напряжение ограничителя – номинальное напряжение сети, для работы в которой предназначен ОПН.

- Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение на ОПН – наибольшее действующее значение напряжения промышленной частоты, которое может быть длительно приложено к выводам ограничителя. Оно должно быть не ниже наибольшего рабочего фазного напряжения сети, для работы в которой предназначен ОПН.

- Классификационное напряжение ограничителя – действующее значение напряжения промышленной частоты, которое прикладывается к ограничителю для получения классификационного тока.

- Номинальный импульсный разрядный ток, который ОПН должен пропустить без существенного изменения параметров 20 раз.

- Максимальный импульсный ток – значение испытательного грозового импульса тока (обычно формы 8/20 мкс), который устройство может пропустить один раз и не выйти из строя.

- Остающееся напряжение – максимальное значение падения напряжения на ограничителе при протекании через него импульса тока.

- Уровень защиты – значение остающегося напряжения при протекании через варистор ограничителя номинального импульсного тока разряда.

- Время срабатывания оксидно-цинковых варисторов обычно не превышает 25 нс.

Помимо неверного выбора мест установки и характеристик ОПН еще одной причиной повреждений ОПН являются используемые при их сборке варисторы низкого качества.

Преимущества ОПН:

- простота конструкции и высокая надежность;
- по сравнению с разрядниками, более глубокое ограничение перенапряжения;
- стойкость к внешнему загрязнению изоляционного корпуса;
- способность ограничивать внутренние перенапряжения;
- большая взрывобезопасность у ограничителей перенапряжения с полимерным корпусом;
- меньшие габариты и масса, чем у разрядников;
- могут использоваться в сетях постоянного тока.

#### Литература

1. Дмитриев, М.В. Параметры ограничителей перенапряжения / М.В. Дмитриев. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 205 с.
2. Поляков, В.С. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений / В.С. Поляков. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 272 с.
3. Дмитриев, М.В. Применение ОПН в электрических сетях / М.В. Дмитриев. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 311 с.

УДК 621.3.022

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ НАГРУЗКИ 6–10 КВ

Самцова Н.Ю.

Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

Выключатель нагрузки – это простейший высоковольтный выключатель. Он используется для отключения и включения цепей, находящихся под нагрузкой. Дугогасительные устройства выключателей рассчитаны на гашение маломощной дуги, возникающей при отключении тока нагрузки. Их нельзя применять для отключения токов КЗ. Чтобы разорвать цепь в случае возникновения КЗ, последовательно с выключением нагрузки устанавливаются высоковольтные предохранители соответствующей способности.

Требования, предъявляемые к выключателям:

- надежность в работе и безопасность для окружающих;
- возможно малое время отключения, малые габариты и масса;
- простота монтажа и бесшумность работы;
- сравнительно невысокая стоимость.

Среди основных параметров выключателей высокого напряжения следует выделить группу номинальных параметров, присущих всем типам выключателей и определяющих условия их работы.

К основным номинальным параметрам выключателей в соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК) относятся: номинальное напряжение; наибольшее рабочее напряжение; номинальный уровень изоляции в киловольтах; номинальная частота; номинальный ток; номинальный ток отключения; номинальный ток включения; номинальное переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН) при КЗ на выводах выключателя; номинальные параметры при неудаленных КЗ; номинальная длительность КЗ; номинальная последовательность операций (номинальные циклы); нормированные показатели надежности и др.

Вакуумные выключатели являются одними из наиболее перспективных направлений развития коммутационных аппаратов. Полупроводниковые выключатели занимают область наименьших напряжений и отключаемых токов, и их использование оправдано только в случаях, когда требуется чрезвычайно частое оперирование. Из-за относительно низких параметров тиристоров приходится соединять их в последовательные и параллельные цепочки, что удорожает выключатель и усложняет схему управления им. К недостаткам полупроводниковых выключателей относят также значительные тепловые потери в тиристорах.

В сетях средних классов напряжений (до 35 кВ) основным типом коммутационных аппаратов скоро станут вакуумные выключатели, хотя на сегодня серьезную конкуренцию здесь создают элегазовые выключатели. По техническим параметрам эти выключатели в основном равноценны, но вакуумные выключатели имеют большие преимущества в установках с частыми коммутациями.

Основные трудности, сдерживающие развитие вакуумных коммутационных аппаратов связаны с теплоотводом от контактов как при длительной нагрузке номинальным током, так и в процессе отключения. Это обусловлено тем, что теплопередача от контактов через объём камеры к её стенкам чрезвычайно низка, передача тепла конвекцией отсутствует. В связи с этим, вся выделяемая в контактах и токоведущих стержнях теплота должна быть отведена практически лишь посредством теплопроводности в аксиальном направлении к выводам камеры, присоединяемым, как правило, к охлаждающим радиаторам.

УДК 620.9

## ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Шакаров А.В.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Пономаренко Е.Г.

Энергетика делится на традиционную и нетрадиционную. Традиционная энергетика базируется на использовании ископаемого горючего или ядерного топлива и энергии воды крупных рек. Она подразделяется на теплоэнергетику, электроэнергетику, ядерную энергетику и гидроэнергетику.

Гидроэнергия, равно как и мускульная энергия людей и животных, а также солнечная энергия, используется очень давно. Упоминание об использовании энергии воды на водяных мельницах для помола зерна и дутья воздуха при выплавке металла относится к концу II в. до н. э. С течением столетий размеры и эффективность водяных колёс увеличились. В XI в. в Англии и Франции одна мельница приходилась на 250 человек. В это время сфера применения мельниц расширилась. Они стали использоваться в сукновальном производстве, при варке пива, распилке леса, для работы откачивающих насосов, на маслобойнях. Можно считать, что современная гидроэнергетика родилась в 1891 году. В этом году русский инженер Михаил Осипович Доливо-Добровольский, эмигрировавший в Германию по причине «политической неблагонадёжности», должен был продемонстрировать на электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне изобретённый им двигатель переменного тока. Этот двигатель мощностью около 100 киловатт в эпоху господства постоянного электрического тока сам по себе должен был стать гвоздём выставки, но изобретатель решил для его питания построить ещё и совершенно неожиданное по тем временам сооружение – гидроэлектростанцию. В небольшом городке Лауффен Доливо-Добровольский установил генератор трёхфазного тока, который вращала небольшая водяная турбина. Электрическая энергия передавалась на территорию выставки по невероятно протяжённой для тех лет линии передачи длиной 175 километров (это сейчас линии передач длиной в тысячи километров никого не удивляют, тогда же подобное строительство было единодушно признано невозможным). Всего за несколько лет до этого события виднейший английский инженер и физик Осборн Рейнольдс в своих Канторовских лекциях неопровержимо, казалось бы доказал, что при передаче энергии по средствам трансмиссии потери энергии составляют всего лишь 1,4 % на милю, в то время как при передаче электрической энергии по проводам на такое же расстояние потери составят 6 %. Опираясь на данные опытов, он сделал вывод о том, что при использовании электрического тока на другом конце линии передачи вряд ли удастся иметь более 15–20 % начальной мощности. В то же время, считал он, можно быть уверенным в том, что при передаче энергии приводным тросом сохранится 90 % мощности. Этот «неоспоримый» вывод был успешно опровергнут практикой работы первенца гидроэнергетики в Лауффене.

Гидроэнергетика – область наиболее развитой на сегодня энергетики на возобновляемых ресурсах, использующая энергию падающей воды, волн и приливов. Республика Беларусь – преимущественно равнинная страна, тем не менее, её гидроэнергетические ресурсы оцениваются в 850–1000 МВт. Однако практически реализуемый потенциал малых рек и водотоков составляет едва ли 10 % этой величины, что эквивалентно экономии 0,1 млн. т у.т./год. К концу 60-х гг. в Беларуси эксплуатировалось около 180 малых гидроэлектростанций (МГЭС) общей площадью 21 МВт. Основные направления развития гидроэнергетики республики: восстановление старых МГЭС путем капитального ремонта и частичной замены оборудования; сооружение новых МГЭС на водохранилищах неэнергетического (комплексного) назначения, на промышленных водосбросах; строительство бесплотинных ГЭС, в которых используется кинетическая энергия движущейся массы воды (течение). Такие станции, мощностью до 10–25 кВт, не

требуют больших капитальных затрат на строительство, экологичны и удобны в использовании при энергоснабжении потребителей небольшой мощности, расположенных на берегах рек, при наличии перепадов высот на небольших ручьях (рукавные ГЭС) и др. При наличии водных потоков перспективно также применение водных таранов для целей водоснабжения, а также использование водяных колес и турбин небольшой мощности для привода компрессоров тепловых насосов. Работы по восстановлению МГЭС уже начаты. В 1990–2010 годах в республике восстановлены следующие ГЭС:

- Добромыслянская (Витебская область) – 200 кВт;
- Гонолес (Минская область) – 250 кВт;
- Войтошицненская (Гродненская область) – 150 кВт;
- Жемыславльская (Гродненская область) – 160 кВт;
- 1-я очередь Вилейской ГЭС (Минская область) – 900 кВт;
- Богинская (Витебская область) – 300 кВт;
- Ольховка (Гродненская область) – 100 кВт;
- Тетеринская (Могилёвская область) – 600 кВт.

Источником гидроэнергии является преобразованная энергия Солнца в виде запасенной потенциальной энергии воды, которая затем преобразуется в механическую работу и электроэнергию. Действительно под воздействием солнечного излучения вода испаряется с поверхности озер, рек, морей и океанов. Пар поднимается в верхние слои атмосферы, образуя облака; затем он, конденсируясь, выпадает в виде дождя, пополняя запасы воды в водоемах. Преобразование потенциальной энергии воды в электрическую происходит на гидроэлектростанции. Поддержание постоянного напора осуществляется с помощью плотины, которая образует водохранилище, служащее аккумулятором гидроэнергии. В связи с этим при строительстве ГЭС предъявляются определенные требования к рельефу местности, который должен позволить организовать водохранилище и создать требуемый напор за счет плотины. Все это связано со значительными затратами, и стоимость строительных работ может превышать стоимость оборудования ГЭС. Вместе с тем удельная стоимость электроэнергии, генерируемой ГЭС, является самой низкой по сравнению с себестоимостью энергии, производимой другими источниками. Как правило, срок окупаемости малых ГЭС не превышает 10 лет. Для преобразования энергии воды в механическую работу используются гидротурбины. Различают активные и реактивные турбины. В активной турбине кинетическая энергия потока преобразуется в механическую. Дополнительные устройства, обеспечивающие работу турбины, – водовод и сопло. Из сопла выходит струя, обладающая кинетической энергией, которая направляется на лопасти турбины, находящейся в воздухе. Сила, действующая со стороны струи на лопасти, приводит во вращение колесо турбины, с валом которого непосредственно или через привод сопряжен электрогенератор. КПД реальных турбин колеблется от 50 до 90 %. В гидротурбинах малой мощности КПД ниже.

По сравнению с тепловыми электростанциями у ГЭС есть целый ряд преимуществ:

- отсутствие выбросов вредных веществ в атмосферу;
- относительно низкая себестоимость вырабатываемой электроэнергии (примерно в десять раз ниже, чем у вырабатываемой на тепловых электростанциях);
- высокая маневренность в процессе обеспечения потребителей электроэнергией, что позволяет вырабатывать более дорогую пиковую электроэнергию, тарифы на которую в несколько раз превышают тарифы на базовую электроэнергию;
- возобновляемость (неистощимость) энергоресурсов рек;
- возможность улучшения многоцелевого (комплексного) водопользования вследствие создания водохранилищ ГЭС.

Количество малых ГЭС в Беларуси уже составляет более двух десятков, а их суммарная мощность превышает 20 МВт. К 2020 году суммарную мощность белорусских ГЭС предусматривается довести до 210 МВт. Это позволит получать около 4 % электроэнергии, потребляемой республикой в настоящее время. При этом следует учесть, что с ростом цены

на топливо будет расти, и экономическая эффективность отечественных ГЭС, а их строительство и эксплуатация станут еще более выгодными по сравнению с ТЭЦ. Ожидается, что общий объем капиталовложений в гидроэнергетику составит около 300 миллионов долларов.

РУП «ЦНИИКИВР» разработал также рекомендации по обоснованию экологической безопасности создания гидроэлектростанций с учетом природных условий Беларуси. Они предусматривают уменьшение площадей затопления и подтопления путем соответствующего выбора створов и водоподпорных отметок гидроузлов, а также ограничение площади образующихся мелководий и степени регулирования речного стока, благодаря чему достигается уменьшение периода водообмена и улучшение качества воды в водохранилище.

В масштабе республики реализуется Программа восстановления, реконструкции и нового строительства гидроэлектростанций, разработанная во исполнение целевой программы обеспечения. Согласно ей планируется обеспечить не менее 25 процентов объема производства электрической и тепловой энергии за счет местных видов топлива и альтернативных источников энергии. Постановлением Совета Министров суммарную мощность ГЭС в стране предусмотрено довести до 200 МВт. Выделяются и соответствующие инвестиции. Программа состоит из двух частей. На первом этапе осуществляется план развития гидроэнергетики через строительство и восстановление малых ГЭС. После получения опыта их работы дойдет очередь до второй части программы, включающей перечень более крупных гидроэнергетических объектов на таких реках Беларуси, как Западная Двина, Неман, Днепр. В реализации проектов участвует и ГУ «Объединение "Минсмелиоводхоз"». В 2006 году им построена Солигорская мини-ГЭС, которая выработала за прошлый год 550 тысяч кВт·час электроэнергии. В более отдаленной перспективе возможно строительство еще более десятка мини-ГЭС на Морочи, Случи, Птичи, Сервечи, Исlochи и других малых реках. Мероприятия по строительству таких станций должны окупиться по чистой прибыли в среднем за 9–11 лет. Специалисты считают эти сроки вполне приемлемыми, поскольку энергетические агрегаты в состоянии работать более длительный период. Теоретическая мощность рек Минской области, подсчитанная по данным гидравлического уклона и среднесуточной водности, составляет 60,5 МВт, что соответствует величине теоретического гидроэнергетического потенциала 0,53 млрд. кВт/час в год. Полное его освоение позволило бы обеспечить около 3 процентов общей потребности области в электроэнергии и сэкономить порядка 33–35 тысяч тонн условного топлива в год.

#### Литература

1. Основы энергосбережения : Учебная программа для вузов / Сост. : А.А. Михалевич, А.А. Андрижиевский, В.Г. Баштовой и др. – Минск : РИВШ БГУ, 2000.
2. Тельдеши, Ю. Мир ищет энергию / Ю. Тельдеши, Ю. Лесны. – М. : Мир, 1981.
3. Усковский, В.М. Возобновляющиеся источники энергии / В.М. Усковский. – М. : Россельхозиздат, 1986.
4. Чирков, Ю.Г. Занимательно об энергетике / Ю.Г. Чирков. – М. : Молодая гвардия, 1981.
5. Черноусов, С.В. Энергетика Беларуси смотрит в будущее / С.В. Черноусов. – Минск : Энергоэффективность, 2006. – № 1. – С. 5–8.

УДК 621.3

## ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ТЕРМИНАЛОВ MiCOM

Ермоленко А.Г.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Булойчик Е.В.

MiCOM – это комплексная система, отвечающая всем требованиям, предъявляемым к системе электроснабжения. Она включает обширный набор компонентов, систем и служб компании. Главный принцип системы MiCOM заключается в обеспечении универсальности ее применения. Система MiCOM предоставляет возможность определять конфигурацию, необходимую для того или иного варианта применения, и благодаря широким возможностям средств обмена данными, интегрировать ее в систему управления передачей и распределением электроэнергии.

Устройство управления присоединением MiCOM было разработано для реализации защиты воздушных и кабельных линий электропередачи различного уровня напряжения. Устройство обладает рядом дополнительных функций, предназначенных для обеспечения средств диагностики энергосистемы и анализа повреждений. Устройство реализует функции токовой защиты от междуфазных КЗ, токовой защиты нулевой последовательности и применимо в сетях с различным режимом нейтрали (глухозаземленная, резистивно-заземленная, заземленная через дугогасящий реактор, изолированная). Устройство защиты применимо в тех случаях, когда требуется реализация полноценного решения по защите и управлению присоединением. Устройство оснащено 10 функциональными клавишами, что позволяет осуществлять местное управление (управление силовым выключателем, управление АПВ, управление процессом обмена данными).

Продукты MiCOM включают в себя мощные средства для сбора информации о состоянии и поведении энергосистемы, используя запись осциллограмм и регистрацию аварийных процессов. Кроме того, устройства обеспечивают измерение величин в системе через заданные промежутки времени, предоставляя тем самым возможность центру управления удаленно контролировать и управлять процессом.

Реле напряжения и частоты MiCOM обеспечивает комплексный подход к обеспечению надежной и эффективной работы энергосистемы. Многостороннее применение терминалов и объединение в них функций защиты с функциями автоматики, управления и измерениями, обеспечивают оптимальные передовые решения по обеспечению устойчивости и надежности системы. Улучшенные принципы, применяющиеся для работы при нелинейных отклонениях и колебаниях, исключают возможность ложной работы.

Многочисленные встроенные протоколы связи упрощают стыковку с большинством систем управления подстанцией или систем SCADA. Большинство реле серий MiCOM могут поставляться с «Ethernet», что позволяет реализовать полное решение для подстанций.

### Литература

1. Устройство дистанционной защиты [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=User+guide&p\\_File\\_Name=MicomI\\_P433-435\\_part\\_1.pdf&p\\_Doc\\_Ref=MicomI\\_P433-435\\_part\\_1](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=MicomI_P433-435_part_1.pdf&p_Doc_Ref=MicomI_P433-435_part_1). – Дата доступа : 28.04.2018.
2. Реле защиты [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=User+guide&p\\_File\\_Name=Micom\\_P116.pdf&p\\_Doc\\_Ref=P116\\_RU\\_IT\\_A11](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=Micom_P116.pdf&p_Doc_Ref=P116_RU_IT_A11). – Дата доступа : 28.04.2018.
3. Быстродействующая многофункциональная дистанционная защита [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://download.schneiderelectric.com/files?p\\_enDocType=User+guide&p\\_File\\_Name=micom\\_P445.pdf&p\\_Doc\\_Ref=micom\\_P445](https://download.schneiderelectric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=micom_P445.pdf&p_Doc_Ref=micom_P445). – Дата доступа : 29.04.2018.

УДК 621.316

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ КИХ-ФИЛЬТРОВ

Камбалов Е.Ю.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Румянцев В.Ю.

КИХ-фильтр (фильтр с конечной импульсной характеристикой), называемый также нерекурсивным, - это фильтр, импульсный отклик которого содержит лишь конечное число ненулевых отсчетов. Такой импульсный отклик всегда абсолютно суммируем, и, следовательно, КИХ-фильтры всегда устойчивы. КИХ-фильтры имеют также то преимущество, что их работу легче понять, как в одномерном, так и в многомерном случае.

БИХ-фильтр (фильтр с бесконечной импульсной характеристикой), или рекурсивный, – это фильтр, входной и выходной сигналы которого удовлетворяют многомерному разностному уравнению конечного порядка. Такие фильтры могут быть как устойчивыми, так и неустойчивыми, однако во многих случаях они оказываются проще в реализации, чем эквивалентные КИХ-фильтры. Синтез двумерного рекурсивного фильтра радикально отличается от синтеза одномерного фильтра. Отчасти это связано с возрастанием сложности обеспечения устойчивости.

Фильтры с нулевой фазой важны для многих приложений цифровой обработки многомерных сигналов. Например, при обработке изображений фильтры с ненулевой фазой могут привести к разрушению линий и границ. Чтобы понять, почему это так, вспомним из нашего обсуждения преобразований Фурье, что любой сигнал можно представить в виде суперпозиции комплексных синусоид. Линейный инвариантный к сдвигу фильтр с нетривиальным частотным откликом будет избирательно усиливать или ослаблять некоторые из этих синусоидальных компонент, а также задерживать некоторые компоненты по отношению к другим. На любой частоте величина задержки зависит от значения фазового отклика. Нелинейный (разовый отклик приводит, таким образом, к рассеянию строго согласованных синусоидальных компонент сигнала, составляющих контрастные точки, линии и границы.

Фильтр с нулевой фазой имеет и другие преимущества. В силу вещественности его частотного отклика упрощается синтез фильтра. К тому же симметрию импульсного отклика фильтра можно использовать при его реализации для уменьшения, требуемого числа умножений.

КИХ-фильтр обладает рядом полезных свойств, из-за которых он иногда более предпочтителен в использовании, чем БИХ-фильтр. Вот некоторые из них:

- КИХ-фильтры устойчивы;
- КИХ-фильтры при реализации не требуют наличия обратной связи;
- фаза КИХ-фильтров может быть сделана линейной.

Реализация любого КИХ-фильтра возможна также с помощью дискретного преобразования Фурье. Этот подход особенно заманчив при реализации фильтров высокого порядка, поскольку имеется ряд алгоритмов быстрого преобразования Фурье, позволяющих эффективно вычислять ДПФ.

Вопросы синтеза и реализации многомерных фильтров тесно связаны между собой. В то время как любой КИХ-фильтр, если только известен его импульсный отклик, можно реализовать с помощью, либо прямой свертки, либо ДПФ, другие (часто весьма эффективные) способы реализации обычно ограничивают класс реализуемых фильтров и требуют специальных алгоритмов синтеза. В этой части мы рассмотрим некоторые из этих специальных алгоритмов синтеза и реализации.

Простейшим из методов реализации является каскадное соединение фильтров. Для тех, кто имеет опыт работы с одномерными фильтрами, отнесение каскадной структуры к специальным способам реализации может показаться странным, однако следует напомнить, что многомерные полиномы обычно не разлагаются на множители. Так что каскадирование многомерных фильтров – это, действительно, весьма специальный способ реализации!

Любой фильтр с импульсным откликом  $h(n_1, n_2)$  можно представить в виде параллельного соединения фильтров с импульсными откликами  $h_1$  и  $h_2$ . В общем случае естественно ожидать, что опорная область для  $h$  будет объединением опорных областей для  $h_1$  и  $h_2$ , однако она может быть и меньше, если два фильтра  $h_1$  и  $h_2$  гасят друг друга. К сожалению, такое разложение редко приводит к сокращению объема вычислений; фактически объем вычислений может увеличиться.

Однако сокращения объема вычислений можно добиться, если наложить на  $h_1$  и  $h_2$  некоторые ограничения, например, если потребовать, чтобы  $h_1$  и  $h_2$  были разделимыми фильтрами. Разделимые фильтры отличаются высокой эффективностью реализации, но с их помощью можно точно аппроксимировать только разделимые импульсные отклики. Однако при параллельном соединении двух разделимых фильтров образуется неразделимый фильтр. Это дает возможность аппроксимации неразделимых переходных характеристик с помощью легко реализуемых фильтров. Эта идея была первоначально предложена Трейтелем и Шэнксом, которые назвали такие фильтры многоступенчатыми разделимыми фильтрами.

При проектировании собственных блок-схем цифровых фильтров необходимо следовать определенным условиям: если в данный момент на входе последовательной цепочки блоков регистр Задержки ( $1/Z$ ) Вы имеет значение координаты  $x[k]$ , то на последующих выходах присутствуют предыдущее ее значения  $x[k-1]$ ,  $x[k-2]$ , ...,  $x[k-m]$ . Обе нижние блок-схемы реализуют на регистрах задержки  $1/Z$  одну  $z$ -ПФ.

#### Литература

1. Антонью, А. Цифровые фильтры: анализ и проектирование / А. Антонью / Под ред. С.А. Поньрко. – М. : Радио и связь, 1983. – 320 с.
2. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю.В. Румянцев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. Заведений и энерг. объединений СНГ. – 2016. – Т. 59. – № 5. – С. 397–417.
3. Оппенгейм, Э. Цифровая обработка сигналов / Э. Оппенгейм, Р. Шафер / Под ред. С.Я. Шаца. – М. : Связь, 1979. – 416 с.

УДК 620.3

## НАНОРОБОТЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Лафюк А.В.

Научный руководитель – Климкович П.И.

Нанотехнологии – это технологии работы с веществом на уровне отдельных атомов. Традиционные методы производства работают с порциями вещества, состоящими из миллиардов и более атомов. Нанороботы – роботы, созданные из наноматериалов и размером сопоставимые с молекулой. Они должны обладать функциями движения, обработки и передачи информации, исполнения программ.

Для обеспечения функциональности и надежной работы наноробот должен обладать различными подсистемами. Должен иметь мощную навигационную систему. Необходимо иметь несколько типов различных сенсоров для мониторинга окружающей среды, навигации, коммуникации и работы с отдельными молекулами. Необходима мощная транспортная система, доставляющая отдельные атомы и молекулы от хранилищ к наноманипуляторам, и обратно. Набором телескопических наноманипуляторов разного применения. Наличие приемопередаточных устройств, позволяющих нанороботам связываться друг с другом. И наконец, для удержания крупных объектов необходимы телескопические захваты. На рисунке 1 представлен медицинский наноробот с указанными выше подсистемами [1].

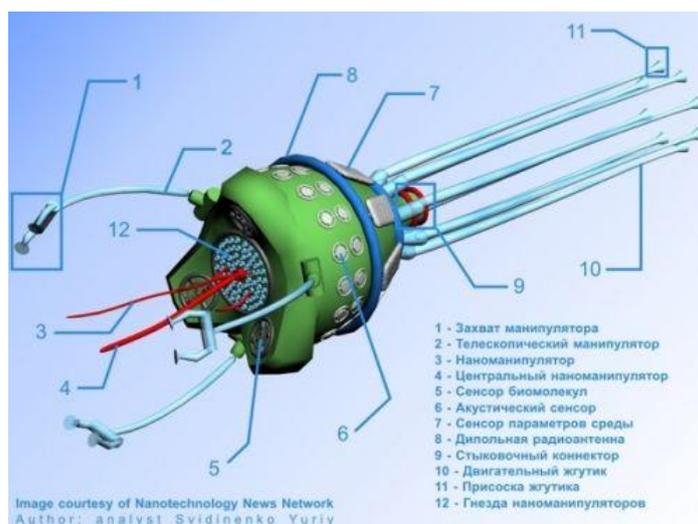


Рисунок 1. Медицинский наноробот

Для возможности передвижения нанороботов, поворота, захвата атомов, различных манипуляций ученые разработали подшипники, дифференциальные передачи, а так же различные типы редукторов на атомном и молекулярном уровне. На рисунках 2–6 представлены дифференциальные передачи и редукторы различного вида передачи движения, подшипники, собранные из различных атомов, наноредуктор, собранный из атомов и молекул, а так же наглядная схема планетарного редуктора.

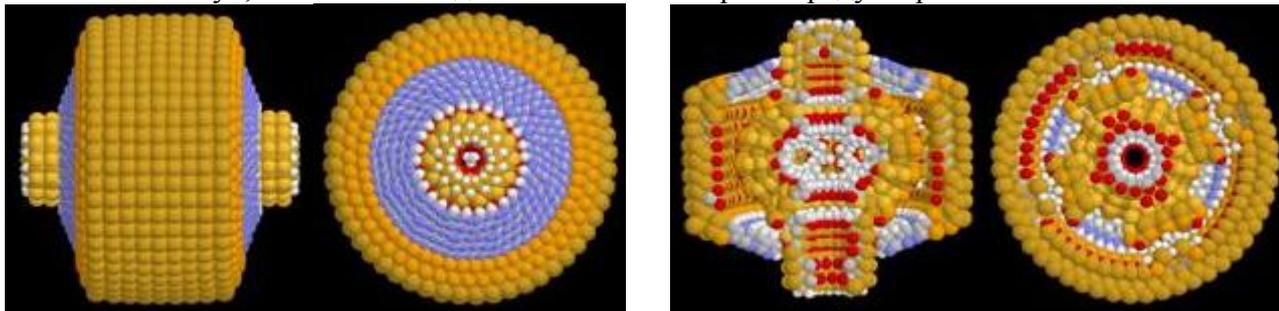


Рисунок 2. Дифференциальные передачи и наноредукторы

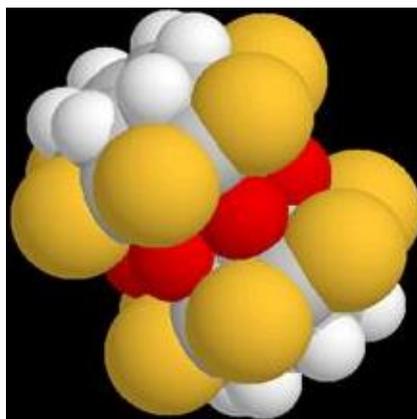


Рисунок 3. Подшипник из атомов водорода, кислорода и кремния

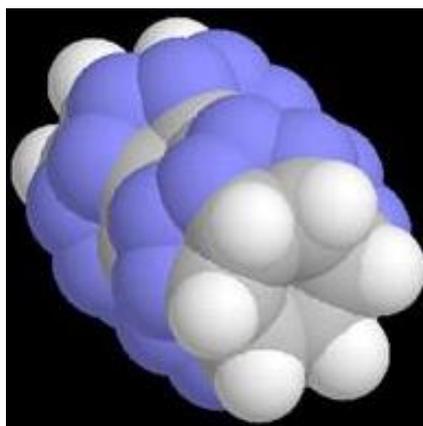


Рисунок 4. Подшипник из атомов водорода, азота и углерода

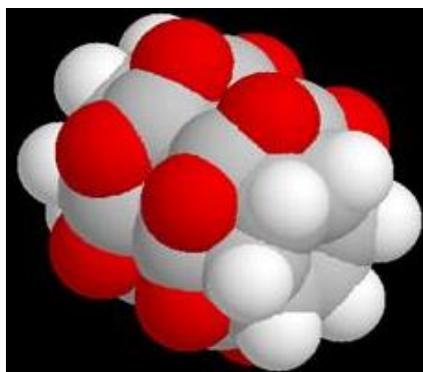


Рисунок 5. Подшипник из атомов водорода, кислорода и углерода

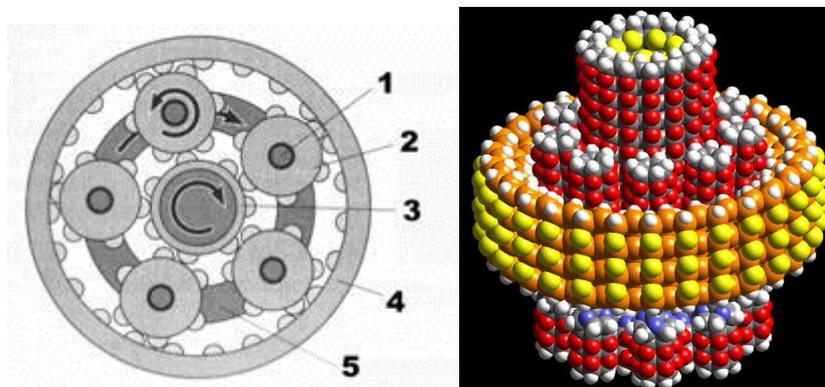


Рисунок 6. Редуктор и схема планетарного редуктора:  
 1 – подшипник планетарной передачи; 2 – планетарная передача;  
 3 – солнечная передача; 4 – кольцевая наружная передача;  
 5 – несущее кольцо планетарных передач

На рисунке 7 представлен разрез конической передачи. Здесь виден нижний вал (верхний удален для наглядности действия передачи) и конические передачи (как на валах, так и на корпусе). Причем на корпусе – 4 конических шестерни. При разработке были использованы, в основном, атомы углерода, водорода, серы, кислорода, кремния, азота и фосфора. Большой размер атомов второго ряда корпуса позволяет создать жесткий внешний цилиндр. Такие структуры пока не реализуются методами синтеза в растворах, но, естественно, что при развитой молекулярной нанотехнологии создание таких структур станет возможным [2].

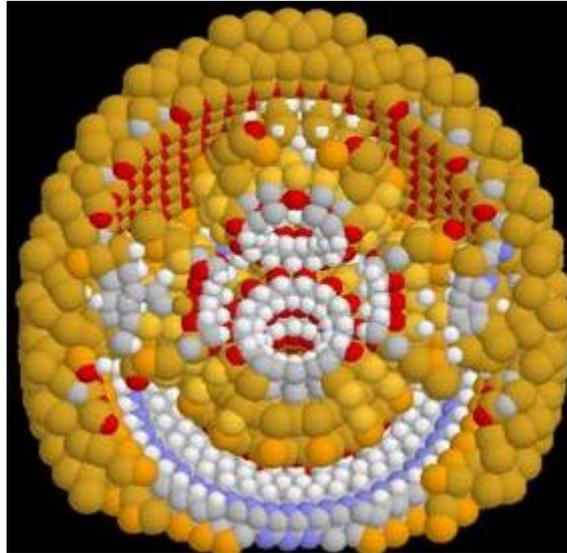


Рисунок 7. Разрез конической передачи

Исследователи из Гарвардской медицинской с помощью открытого программного обеспечения «Cadnano» смогли создать ДНК-нанодроидов. Каждый из них представляет собой цилиндр диаметром, примерно, в 35 нанометров. На его внутренней поверхности имеется 12 слотов, куда может быть прикреплена молекула необходимого вещества (например, терапевтические антитела). Внешняя поверхность наноробота содержит два, так называемых разъёма, предназначенных для аптамеров. Последние представляют собой короткие цепочки нуклеотидов. Их последовательность отвечает за процесс распознавания молекул на поверхности клеток-мишеней. На рисунке 8 изображены ДНК-роботы, уничтожающие раковые клетки.

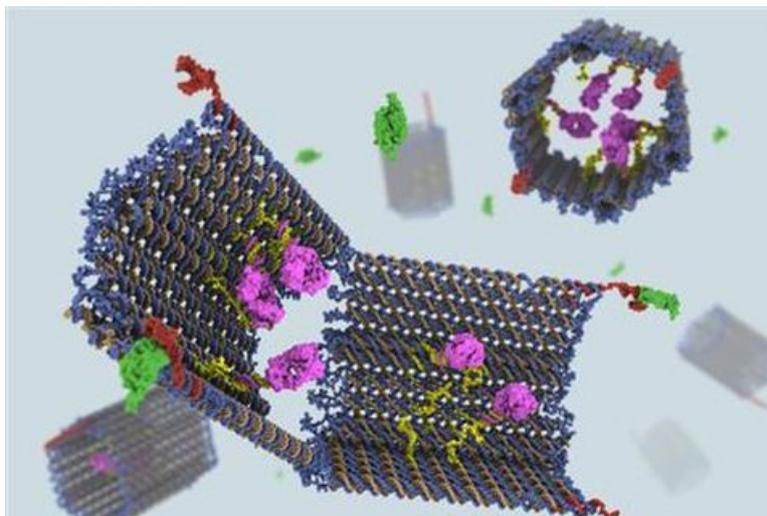


Рисунок 8. ДНК-роботы уничтожают раковые клетки

Ученые университетов Ханьян и Чоннам, что расположены в Сеуле и Кванджу соответственно, научились управлять роботами в кровеносной системе, что в будущем

поможет врачам проводить операции с использованием микромашин, способных через кровотоки добраться к очагу болезни.

Недавно был создан первый наноробот, умеющий играть в шахматы. Робот различает белые «фигуры» от черных за счет их магнитных свойств. При приложении внешнего поля робот случайно «выбирает» одну из фигур своего цвета (белого) и передвигает ее на несколько клеток. Пока робот не умеет различать разные виды фигур и выбирать траекторию движения в зависимости от этого, однако это сейчас уже является предметом исследования ученых. За черные пока приходится играть человеку. На рисунке 9 представлен наноробот, играющий в шахматы [3].

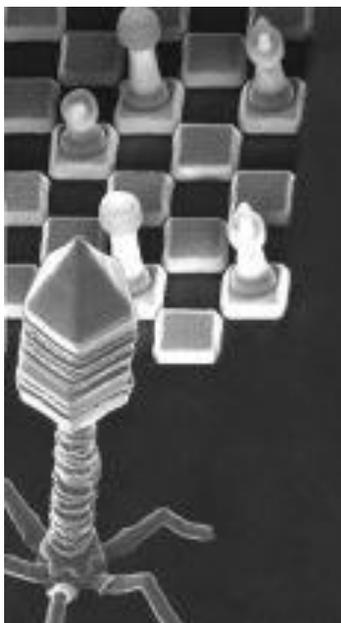


Рисунок 9. Наноробот играет в шахматы

По мнению разработчиков, в определенные конструкции сконструированный робот способен собирать молекулы вещества, являясь конструкцией  $150 \times 150 \times 8$  нанометров. Робот оснащен встроенным механизмом корректировки ошибок, благодаря механизму робот работает со 100 % с точностью, ранее это было в пределах 60–80 %. По словам исследователей, с помощью данных манипуляций, робот сможет собирать органические соединения. В медицине можно будет применять робота с целью устранения опухолей.

#### Литература

1. Смирнов, А.Н. Физические основы нанотехнологий / А.Н. Смирнов, Н.В. Абабков. – М. : Бином, 2010. – 324 с.
2. Маликов, Л.В. Наноматериалы, нанопокртия, нанотехнологии / Л.В. Маликов, П.В. Турбин. – М. : Бином, 2009. – 456 с.
3. Головин, Ю.И. Наномир без формул / Ю.И. Головин. – М. : Бином, 2012. – 543 с.

УДК 621.3

## ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ГЕНЕРАТОРНЫХ ТОКОПРОВОДОВ

Томашевский Р.В.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Булат В.А.

Генераторный токопровод – электротехническое устройство для передачи электроэнергии от генератора к повышающему трансформатору. Отличительными особенностями таких токопроводов является то, что они цельносварные по всей трассе, электродинамически устойчивы, исполняются закрытыми в пофазном исполнении, они имеют систему надува, повышающую надёжность и уменьшающую число аварийных ситуаций, имеется система индивидуального контроля сопротивления опорных изоляторов в режиме онлайн.

Поддерживающие конструкции нужны для фиксации генераторных токопроводов. Для токопроводов. Для токопроводов с несимметричным расположением фаз наибольшее распространение находит вертикальная конструкция с тремя поддерживающими полками. Основными материалами таких конструкций с тремя поддерживающими полками. Основными материалами таких конструкций являлась сталь, которая затем постепенно вытеснялась более экономичным немагнитными сплавами на основе алюминия. Соединение частей при изготовлении таких конструкций выполняют сваркой или заклепками.

Сложность электромагнитных процессов намагничивания стали, громоздкость и протяженность конструкции, большие токи и высокие напряжения обуславливают значительные трудности опытного определения потерь энергии в токопроводах.

Наиболее просто измерение мощности потерь можно выполнить на токопроводе отделенном от генератора, отпаечного и блочного трансформаторов при его питании от создания токов равных нагрузочным токам генератора.

Измерение потерь энергии в поддерживающих и окружающих токопровод металлоконструкциях можно произвести так же и с помощью косвенных методов. К таким методам относятся: измерение потерь по температуре поддерживающих конструкций, измерение потерь по величине циркулирующих токов и измерение потерь по величине напряженности магнитного поля на поверхностях элементов поддерживающих и опорных конструкций.

В случае, если известно распределение температуры вдоль элементов поддерживающих и опорных металлоконструкций токопровода, то имеется возможность приближенно рассчитать распределение потерь мощности вдоль этих элементов, а по ним и суммарные потери мощности в конструкциях токопровода.

Потери мощности в элементах поддерживающих конструкциях можно рассчитать по известной величине напряжения магнитного поля на их поверхностях.

Измерение потерь энергии в поддерживающих конструкциях токопроводов можно выполнить во время проведения опыта КЗ блочного трансформатора, выполняемого после капитального ремонта турбогенератора. Если напряжение на зажимах генератора не превышает 2500 В. При токе КЗ 11500 А, то можно применить для измерения падения напряжения на токопроводе трансформатор напряжения типа НТМИ с номинальным напряжением 3000–6000 В.

Таким образом, в предполагаемой схеме измерений условия обеспечения точности по цепям напряжения будут соблюдены. Погрешность измерений по схеме в основном будет определяться угловой погрешностью трансформаторов тока.

### Литература

1. Васильев, А.А. Электрическая часть станций и подстанций: учеб. пособие для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
2. Бойченко, В.И. Монтаж токопроводов 6–10 кВ / В.И. Бойченко. – М. : Энергия, 1968. – 80 с.

УДК 621.3

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПО ЧАСТИЧНЫМ РАЗРЯДАМ

Кирилюк Н.И., Волон Р.А.

Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

Частичные разряды (ЧР) – электрические разряды, которые происходят в изоляции электрооборудования, обычно возникающие в электрических системах, работающих при напряжении от 3000 В и выше (хотя ЧР могут происходить при более низких напряжениях). Согласно международному стандарту IEC 60270 и ГОСТ 55191-2012 частичным разрядом называется локальный электрический разряд, который шунтирует только часть изоляции в электроизоляционной системе.

Частичные разряды опасны тем, что приводят к постепенному разрушению изоляции и возникновению электрического пробоя. С другой стороны, измерение частичных разрядов позволяет сегодня энергетическим компаниям заблаговременно определять места будущих повреждений в энергооборудовании, своевременно проводить ремонт и избегать серьезных аварий в работе станционного и сетевого оборудования.

Электрический метод требует контакта измерительных приборов с объектом измерения, что делает его не самым простым и удобным. Но именно при таком методе снимается наибольшее количество характеристик ЧР, позволяющих всесторонне изучить ЧР, в связи с чем данный метод весьма распространен. Так же ввиду чувствительности метода необходимо применение комплекса мер и специального оборудования для отстройки от наводимых помех. Большинство электрических методов не требуют подачи на объект измерения напряжений, сильно превосходящих номинальные рабочие значения, поэтому они являются щадящими для изоляции электрооборудования. В настоящее время существует множество производителей оборудования, в котором применяется данный метод, основными являются HVPD, OMICRON, SebaKMT (подразделение Megger Group), Qualitrol и Techimp.

Общепризнанно, что ЧР в изоляции образуются в результате внесения воздушных (газовых) включений или проводящих частиц при нарушении технологического процесса изготовления оборудования или при его эксплуатации. Наиболее восприимчиво к образованию ЧР оборудование с бумажно-масляной изоляцией:

- появление ЧР сопровождается следующими физическими явлениями:
- протекание импульсного тока в искусственно создаваемых цепях, где имеются объекты с ЧР;
- электромагнитное излучение в окружающее пространство;
- ударные волны;
- разложение диэлектрика на молекулярные группы в зоне действия ЧР;
- световое излучение в окружающее пространство;
- нагрев локальных объемов изоляции с ЧР.

### Литература

1. Андреев, А.М. Методы испытаний диэлектриков. Измерение характеристик частичных разрядов в электрической изоляции : учеб. пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров «Техническая физика» / А.М. Андреев. – М. : Изд-во Политехнического ун-та 2013.
2. Вдовико, В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В.П. Вдовико. – М. : Наука, 2007. – С. 156.
3. Русов, В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования / В.А. Русов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2011. – С. 368.
4. Сви, П.М. Измерение частичных разрядов в изоляции оборудования высокого напряжения энергосистем / П.М. Сви. – М. : Энергия, 1977. – С. 200.
5. Кучинский, Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях / Г.С. Кучинский. – Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 224 с.

УДК 621.3

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ГИБКИХ ШИН РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Плешко Д.Ю.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.

Гибкая ошиновка вместе с порталами образует анкерованные пролеты, расположенные рядами (пролеты ячеек). Ниже перпендикулярно к ним находятся пролеты сборных шин (шинные пролеты). Электрическая связь между анкерованными пролетами выполняется в виде свободно висящих петель (шлейфов). К гибким шинам ОРУ посредством ответвительных зажимов присоединяются спуски к электрическим аппаратам. Они монтируются практически без натяжения и имеют, как правило, значительную разность высот подвеса. В ряде случаев они представляют собой вертикально расположенные отпайки.

Под гибкой ошиновкой ОРУ понимается система подвешенных гибких проводов, которые крепятся к несущим конструкциям порталного типа с помощью натяжных гирлянд изоляторов. Гирлянды собирают из стеклянных изоляторов типа ПС или фарфоровых типа ПФ. В качестве основных принимаются более прочные и удобные в эксплуатации стеклянные изоляторы. Длина гирлянд изоляторов в зависимости от напряжения составляет от 0,9 м на 35 кВ до 9,5 м на 750 кВ, и их вес соизмерим с весом проводов в пролете. Все соединения в гирлянде, а также ее крепление к порталам выполняются шарнирно, поэтому гирлянда изоляторов представляет собой гибкую цепь элементов.

Обычно в пролете гибких шин ОРУ имеется не более трех спусков к электрическим аппаратам. Для подвески гибкой ошиновки ОРУ применяются сборные железобетонные или стальные порталы. В отдельных случаях стойки порталов выполняются железобетонными, а траверсы – металлическими. Высота порталов для ячейковых пролетов составляет от 7,86 м на 35 кВ до 26 м на 750 кВ, соответственно для шинных пролетов – от 6,1 до 17 м. Таким образом, гибкая ошиновка ОРУ является неоднородной по составу механической системой, которая под действием ЭДУ при КЗ совершает сложное колебательное движение. При больших токах КЗ оно сопровождается недопустимым сближением проводов соседних фаз и значительными динамическими усилиями на порталы и электрические аппараты. Поэтому в соответствии с указаниями ПУЭ и ГОСТ при проектировании ОРУ необходимо проверять электродинамическую стойкость гибкой ошиновки к большим токам КЗ.

Для оценки электродинамической стойкости гибкой ошиновки по условиям необходимо выполнить расчет ее динамики с учетом конструктивных элементов ОРУ. Расчетным является один пролет гибкой ошиновки ОРУ. Влияние на него смежных участков заменяется динамическими силами, являющимися зеркальным отображением тяжений расчетного пролета.

Считается, что рядом расположенные пролеты идентичны и обтекаются одинаковыми по величине токами КЗ. В местах присоединения к гибким шинам спусков, гирлянд изоляторов, шлейфов, распорок, коромысел действуют сосредоточенные нагрузки, поэтому динамика гибкой ошиновки не может быть описана только уравнениями гибкой упругой нити. Эту систему необходимо дополнить уравнениями движения конструктивных элементов (гирлянд изоляторов, порталов, отпайек к аппаратам, аппаратов, зажимов, коромысел и распорок). Гирлянда изоляторов является гибкой цепью элементов, состоящей из чередующихся изоляционных и металлических компонентов.

Однако для упрощения модели она, как и провод, представляется гибкой упругой нитью с равномерно распределенной по длине массой. Этот подход очевиден и используется в работах, посвященных механическому расчету гибкой ошиновки ОРУ и воздушных ЛЭП. Упругие свойства расчетной модели гирлянды определяются параметрами стальных стержней изоляторов, составляющих более 90 % всей ее длины. Поэтому расчетная модель

гибкой ошиновки состоит из последовательно связанных между собой участков однородных гибких упругих нитей. Динамика участков расчетной модели, заменяющих гирлянды, провода шин и спусков, описывается системой уравнений.

Для гибкой ошиновки с расщепленными проводами в местах присоединения спусков устанавливаются дистанционные распорки жесткого типа. Согласно принципу связей механики, они освобождаются от последних, и рассматривается их динамика под действием сил от шин и спусков по уравнениям жесткой распорки.

Эти уравнения используются также для описания динамики коромысла, соединяющего гирлянду с расщепленными проводами гибкой ошиновки. Динамика концов гирлянд и спусков зависит от упругих и инерционных характеристик порталов, электрических аппаратов и шинных изолирующих опор.

При КЗ в ячейке путь протекания тока КЗ включает в себя провода ответвлений. Их электродинамические взаимодействия между собой и с шинами ОРУ обуславливают изгибающие нагрузки по трем взаимноперпендикулярным направлениям. Динамические прогибы шинных изолирующих опор и электрических аппаратов находят из уравнений колебаний упругого стержня с заземленным концом (консоли). Электрические аппараты представляются эквивалентной консолью. Соответствие динамических характеристик консоли и реального электрического аппарата обеспечивается при использовании его экспериментальной жесткости в целом.

УДК 621.311

**SMART GRIDS – УМНЫЕ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Пузиновский В.Д.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Булойчик Е.В.

С момента появления в 1886 году электросети претерпели значительные изменения. Первая электросеть, будучи централизованной, представляла собой однонаправленную систему передачи и распределения электрической энергии. Однако к началу XX века количество таких сетей значительно выросло. Также возросли требования к системе электроснабжения, что потребовало объединения отдельных сетей в общую энергосистему.

Начали строиться новые самые разные электростанции: на ископаемом топливе, гидроэлектрические плотины, атомные станции. Каждая из них имеет свои особенности в географическом размещении. Так, например, для функционирования ГЭС необходимы мощные реки, ТЭС требует залежей ископаемых, либо железнодорожные пути для их доставки, а АЭС нуждается в большом водоёме для охлаждения.

За последние 30 лет существенно возросли потребности в электроэнергии. Энергетическое оборудование продолжает совершенствоваться, энергосистемы становятся всё более сложными. Это привело к предпосылкам по воплощению идеи автоматизации и компьютеризации энергетических процессов, оптимизации управления энергосистемой в целом, сетями и электроприёмниками в частности.

Smart Grid («Умная сеть» электроснабжения) – это модернизированные сети электроснабжения, использующие коммуникационные и информационные сети для сбора, хранения и обработки информации, на основе которой автоматически формируется режим системы, обеспечивающий надёжность, экономичность и эффективность электроснабжения.

Установка новых приборов учёта у потребителей и подключение их к «умной сети» позволит в режиме реального времени отслеживать потребление электроэнергии, напряжение, а также формировать графики нагрузок для каждого потребителя. Полученные графики будут обработаны в дата-центре, что позволит определить оптимальное время для ремонта и обслуживания энергетического оборудования, обеспечивать высокий уровень качества электроэнергии, а также получить максимальную экономичность без ущерба надёжности электроснабжения.

Примером дальнейшего развития «умной сети» является корректировка режима работы электроприёмников в зависимости от режима электроэнергетической системы. Например, если взять мощную холодильную установку, оснастить её контроллером, подключенным к «умной сети», то станет возможным управлять режимом работы таким образом, чтоб пуск установки не приходился на пики нагрузки, а происходил в момент её снижения.

Умное управление нагрузками позволит использовать энергоёмкие приборы, не привязанные к определённому времени, в период ночного минимума нагрузки. В совокупности с применением позонных тарифных ставок это позволит не только облегчить режим энергосистемы, но и экономить деньги.

Помимо этого, возможно участие генерирующих установок, отдалённых от центра электроснабжения потребителей, в работе сети. Солнечные и ветряные генерирующие установки имеют существенный недостаток, а именно, непостоянство отдаваемой мощности. Однако их использование в «умной сети» позволит питать удалённые потребители от их же альтернативных источников, а недостаток мощности подавать из сети. Применение такого подхода избавляет энергетиков от использования местных крупных станций, а также создаёт стимул для развития альтернативной энергетики.

«Умные сети» удобны в применении, однако достаточно сложны в исполнении. Простой линейный программный алгоритм трудно реализовать для столь сложной и масштабной системы. Помимо этого, необходимо обеспечить гибкость алгоритма: новые потребители и генерирующие установки надо так же просто подключать к системе.

Одним из лучших решений для построения анализирующей и управляющей части «умной сети» является применение нейронных сетей. Искусственная нейронная сеть – это математическая модель, либо её аппаратное воплощение, построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей.

Нейросети могут выполнять в энергетике следующие задачи:

- распознавание режимов;
- принятие решений и управление энергосистемой;
- принятие решений и управление отдельными станциями;
- прогнозирование пиков нагрузок;
- формирование алгоритмов для предотвращения развития аварий;
- анализ получаемых данных для повышения экономичности работы;
- анализ предыдущих аварий для снижения их последствий в будущем;
- регулирование напряжения;
- выявление неисправностей.

Кластер – группа компьютеров, объединённых высокоскоростными каналами связи, представляющая с точки зрения пользователя единый аппаратный ресурс. Кластер – слабо связанная совокупность нескольких вычислительных систем, работающих совместно для выполнения общих приложений, и представляющихся пользователю единой системой.

В большинстве случаев, кластеры серверов функционируют на отдельных компьютерах. Это позволяет повышать производительность за счёт распределения нагрузки на аппаратные ресурсы и обеспечивает отказоустойчивость на аппаратном уровне.

В случае со Smart Grid, кластеры – незаменимая вещь. Огромные вычислительные мощности позволяют обеспечить достаточное быстродействие. А большое количество узлов обеспечат надёжность при отказах некоторых из них, позволяя функционировать системе.

Кластерная структура подразумевает наличие master-узла – компьютера, через который происходит взаимодействие со всем кластером, и большого количества вычислительных узлов. Получив задание на обработку, master-узел распределяет его на свободные вычислительные узлы. Те в свою очередь выполняют свою часть работы и возвращают каждый свой результат. Master-узел собирает часть результатов, анализирует и выдаёт решение.

На практике структуру умных сетей можно сделать кластерной. В этом случае каждый район будет работать автономно и одновременно взаимодействовать со всей системой.

Ситуация в белорусской энергетике имеет свою специфику, которую необходимо учитывать при оценке перспектив внедрения умных сетей. Следует принимать во внимание следующие факторы:

- избыточность генерирующих мощностей, заложенная при создании единой энергосистемы;
- наличие значительных резервов повышения энергоэффективности;
- значительный износ энергетических активов.

Положительным моментом являются законодательные и правительственные инициативы в области энергосбережения и энергоэффективности.

Подводя итоги, можно быть уверенным, что переход к «умной сети» в будущем – это такой же неизбежный шаг, как и объединение энергосистем в прошлом. Переход не сможет пройти мгновенно. Однако постепенное внедрение рассмотренных технологий, в итоге, положит начало к объединению энергетического оборудования и потребителей в тесно взаимосвязанную, автоматизированную систему, где каждый генератор будет работать в таком режиме, который учитывает, как технологический процесс, так и эффективность энергосистемы в целом. Каждый трансформатор будет работать наиболее эффективно. Каждая линия электропередачи сможет передать точную информацию о месте повреждения. Каждый местный источник электроэнергии будет использован наиболее эффективно. Каждый потребитель будет участвовать в улучшении режима энергосистемы.

**Литература**

1. Ледин, С.С. Интеллектуальные сети Smart Grid – будущее российской энергетики / С.С. Ледин // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2010. – № 11 (16). – С. 4–8.
2. Пономарев, В.С. Применение адаптивных регуляторов на основе нейронных сетей в энергетике / В.С. Пономарев, В.И. Финаев // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2008. – № 7. – С. 164–169.
3. Smart Grid [Электронный ресурс] / Зеленая энциклопедия. – М., 2017. – Режим доступа : <http://greenevolution.ru/enc/wiki/smart-grid/>. – Дата доступа : 16.04.2018.
4. Википедия [Электронный ресурс] / Свободная энциклопедия. – Режим доступа : <https://ru.wikipedia.org/>. – Дата доступа : 16.04.2018.
5. Историческая справка об электросетях [Электронный ресурс] / Экспоцентр. – М., 2017. – Режим доступа : <http://www.elektro-expo.ru/ru/articles/smart-grid/>. – Дата доступа : 16.04.2018.

УДК 620.9

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОР НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Косьян А.М.

Научный руководитель – Артёменко К.И.

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, содержащее от двух до нескольких обмоток, расположенных на общем магнитопроводе, и индуктивно связанных, таким образом, между собой. Служит трансформатор для преобразования электрической энергии переменного тока посредством электромагнитной индукции без изменения частоты тока. Используют трансформаторы как для преобразования переменного напряжения, так и для гальванической развязки в различных сферах электротехники и электроники.

Особенность работы измерительного трансформатора напряжения заключается в том, что его вторичная обмотка всегда оказывается замкнутой на большое сопротивление, и трансформатор работает в режиме, близком к режиму холостого хода, так как подключаемые приборы потребляют незначительный ток.

Измерительные трансформаторы напряжения являются важными элементами любой высоковольтной сети. Основное назначение трансформаторов напряжения – это понижение высокого напряжения, необходимого для питания измерительных цепей, цепей релейной защиты, автоматики и учета. С помощью трансформаторов напряжения осуществляется измерение напряжения в высоковольтных сетях, питание катушек реле минимального напряжения, обмоток напряжения защит, ваттметров, фазометров, счетчиков, а также контроль состояния изоляции сети.

Трансформатор напряжения понижает высокое напряжение до стандартного значения 100 В. И для отделения цепей измерения и релейной защиты от первичных цепей высокого напряжения. Первичная обмотка включена на напряжение сети, а к вторичной обмотке присоединены параллельно катушки измерительных приборов и реле. Трансформатор напряжения в отличие от трансформатора тока работает в режиме, близком к холостому ходу, так как сопротивление параллельных катушек приборов и реле большое, а ток, потребляемый ими, невелик.

Для питания вторичных цепей трансформаторы напряжения могут устанавливаться как на шинах подстанции, так и на каждом присоединении. Прежде чем приступить к монтажу, следует провести осмотр трансформатора напряжения и проверить целостность изоляции, исправность швов армировки и уровень масла у масляных трансформаторов. При установке первичная и вторичная обмотки трансформатора напряжения в целях безопасности заворачиваются, поскольку случайное соприкосновении вторичной обмоток с проводами сварки, освещения и т. п. может привести к появлению на выводах первичной обмотки высокого напряжения, опасного для человеческой жизни. Чтобы обслуживание вторичных цепей при эксплуатации было безопасным, обязательно производится заземление вторичной обмотки трансформатора и его корпуса. Таким образом, устраняется возможность перехода высокого напряжения во вторичные цепи при пробое изоляции.

Подключая измерительные приборы и устройства защиты к трансформаторам напряжения, следует учитывать тот факт, что включение большого количества электроприборов приводит к повышению значения тока во вторичной обмотке и увеличению погрешности измерения. Поэтому следите за тем, чтобы полная мощность подключенных приборов к трансформатору напряжения не превышала максимально допустимой мощности нагрузки трансформаторов напряжения, указанной в паспорте. В случае если мощность нагрузки превышает номинальную мощность трансформатора для требуемого класса точности, необходимо установить еще один трансформатор напряжения и часть приборов присоединить к нему.

В зависимости от назначения могут применяться трансформаторы напряжения с различными схемами соединения обмоток. Для измерения трех междуфазных напряжений можно использовать два однофазных двухобмоточных трансформатора соединенных по схеме открытого треугольника, а также трехфазные двухобмоточные трансформаторы обмотки которых соединены в звезду. Для измерения напряжения относительно земли могут применяться три однофазных трансформатора, соединенных по схеме звезда звезда, или трехфазные трехобмоточные трансформаторы. В последнем случае обмотка, соединенная в звезду, используется для присоединения измерительных приборов, а к обмотке, соединенной в разомкнутый треугольник, присоединяется реле защиты от замыканий на землю. Таким же образом в трехфазную группу соединяются однофазные трехобмоточные трансформаторы.

По конструкции различают трехфазные и однофазные трансформаторы. Трехфазные трансформаторы напряжения применяются при напряжении до 18 кВ, однофазные – на любые напряжения. По типу изоляции трансформаторы могут быть сухими, масляными и с литой изоляцией.

Для обеспечения нормальной работы, измерительный трансформатор напряжения должен быть защищен от токов короткого замыкания со стороны нагрузки, поскольку они вызывают перегрев и повреждение изоляции обмоток трансформаторов напряжения, а также приводят к возникновению короткого замыкания в самом трансформаторе. С этой целью во всех не заземленных проводах устанавливаются автоматические выключатели. Кроме этого во вторичных цепях трансформатора напряжения предусматривается установка рубильника, для создания видимого разрыва электрической цепи. Защита первичной обмотки от повреждений выполняется при помощи предохранителей.

В электроэнергетике находят применение два типа трансформаторов напряжения: электромагнитные трансформаторы напряжения при напряжении 330 кВ и емкостные трансформаторы напряжения в установках 500 кВ и выше.

Основными факторами, вызывающими искажения вторичных напряжений электромагнитных т, являются падения напряжения в обмотках от намагничивающего тока и токов нагрузки, а также переходные процессы во вторичных цепях. В установившихся режимах с синусоидальными напряжениями эти факторы обуславливают отклонения вторичного напряжения от расчетных значений в пределах, определяемых классом точности трансформаторов напряжения, то есть 0,5–1 %. В переходных режимах количественные искажения вторичных напряжений хотя и могут превышать указанные значения, но не выходят за пределы 5–10 %, допустимые для устройств. Длительность протекания переходных процессов в цепях вторичной нагрузки при обычном ее составе не превышает 1–2 периодов. Выполненные исследования показывают, что при пониженных напряжениях, имеющих место в режимах короткого замыкания, электромагнитные трансформаторы напряжения не выносят заметных качественных искажений во вторичные напряжения, обеспечивая практически идеальное преобразование входных сигналов.

Емкостные трансформаторы напряжения содержат, кроме емкостного делителя напряжения и выходного электромагнитного трансформатора напряжения, дроссель, настроенный в резонанс с конденсаторами делителя, и мощный активно-индуктивный демпфер для подавления субгармонических автоколебаний. Имеются предложения о включении в состав демпфера полупроводниковых корректирующих элементов для уменьшения погрешностей.

Наличие в составе емкостного трансформатора напряжения довольно мощных накопителей энергии емкостного и индуктивного характера обуславливает более интенсивные и длительные электромагнитные переходные процессы в его цепях, чем у электромагнитных трансформаторов напряжения. Эти процессы особенно сильно проявляются при коротких замыканиях, близких к месту установки защиты, когда первичные напряжения скачкообразно уменьшаются до очень малых значений. Математические модели емкостные трансформаторы напряжения должны содержать полное описание составных

элементов с учетом нелинейностей намагничивающего контура выходного трансформатора и демпфирующего устройства.

В установках напряжением до 330 кВ применяются трехобмоточные однофазные трансформаторы напряжения, первичные обмотки которых подключаются на фазные напряжения относительно земли, образуя схему полной звезды с заземленной нейтралью. Одна группа обмоток низшего напряжения также соединяется в звезду и несет основную нагрузку трансформатора напряжения, состоящую из цепей напряжения измерительных приборов, устройств релейной защиты и автоматики. Другая группа вторичных обмоток соединяется в разомкнутый треугольник и питает сравнительно небольшую нагрузку, образованную цепями напряжения устройств релейной защиты и сигнализации замыканий на землю. В нормальном режиме эти обмотки фактически не нагружены и переходный процесс в них при коротком замыкании не оказывает заметного влияния на напряжения основных обмоток. Исходя из этого, при математическом влиянии обмоток, соединенных в разомкнутый треугольник, и трансформатор напряжения рассматриваются как двухобмоточные.

Однофазный трансформатор напряжения аналогичен по конструкции и математическому описанию однофазному силовому трансформатору малой мощности.

#### Литература

1. Романюк, Ф.А. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем / Ф.А. Романюк. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. – 173 с.

УДК 621.3

**ТЕРМИНАЛЫ ЗАЩИТ ТРАНСФОРМАТОРОВ 35–110 КВ**

Крицкий А.С.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Булойчик Е.В.

Трансформаторы и автотрансформаторы конструктивно весьма надежны благодаря отсутствию у них движущихся или вращающихся частей. Несмотря на это, в процессе эксплуатации возможны и практически имеют место их повреждения и нарушения нормальных режимов работы. Поэтому трансформаторы и автотрансформаторы должны оснащаться соответствующей релейной защитой.

Основные типы защиты трансформаторов:

- Дифференциальная защита.
- Токовая отсечка.
- Газовая защита.
- Максимальная токовая или максимальная направленная защита.
- Защита от замыканий на корпус.
- Защита от перегрузки.
- и другие виды защиты.

Функции защиты трансформаторов и автотрансформаторов:

- дифференциальная токовая защита трансформатора;
- цепи отключения от газовой защиты трансформатора и РПН;
- УРОВ стороны высокого напряжения;
- цепи отключения от внешних устройств РЗА;
- цепи сигнализации от датчиков трансформатора;
- защита от перегруза;
- автоматика управления выключателем ВН;
- диагностика выключателя высокого напряжения;
- цепи отключения от газовой защиты трансформатора и РПН;
- ТЗНП стороны высокого напряжения;
- МТЗ стороны высокого напряжения с комбинированным пуском по напряжению;
- УРОВ стороны высокого напряжения;
- защита от обрыва фаз;
- автоматика регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой;
- компенсация падения напряжения в линии (регулирование напряжения на шинах потребителя). Возможность регулирования напряжения в соответствии с календарём и временем суток;
- автоматическое и ручное регулирование;
- возможность дистанционного управления;
- МТЗ для сигнализации и блокирования АРНТ при перегрузе;
- диагностика привода РПН;
- цифровой индикатор положения РПН.

**Литература**

1. Назначение и основные типы защиты трансформаторов и автотрансформаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://rza.org.ua/rza/read/9-1--Naznachenie-i-osnovnie-tipi-zashchiti-transformatorov-i-avtotransformatorov\\_55.html](http://rza.org.ua/rza/read/9-1--Naznachenie-i-osnovnie-tipi-zashchiti-transformatorov-i-avtotransformatorov_55.html). – Дата доступа : 27.04.2018.
2. Шкафы защиты и автоматики двухобмоточных трансформаторов 35–110 кВ серии "Ш2500 08.21х" [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://relematika.ru/produkty/zaschity\\_transformatorov/shkafy-serii-sh2500-08.21/](https://relematika.ru/produkty/zaschity_transformatorov/shkafy-serii-sh2500-08.21/). – Дата доступа : 27.04.2018.

УДК 621.3.022

## ЩИТОВЫЕ ПРИБОРЫ

Бертош Е.С.

Научный руководитель – Климкович П.И.

Щитовые измерительные приборы включают в себя оборудование для измерения рабочих параметров, предназначенное для размещения на панели или щитах управления.

Конструкция щитовых приборов предусматривает специальную систему креплений, позволяющих установить приборы на щит или на панель. Приборы в щитовом исполнении отличаются компактными размерами корпуса и возможностью работы, в том числе, в суровых промышленных условиях, а также подходят для размещения на улице.

Независимо от назначения щитовые измерительные приборы представлены в различных вариантах исполнения в зависимости от технических характеристик и рабочих параметров.

Щитовое измерительное оборудование применяется для контроля параметров протекания рабочих процессов, а также для автоматизации производственных систем практически во всех современных промышленных отраслях.

Высокая функциональность и простота обслуживания позволяют использовать измерительные приборы для щитового размещения и в бытовом применении, в лабораторных и полевых испытаниях.

Щитовые широко применяются в энергетике, связи, промышленности, на транспорте, в научных исследованиях, медицине, а также в быту – для учёта потребляемой электроэнергии. Используя специальные датчики для преобразования неэлектрических величин в электрические, щитовые приборы можно использовать для измерения самых разных физических величин, что ещё больше расширяет диапазон их применения.

### Литература

1. Илюнин, К.К. Справочник по электроизмерительным приборам / К.К. Илюнин. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 119 с.
2. Атамалян, Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин / Э.Г. Атамалян. – М. : ДРОФА, 2005. – 448 с.

УДК 621.3

## ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Семенович Н.В.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Пономаренко Е.Г.

В ходе эксплуатации силовых трансформаторов неизбежно возникают различные повреждения, которые могут нарушать нормальный режим работы оборудования. С одними дефектами агрегаты могут продолжать функционирование, тогда как другие приводят к их полному отключению. В любом случае необходимо оперативное проведение ремонта, который позволит избежать серьезной аварии и привести к еще более сложным повреждениям. При этом важно не только определить характер дефекта, но и причины его появления.

**Неисправность магнитопровода.** Магнитопровод является ключевым компонентом силового трансформатора. Основной причиной, которая может вывести его из строя, считается перегрев. Высокая температура разрушает лаковую пленку и приводит к спеканию стальных листов. Также повреждения данного устройства могут быть спровоцированы образованием короткозамкнутых контуров, замыкающих отдельные участки магнитопровода между собой, и разрушением изоляции шпилек.

**Повреждение изоляции.** Основной причиной нарушения целостности главной изоляции является ее чрезмерное увлажнение под воздействием повышенной влажности. Также возможно механическое разрушение при наличии в ее структуре мелких изъянов. Многие сухие трансформаторы с литой изоляцией мощностью более 220 кВ часто сталкиваются с проблемой «ползущего разряда». Данное явление заключается в разрушении изолирующего слоя локальными разрядами, которые возникают и распространяются под воздействием высокого рабочего напряжения. Витковая изоляция получает повреждения в ходе коротких замыканий или протечек масляных каналов.

**Сбой в работе переключателей напряжения.** Неисправность ПБВ обычно связана с нарушением контакта между токоведущими стержнями и подвижными кольцами. Его причиной может быть, как образование оксидной пленки на контактирующих элементах, так и снижение давления. У более сложных по строению регуляторов РПН повреждения обычно возникают вследствие подгара контактов, снижения прочности стальных деталей, износа бумажно-бакелитового вала или заклинивания контакторов.

**Повреждение силовых вводов.** Главная причина выход из строя этих устройств заключается в переувлажнении бумажной основы, которое может возникать в результате неаккуратной доливки масла или разрушения уплотнителей. Фарфоровые вводы обычно получают повреждения при перегреве контактов в токоведущих шпильках или в месте соединения с наружными шинами.

### Литература

1. Охлаждающие устройства масляных трансформаторов / А.М. Голунов. – М. : Энергия, 1964.
2. Объем и нормы испытаний электрооборудования. РД 34.45-51.300.97. – 6-е изд. – М.: ЭНАС, 1998.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М. : Омега-Л, 2013.

УДК 621.311

## РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТА SMART GRID НА ПРИМЕРЕ ОСТРОВА ГОТЛАНДА

Астошонок В.С.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Булойчик Е.В.

Проект Smart Grid Gotland направлен на разработку стратегий построения и эксплуатации крупномасштабной интеллектуальной сети с высокой долей непостоянной ветровой энергии в распределительной сети.

Шведский остров Готланд – самый большой остров в Балтийском море, он был выбран министерством энергетики Швеции для реализации следующих задач:

- увеличение уровня производства возобновляемой электроэнергии;
- сокращение выбросов углекислого газа;
- сокращение использования нефти и газа в производстве энергии.

На исследовательский проект Smart Grid Готланд получил финансовую поддержку от Шведского энергетического агентства в размере 15 миллионов у. е., что составляет 45 % от общего бюджета проекта, который со временем может служить в качестве модели интеллектуальных электрических сетей в международном масштабе. Smart Grid – это система передачи электроэнергии от производителя к потребителю, которая самостоятельно отслеживает и распределяет потоки электричества для достижения максимальной эффективности использования энергии.

Над проектом Smart Grid Gotland работают АББ (ABB), Ваттенфалль (Vattenfall), Готландс Энерджи (Gotlands Energi AB – GEAB), Королевский технологический институт (KTH), шведские национальные сети (Swedish National Grid) и Телвент (Telvent). Умная сеть будет внедрена к востоку от столицы острова Висбю в районе, где функционирует ветровой парк и доступна распределительная сеть, которую предоставит GEAB (Энергетической компания Готланда). Планируется привлечь к проекту порядка 2000 частных домохозяйств и около 30 предприятий и фермерских хозяйств. Данные потребители, которые уже начиная с 2013 года присоединяются к проекту, будут получать предупреждения об изменениях тарифов на электроэнергию и, таким образом, получают возможность соответствующим образом регулировать ее потребление. В перспективе часть вырабатываемой ветропарком Готланда электрической энергии планируется транспортировать на материк по проложенным по дну Балтийского моря кабельным линиям. Интеллектуальная сеть Готланда может послужить примером адаптации, не приспособленной к новой модели генерации существующей сети к новым условиям.

Согласно проекту Smart Grid Gotland часть существующей сельской сети в Готланде перестраивается в так называемую сеть самовосстановления.

Энергетический комплекс, построенный специально для эксперимента состоит из трех однофазных установок, каждая из которых составляет 3,2 кВт и одна трехфазная установка мощностью 22,5 кВт.

Целью установки является исследование и проверка того, как система влияет на качество электроэнергии в сельской сети, а также на то, как установка влияет на методы интеллектуальных счетчиков для определения различных состояний в сетке электроснабжения. В дополнение к этому будут исследованы возможности интеллектуальных счетчиков для определения проблем качества электроэнергии, вызванных солнечной установкой. Установка временная и используется в исследовательских целях.

На этапе внедрения компания АББ построила интеллектуальную подстанцию 10 кВ в селе Келлунге, где используется современная технология коммутационного оборудования на основе концепции Unigear Digital. Для обработки данных с этой подстанции и сельской сети АББ настраивает и предоставляет систему расширенной системы управления распределением (ADMS) и диспетчерского контроля и сбора данных (SCADA).

Алгоритм функционирования интеллектуальной нейронной сети в Готланде приведён на рисунке 1.

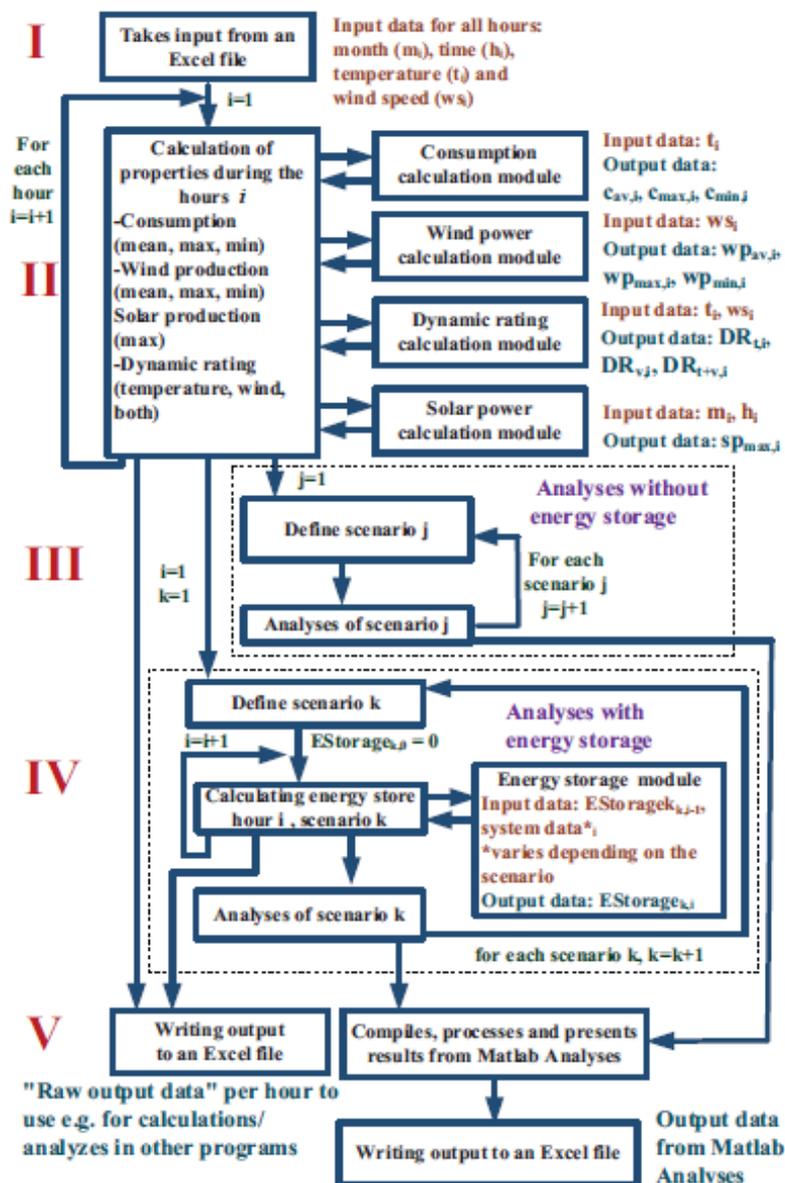


Рисунок 1. Алгоритм функционирования модели интеллектуальной нейронной сети

На первом этапе программа моделирования MatLab получает входные данные из файла Excel. В течение каждого часа вводятся следующие данные: месяц (1–12), время (1–24), температура [ $^{\circ}$ ] и скорость ветра [ $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ]. Предела для количества записей нет.

На втором этапе происходят почасовые расчёты. Рассчитываются различные состояния погоды за каждый час, которые отправляются на входы в модули. Затем происходит расчёт параметров и на выходе получают результаты.

На третьем этапе выполняются аналитические действия с использованием большого количества исходных результатов, которые были получены на втором этапе. Определяются характеристики системы, производятся различного рода анализ результатов.

На четвёртом этапе производятся расчёты накопления энергии: как и на третьем этапе, определяются свойства системы, а также используются результаты второго этапа. Кроме того, используется модуль для хранения энергии.

Затем программа записывает полученные результаты в Excel.

На некоторые решения Smart Grid напрямую влияют параметры погоды. В то же время от погоды часто косвенно зависят требования к мощности компонентов. Отопление и кондиционирование воздуха являются примерами поведения человека, которые зависят от

температуры наружного воздуха и влияют на потребление электроэнергии, в Швеции он даёт отрицательную корреляцию между температурой и потреблением. Примером также может служить зависимость между производством энергии ветра и его скоростью, параметром погоды, который также влияет на динамическую нагрузку воздушных линий.

Зависимость выработки энергии ветра от температуры объясняется высоким давлением с малой скоростью ветра. Такая погода наблюдается при очень низкой температуре, либо при очень высокой. Более высокие скорости ветра в среднем наблюдаются весной и осенью.

Зависимость потребления электроэнергии от температуры сравнительно низкая и в среднем диапазоне температур она почти линейна.

Вся собранная с оборудования информация анализируется, а результаты анализа помогают оптимизировать использование электроэнергии.

Smart Grid Gotland – проект, направленный на разработку стратегии создания и эксплуатации крупномасштабных интеллектуальных сетей с большой долей непостоянной энергии ветра в общем энергобалансе. Это важный шаг и один из ключевых элементов развития современной устойчивой экономики, который может быть воплощен в масштабах как всей Швеции, так и других стран мира.

В настоящее время многие государства внедряют системы Smart Grid и строят распределенные энергосистемы вместо классических централизованных. Распределенные системы легко интегрируют в себя узлы производства, передачи и распределения, при этом частью сети становятся даже обычные электросчетчики и домашние бытовые приборы. При создании интеллектуальных энергосистем инженеры должны решать задачи управления энергией, передачи данных и анализа информации.

#### Литература

1. Круглов, В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Борисов, В.В. Круглов. – М. : Горячая линия-Телеком, 2002. – 383 с.
2. Smart Grid Godand [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.smartgridgotland.com/eng/>. – Date of access : 12.12.2017.
3. Smart Grid или умные сети электроснабжения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://www.eneca.by/ru\\_smartgrid0/](https://www.eneca.by/ru_smartgrid0/). – Дата доступа : 03.03.2018.
4. Wallnerstrom, J.C. Analys av smartaelnatsteknologier inom kategorin elnatslosningar / C.J. Wallnerstrom, P. Hilber, S. Babu and J.H. Jurgensen. – Stockholm : Samordningsradet for smartaelnat, 2014. – 115 p.
5. Wallnerstrom, C.J. Impact from Dynamic Line Rating on Wind Power Integration / J.C. Wallnerstrom, Y. Huang, L. Soder // IEEE Trans. on Smart Grid. – 2015. – Vol. 6. – P. 343–350.
6. Pioneering Smart Grids on Gotland, Sweden [Electronic resource]. Mode of access : <http://www.abb.com/cawp/seitp202/077f92def9668579c1257a400037425b.aspx>. – Date of access : 27.02.2018.
7. Искусственный интеллект эффективно распределит энергию в электросетях [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://energy.media/2017/02/05/effektivnoraspredelitenergiyuvelektrosetyah/>. – Дата доступа : 10.02.2018.

УДК 621.3

## ВЫСОКОТОЧНАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА И КАЛИБРАТОР ПРОИЗВОДСТВА OMICRON

Лазарев Н.В.

Научный руководитель – Баран А.Г.

Данный доклад посвящен исследованиям, лежащим в области изучения высокоточной испытательной установки и калибратора производства OMICRON.

Объектом исследования являются высокоточная испытательная установка и калибратор производства OMICRON и их технические характеристики.

Цель работы – изучить и проанализировать особенности и принцип работы высокоточной испытательной установки и калибратора производства OMICRON и рассмотреть сферы применения.

В работе представлена информация об устройстве высокоточной испытательной установки и калибратора производства OMICRON, назначение данного изделия, технические характеристики и информация об эксплуатации.

На сегодняшний день развитие электроэнергетической отрасли не стоит на месте, в связи с этим развиваются и создаются и высокотехнологические устройства, позволяющие проводить испытания и мониторинг оборудования электроэнергетической отрасли. Все больше электростанций всех типов, предприятий магистральных и распределительных сетей, производителей высоковольтного оборудования, промышленные предприятия, наладочные и сервисные предприятия и другие компании нуждаются в мониторинг первичного оборудования, проведении испытаний, диагностик и точного оценивания состояния оборудования высокого и среднего напряжения.

Ведущим мировым поставщиком таких устройств (услуг) является австрийская компания OMICRON. Разработки данной компании позволяют с высокой точностью оценивать состояние первичного и вторичного оборудования в энергосистемах, к ним относятся: СМС 256plus и СМС 353.

СМС 256plus является первым выбором для приложений требующих очень высокой точности. Это устройство не только отличный тестовый комплект для устройств защиты всех видов, но также универсальный калибровочный инструмент. Его высокая точность позволяет калибровать широкий диапазон измерительных приборов, в том числе: счетчиков энергии класса 0,2, измерительные преобразователи, измерение качества электроэнергии устройств и блоков измерения фаз (PMU).

СМС 353 включает в себя: испытательный комплект с 3 каналами тока, 4 каналами напряжения и инструментальное средство для пусконаладочных работ. СМС 353 представляет собой отличную комбинацию портативности и мощности. Это идеальный испытательный комплект для трехфазного испытания защиты и ввода в эксплуатацию систем SCADA.

Таким образом, невозможно не заметить актуальность исследования и востребованность производства высокоточной испытательной установки и калибратора производства OMICRON, так как развитие электроэнергетики не стоит на месте

### Литература

1. OMICRON electronics [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.omicronenergy.com/ru/products>. – Дата доступа : 28.04.2018.
2. Основы релейной защиты [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://rza.org.ua/rza/view/Apparatura-dlya-proverki-releynoy-zashchiti\\_15.html](http://rza.org.ua/rza/view/Apparatura-dlya-proverki-releynoy-zashchiti_15.html). – Дата доступа : 28.04.2018.

УДК 621.3

## УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Гурнович М.С.

Научный руководитель – Баран А.Г.

Установки для испытаний трансформаторов тока предназначены для проведения электромагнитных испытаний однофазных и трехфазных силовых трансформаторов: проверка коэффициента трансформации и группы соединения обмоток; измерение сопротивления обмоток постоянному току; измерение потерь и напряжения КЗ; измерение потерь и тока ХХ.

Установки для испытаний трансформаторов тока предназначены для применения на предприятиях по производству и ремонту силовых трансформаторов, на электростанциях и подстанциях.

Испытания и измерение характеристик:

- Измерение сопротивления изоляции.
- Измерение  $\tan\delta$  изоляции.
- Испытание повышенным напряжением.
- Снятие характеристик намагничивания.
- Измерение коэффициента трансформации.
- Измерение сопротивления обмоток постоянному току.
- Испытания трансформаторного масла.
- Испытания встроенных трансформаторов тока.
- Контроль изоляции под рабочим напряжением.

### **СЭИТ-3 – Стенд для испытаний трансформаторов.**

При помощи СЭИТ-3 производятся следующие испытания:

- проверка коэффициента трансформации и группы соединения обмоток;
- измерение сопротивления обмоток постоянному току;
- измерение потерь и напряжения КЗ;
- измерение потерь и тока ХХ.

Стенд СЭИТ-3 предназначен для эксплуатации в следующих условиях:

- температура окружающей среды 10–35 °С;
- относительная влажность воздуха, не более 80 % при 25 °С;
- атмосферное давление 84–106,7 кПа.

Нормальные условия:

- температура окружающей среды (20 ± 5) °С;
- относительная влажность воздуха (30–80) %;
- атмосферное давление (84–106,7) кПа.

### **Комплексный стенд испытаний трансформаторов тока (КСИТТ).**

КСИТТ позволяет проводить следующие испытания трансформаторов тока:

- определение токовых и угловых погрешностей;
- проверка предельной кратности;
- проверка коэффициента безопасности приборов вторичных обмоток для измерений;
- определение тока намагничивания и определение правильности маркировки выводов;
- определение вольтамперных характеристик;
- испытание межвитковой изоляции обмоток;
- измерения сопротивления вторичных обмоток постоянному току.

### **Литература**

1. СЭИТ-3 – Стенд для испытаний трансформаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.elpriz.ru/cgi-bin/catalog/viewpos.cgi?in\\_id=290](http://www.elpriz.ru/cgi-bin/catalog/viewpos.cgi?in_id=290). – Дата доступа : 30.04.2018.
2. Трансформаторы тока: испытания и измерение характеристик [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.gorod812.com/ispytaniya-izmereniya-i-naladka/transformatory-toka->

ispytaniya-i-izmerenie-kharakteristik. – Дата доступа : 30.04.2018.

3. КПУ-1 Испытания и проверка трансформаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.stds.ru/catalog/ispytaniya-transformatorov/>. – Дата доступа : 30.04.2018.

4. Комплексный стенд испытаний трансформаторов тока – КСиТТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.avem.ru/production/stend/checking\\_transformers/kstt#tabs4](http://www.avem.ru/production/stend/checking_transformers/kstt#tabs4). – Дата доступа : 30.04.2018.

УДК 621.3

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ВИБРАЦИИ

Гедровец Ю.Е.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Пономаренко Е.Г.

В работе описываются различные методы оценки технического состояния роторного оборудования по вибрации.

В последнее время на многих промышленных предприятиях самое пристальное внимание уделяется вопросам повышения надёжности эксплуатации оборудования и предотвращения возникновения аварийных ситуаций. Подобный интерес объясняется целым рядом объективных причин. Изменяются подходы к эксплуатации оборудования, изменяется и усложняется само оборудование, ужесточаются требования промышленной и экологической безопасности. Скрытый характер зарождения и развития неисправностей, накопленная усталость оборудования нередко являются причинами аварийных ситуаций, которые сопровождаются значительными экономическими потерями и загрязнением окружающей среды. Ряд аварий и техногенных катастроф последних лет заставляют по-новому переосмысливать требования к достоверности оценки текущего состояния оборудования и определения его остаточного ресурса с учётом последних достижений науки и техники в области технической диагностики.

Для оценки технического состояния и диагностики роторного оборудования используются следующие методы: «ПИК-фактор», оценка состояния по спектру вибросигнала, спектру огибающей, методу ударных импульсов.

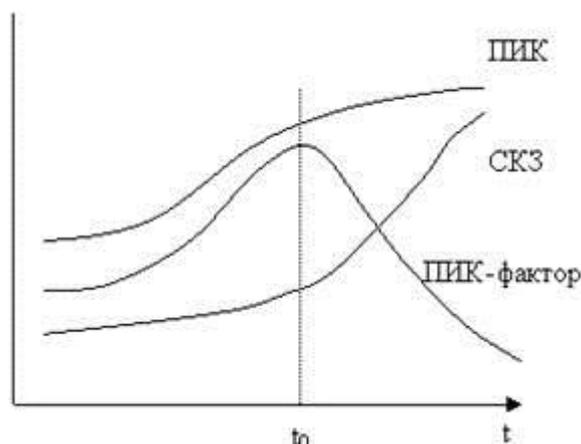


Рисунок 1. Оценочные кривые различных методов

### Метод ПИК-фактора

Для контроля за техническим состоянием подшипников по данному методу необходимо иметь простой виброметр, позволяющий измерять два параметра вибросигнала:

- среднеквадратичное значение уровня (СКЗ) вибрации, т. е. энергию вибрации;
- пиковую амплитуду (ПИК) вибрации (положительную, отрицательную или полный размах).

Метод используется для диагностики несложного вспомогательного оборудования.

### Метод спектра вибросигнала

Для контроля за техническим состоянием подшипников по данному методу необходим анализатор спектра вибрации (виброанализатор). Метод базируется на анализе спектра вибрации – выявлении периодичности (частоты) появления амплитудным виброанализатором и по частотному составу спектра можно идентифицировать возникновение и развитие дефектов подшипника. Достоинства метода – высокая чувствительность, информативность и помехозащищенность. Недостатки – высокая

стоимость, необходим анализатор спектра вибрации с функцией анализа спектра огибающей высокочастотной вибрации.

#### **Метод ударных импульсов**

Метод ударных импульсов основан на измерении и регистрации механических ударных волн, вызванных столкновением двух тел. Метод широко используется для диагностики редукторов и электродвигателей прокатных станов, насосного оборудования.

Таким образом, для достоверной оценки текущего состояния роторного оборудования, наряду с традиционным измерением общего уровня, необходима организация комплексного контроля различных вибрационных параметров.

#### **Литература**

1. Сушко, А.Е. Современные технологии повышения надёжности эксплуатации и ремонта роторного оборудования опасных промышленных производств / А.Е. Сушко // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2010. – № 8. – С. 15–19.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: Кн. 2: Вибродиагностика / Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. – М.: Машиностроение, 2005.
3. Гольдин, А.С. Вибрация роторных машин / А.С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 1999.

УДК 621.311

## МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Горбачевская К.И.

Научный руководитель – Гурьянчик О.А.

Около 15 лет назад в энергетике стало массово внедряться новое оборудование для защиты объектов энергоснабжения, использующее компьютерные технологии на базе процессоров. Его стали называть сокращенным термином МУРЗ – микропроцессорные устройства релейной защиты. Они выполняют функции обыкновенных устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) на основе новой элементной базы – микроконтроллеров (микропроцессорных элементов). Современные разработки в области микропроцессорной техники позволили создать полноценные устройства релейной защиты и автоматики, которые являются альтернативной заменой электромеханическим устройствам.

Микропроцессорная система может рассматриваться как частный случай электронной системы, предназначенной для обработки входных сигналов и выдачи выходных сигналов. Если система цифровая (а микропроцессорные системы относятся к разряду цифровых), то входные аналоговые сигналы преобразуются в последовательности кодов выборок с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП), а выходные аналоговые сигналы формируются из последовательности кодов выборок с помощью цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП).

Характерная особенность традиционной цифровой системы состоит в том, что алгоритмы обработки и хранения информации в ней жестко связаны со схмотехникой системы. То есть изменение этих алгоритмов возможно только путем изменения структуры системы, замены электронных узлов, входящих в систему, и/или связей между ними. Именно поэтому традиционная цифровая система часто называется системой на «жесткой логике».

Путь преодоления этого недостатка довольно очевиден: надо построить такую систему, которая могла бы легко адаптироваться под любую задачу, перестраиваться с одного алгоритма работы на другой без изменения аппаратуры. Тогда система станет универсальной, или программируемой, не жесткой, а гибкой. Именно это и обеспечивает микропроцессорная система.

К микропроцессорным терминалам с гибкой логикой относятся устройства серии Siprotec 4 фирмы SIEMENS.

Реле дифференциальной защиты Siprotec 7UT6 применяются для быстрого и селективного отключения коротких замыканий в трансформаторах всех уровней напряжения, во вращающихся электрических машинах, например, в двигателях и генераторах, а также на коротких линиях и сборных шинах. Защита может применяться для трехфазных и однофазных трансформаторов.

Кроме функции дифференциальной защиты устройство включает резервную токовую защиту обмоток со стороны звезды. Дополнительно можно использовать защиту от низко- или высокоомных замыканий на землю, защиту обратной последовательности и защиту при отказе выключателя. Реле позволяет выполнять измерение и контроль температур с помощью внешних термодатчиков.

Управление может быть с помощью клавиатуры, дискретных входов, DIGSI 4 или системы SCADA, либо логикой, определяемой пользователем с CFC.

DIGSI – универсальный пакет программного обеспечения, предназначенный для работы с устройствами микропроцессорной релейной защиты производства Siemens. Базовая версия DIGSI включает в себя возможность конфигурирования устройств, модуль просмотра измерений, средства наладки устройств, возможности управления устройствами при подключении в режиме on-line, дополнительные материалы по устройствам релейной защиты и программному обеспечению Siemens в электронном виде.

Система SCADA представляет собой программно-аппаратный комплекс, при помощи которого можно контролировать режим работы оборудования различных объектов, в том числе электроустановок.

На мониторе SCADA-системы электрической распределительной подстанции отображается однолинейная схема данной электроустановки, фактическое положение коммутационных аппаратов, нагрузка по всем присоединениям и значения напряжения шин подстанции. При возникновении аварийных ситуаций на систему SCADA передается информация от соответствующего терминала защит оборудования. То есть данная система объединяет все микропроцессорные устройства и собирает информацию по тому или иному присоединению.

#### Литература

1. Пинчук, И.А. Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики / И.А. Пинчук // Сб. Электросила. – 2003. – № 42. – С. 16–34.
2. Ростов, Н.Д. Реле и элементы промышленной автоматики / Н.Д. Ростов // Электроэнерго–2002: Тез. докл. конф. – СПб., 2002. – С. 24–29.

УДК 621.3

## УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА РЕЖИМА САМОЗАПУСКА ГРУППЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД

Башаркевич Я.В., Башаркевич Е.К.

Научный руководитель – доцент Бобко Н.Н.

Самозапуск электродвигателей (ЭД) собственных нужд (СН) тепловых электростанций (ТЭС) является одним из важнейших эксплуатационных режимов, обеспечивающих непрерывность технологического процесса и устойчивую бесперебойную работу теплоэнергетического оборудования при перерывах питания и повторной подаче напряжения на шины СН, соответствующую требованиям нормативно-технических документов. Неуспешный самозапуск ЭД СН может привести к аварийному останову котлов и турбогенераторов, что связано с большим экономическим ущербом из-за недоотпуска электроэнергии и тепла, отключения ответственных потребителей, а также к повреждению основного оборудования.

Возможность осуществления самозапуска ЭД СН должна предусматриваться на стадии проектирования ТЭС путем выбора соответствующих схем электроснабжения и силового оборудования, релейной защиты и автоматики (РЗА). В ряде случаев и при эксплуатации ТЭС также возникает потребность в проверке успешности самозапуска ЭД СН, возникающего в результате кратковременных перерывов питания. Наиболее достоверный и полный ответ на вопрос, успешен или неуспешен самозапуск ЭД после перерывов питания СН, можно получить только после проведения предварительных расчетов и соответствующих дополнительных экспериментальных проверок.

Расчет процессов перерыва питания и самозапуска ЭД СН при любой сложности электрической схемы и различном предшествующем режиме работы источника питания практически невозможно реализовать вручную. При упрощенной оценке успешности процесса самозапуска ЭД СН расчетную схему любой сложности можно преобразовать в простую, эквивалентная схема замещения которой состоит из источника питания неограниченной мощности с шинами постоянного по значению напряжения переменного тока, сопротивления внешней сети, сопротивлений ЭД и других потребителей.

Работа содержит общие рекомендации, с помощью которых могут быть выполнены приближенные оценочные расчеты поведения группы ЭД при глубокой посадке напряжения из-за короткого замыкания (КЗ) или перерыве питания, а также при повторной подаче напряжения с достаточной степенью точности с применением микрокалькулятора.

Необходимость применения упрощенных методов обосновывается: значительно меньшим объемом вычислительных операций; доступностью их применения более широким кругом специалистов; точностью не ниже разработанных сложных программ расчета на ЭВМ. По инженерным упрощенным методом могут быть выполнены расчеты для любой ТЭС эксплуатационным персоналом. Результаты расчетов должны быть согласованы со службами РЗА.

В работе изложены упрощенные приближенные методы расчета режимов работы электродвигателей СН электростанций. Эти методы характеризуются малым объемом вычислительных операций. Представленные методы позволяют выполнить для одного или группы ЭД СН отдельно расчеты следующих режимов: установившегося режима при нормальной работе, режима глубокой посадки напряжения на шинах СН при КЗ за блочным трансформатором, режима выбега одного или группы ЭД при потере электропитания, режима самозапуска группы ЭД при восстановлении электропитания. Эти методы позволяют также оценить правильность выбора мощности трансформаторов собственных нужд (ТСН), состава ЭД подключенных к ТСН, соотношения момента вращения ЭД и момента сопротивления механизма для обеспечения пуска и самозапуска, уставок некоторых видов устройств РЗА.

УДК 621.3

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА С РЕЛЕ ТИПА ДЗТ-21

Фадеев Е.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Булойчик Е.В.

В работе рассмотрены назначение и область применения дифференциальных защит силовых трансформаторов с реле типа ДЗТ-21, а также их принцип действия и устройство.

В работе рассмотрены параметры реле ДЗТ-21 и схем защит с этими реле с точки зрения выбора уставок, принципы расчета уставок, выбор коэффициентов трансформации ТТ, оценка схемы токовых цепей и нагрузки на ТТ.

Дифференциальная защита трансформаторов применяется для предотвращения аварийных и ненормальных режимов работы при возникновении короткого замыкания между фазами, межвитковых КЗ и замыкания одной или более фаз на землю.

Данная защита используется как основной вид автоматического отключения для мощных трансформаторов и для трансформаторов меньшей мощности, в случае если другие виды защиты не обеспечивают требуемого быстродействия.

Дифференциальная защита блоков, трансформаторов и автотрансформаторов типов ДЗТ-21, ДЗТ-23 получила достаточно широкое распространение в энергосистемах. Это объясняется более высокой ее чувствительностью по сравнению с защитами, выполненными на реле типов РНТ и ДЗТ-11 и ДЗТ-13, в сочетании с меньшей стоимостью по сравнению с аналогичными защитами иностранных фирм.

К недостаткам защиты ДЗТ-21 относится гальваническая связь логических цепей защиты с аккумуляторной батареей. Перенапряжения, приходящие из оперативных цепей станции или подстанции, особенно при КЗ на контур расщепленного устройства, могут служить источником повреждений в полупроводниковой части защиты. Полезно в качестве полумеры подавать питание на реле по постоянному току через какой-либо защитный фильтр.

Важнейшим достоинством рассматриваемой защиты ДЗТ-21 является возможность уменьшения тока срабатывания защиты ниже номинального тока силового трансформатора, не опасаясь ложного срабатывания при броске намагничивающего тока и не теряя быстродействия при КЗ в зоне.

Защита типа ДЗТ-21 предназначена для работы при питании ее от сети постоянного оперативного тока напряжением 220 В или 110 В и от блоков питания с номинальным выходным напряжением выпрямленного тока 110 В.

Относительный ток срабатывания защиты с реле типа ДЗТ-21 без торможения регулируется в пределах от 0,3 А до 0,7 А номинального тока принятого ответвления, близкого к номинальному вторичному току трансформатора. Отстройка от бросков намагничивающего тока (БНТ) трансформатора обеспечивается использованием времяимпульсного реагирующего органа с торможением от второй гармоники дифференциального тока. Защита имеет две уставки относительного тока начала торможения: 0,6 А и 1,0 А номинального тока ответвления с отклонением не более 20 %. Важно обратить внимание на то, что при КЗ в зоне ток начала торможения возрастает вдвое, что также повышает чувствительность защиты.

### Литература

1. Голанцов, Е.Б. Дифференциальные защиты трансформаторов с реле типа ДЗТ-21 (ДЗТ-23) / Е.Б. Голанцов, В.В. Молчанов. – М. : Энергоатомиздат, 1990.
2. Рожкова, Л.Д. Электрооборудование станций и подстанций : учеб. для техникумов / Л.Д. Рожкова, В.С. Козулин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1987.
3. Электрическая часть станций и подстанций : Учеб. для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков, Е.Ф. Наяшкова [и др.] : Под ред. А.А. Васильева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990.

УДК 621.3

## ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Чиликин А.Д.

Научный руководитель – Гурьянчик О.А.

Работа трансформатора тока (ТТ) основана на законе электромагнитной индукции.

Главный чувствительный элемент любого оптического трансформатора тока (ОТТ), существенно влияющий на его основные технические и метрологические параметры – оптическое волокно.

Многомодовое ОВ представляет оптический сигнал множеством мод, каждая из которых имеет свою отдельную линейно-ломаную траекторию, а в одномодовом – одной модой вдоль оси волокна.

Конструкция оптического волокна влияет на длину волны передаваемого светового сигнала, определяя его затухание и дисперсию.

Появление асимметрии показателя преломления в ортогональных направлениях вдоль оси волокна из-за неидеальности геометрических размеров его сердцевины и различных механических и иных факторов.

Схема ОТТ содержит чувствительный элемент в виде нескольких витков ОВ, помещенных в жесткую защитную оболочку из немагнитного материала, – токовую головку для ОТТ или измерительную петлю для ОПТ, и электронно-оптический блок, соединяемый с чувствительным элементом непосредственно (для ОПТ) или через оптический кросс (для ОТТ).

Конструкция токовых головок для ОТТ зависит от конструкции высоковольтных шин на объекте учета.

Основные достоинства и преимущества ОТТ/ОПТ по сравнению с их электромагнитными аналогами.

### Литература

1. Гуртовцев, А. Оптические трансформаторы и преобразователи тока. Физические принципы работы, устройство и технические характеристики / А. Гуртовцев // Энергетика и ТЭК. – 2009. – № 3. – С. 15–17.
2. Гуревич В. Оптические трансформаторы тока / В. Гуревич / Электрические сети и системы. – 2010. – № 4. – С. 24–28.

УДК 621.3

## МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

Самохвалов А.С.

Научный руководитель – Гурьянчик О.А.

В системе электроснабжения железной дороги контактная сеть является единственным нерезервируемым элементом, поэтому к ней предъявляются наиболее высокие требования по надежности функционирования.

Проблема изоляции проявляется при электрификации на переменном токе в связи с более высоким уровнем напряжения. Неисправности контактной сети составляет около четверти всех отказов устройств электроснабжения, а основной причиной неисправностей контактной сети является повреждение изоляторов – по ВСЖД в последние годы около одной трети (35 %), иногда доля поврежденных изоляторов в неисправностях контактной сети доходила до половины всех неисправностей.

Основным фактором, определяющим повреждаемость изоляторов контактной сети, являются тяжелые условия их эксплуатации, связанные с частыми механическими ударами и вибрацией. Изоляция контактной сети составлена гирляндами подвесных тарельчатых изоляторов, стержневыми фиксаторными, консольными и опорными изоляторами и секционирующими изоляторами секционных изоляторов. Разрядные напряжения различных элементов контактной сети, весьма высокие в нормальных условиях, могут снижаться до неприемлемо низких значений. Электрическая прочность воздушных промежутков достаточно высока и слабо зависит от атмосферных условий; так, воздушный промежуток провод – стойка опоры имеет электрическую прочность около 4 кВ·ампл/см. Изменения давления и температуры могут изменять эти значения на 15–20 %, а увеличение абсолютной влажности воздуха способно повысить это значение на 6–8 %.

Контактная сеть является нерезервируемым элементом, поэтому к ее изоляции предъявляются повышенные требования по надежности функционирования; вместе с тем основной причиной неисправностей контактной сети является именно повреждения изоляторов – около одной трети всех неисправностей. Основными видами повреждений изоляции контактной сети являются перекрытия изоляторов из-за их загрязнения, пробой изоляторов из-за нарушения изоляционной части, перекрытия изоляторов птицами, механические изломы.

УДК 621.3

## РЕТРОФИТ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Бритиков Е.С.

Научный руководитель – Климкович П.И.

Ретрофит – это модернизация, предусматривающая добавление новой технологии или её свойств к более старой системе. Иными словами, это реконструкция электроустановки, проводимая с целью увеличения ее ресурса, повышения безопасности, надежности, упрощения эксплуатации и техобслуживания и повышения класса защиты.

Однако при выполнении ретрофит имеются и сложности, которые главным образом связаны с необходимостью внедрения нового оборудования в действующую систему электроснабжения, адаптации и привязки новых устройств к существующим. То есть возникает необходимость решения всех тех проблем, которых нет при установке нового распределительного устройства высокой заводской готовности. При этом следует учитывать, что при замене и улучшении существующих элементов должна быть обеспечена конечная цель – качество, чтобы модернизированная система работала «как новая» и все элементы эффективно взаимодействовали между собой.

Автоматический выключатель – контактный коммутационный аппарат, способный включать токи, проводить их и отключать при нормальных условиях в цепи, а также включать, проводить в течение нормированного (заданного) времени и автоматически отключать токи при нормированных ненормальных условиях в цепи, таких как токи короткого замыкания:

Автоматические выключатели бывают одно-, двух-, трёх- или четырёхполюсными и имеют следующие конструктивные узлы: главную контактную систему, дугогасительную систему, привод расцепляющего устройства, расцепитель (расцепители), вспомогательные контакты (необязательно).

В режиме штатной работы через автомат протекает ток, меньший или равный номинальному значению. Питающее напряжение от внешней сети подается на верхнюю клемму, соединенную с неподвижным контактом. С неподвижного контакта ток поступает на замкнутый с ним подвижный контакт, а от него, через гибкий медный проводник – на катушку соленоида. После соленоида ток подается на тепловой расцепитель и уже после него – на нижнюю клемму, с подключенной к ней сетью нагрузки.

В свою очередь проектные организации, не имея чёткого задания, закладывают в проекты типовые решения производителей оборудования, которые, разумеется, не могут учесть специфику и особенности конкретного предприятия, необходимую и достаточную полноту и глубину модернизации, другие особенности. В такой ситуации весьма важно провести перед проектное обследование электрохозяйства и определить ключевые задачи, которые должны быть решены при модернизации. Так как время до следующей модернизации может составлять три десятка лет, есть резон подойти к этому вопросу ответственно.

В случае короткого замыкания принцип работы автоматического выключателя иной. При коротком замыкании ток в цепи резко и многократно возрастает до значений, способных расплавить проводку, а точнее изоляцию электропроводки. Для того чтобы предотвратить такое развитие событий необходимо мгновенно разорвать цепь с помощью электромагнитного расцепителя.

Таким образом, срабатывание электромагнитного расцепителя защищает от возгорания и разрушения электропроводку, замкнувший электроприбор и сам автомат. Время его срабатывания составляет порядка 0,02 секунды, и электропроводка не успевает разогреться до опасных температур.

УДК 621.3

**СОВРЕМЕННЫЕ ВИДЫ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Белов П.С.

Научный руководитель – Терерина Л.В.

Целью данной работы является изучение изоляции трансформаторов и их влияния на работу трансформатора. В работе рассматриваются основные виды изоляции, материал из которого выполняется изоляция и требования, предъявляемые к изоляции.

В трансформаторах, изоляция, которая разделяет части трансформатора выполняется в виде конструкций и деталей из твердых диэлектриков – электроизоляционного картона, кабельной бумаги, лакотканей, дерева, текстолита, бумажно-бакелитовых изделий, фарфора и других материалов. Части изоляционных промежутков, не заполненные твердым диэлектриком, заполняются жидким или газообразным диэлектриком – трансформаторным маслом в масляных трансформаторах, атмосферным воздухом в сухих трансформаторах.

Так как стоимость изоляции составляет значительную часть, то, следовательно, к ней предъявляются требования для обеспечения надежности работы. Изоляция проходит испытания, которые должны обладать необходимым запасом прочности.

Главными задачами при проектировании изоляции трансформатора являются: определение тех воздействий, прежде всего электрических, которым изоляция подвергается в процессе эксплуатации; выбор принципиальной конструкции изоляции и форм изоляционных деталей; выбор изоляционных материалов, заполняющих изоляционные промежутки, размеров изоляционных промежутков. В эксплуатации силовой трансформатор постоянно находится во включенном состоянии, а его изоляция – под длительным воздействием рабочего напряжения, которое она должна выдерживать без каких-либо повреждений неограниченно долгое время. Допустимые продолжительные превышения напряжения должны быть указаны в стандартах на конкретные типы и группы трансформаторов. Согласно требованию ГОСТ силовые трансформаторы должны быть также рассчитаны на работу в определенных условиях при кратковременном напряжении, превышающем номинальное до 15 и 30 %.

Изоляция в трансформаторах определяет срок его службы. Она обеспечивается правильным выбором соответствующих изоляционных промежутков, которые могут выполнять в трансформаторе роль охлаждающих каналов.

Изоляция в трансформаторах должна без повреждений выдерживать электрические, тепловые, механические и другие воздействия, которым она подвергается в процессе эксплуатации.

Трансформатор постоянно находится в процессе эксплуатации во включенном состоянии, и на его изоляцию длительно воздействует электрическое поле, соответствующее номинальному рабочему напряжению. Это воздействие изоляция должна выдерживать неограниченно длительное время.

При работе трансформатора в энергосистеме возможны кратковременные повышения напряжения (перенапряжения), возникающие вследствие нормальных коммутационных процессов в сети (включение и отключение больших мощностей) или процессов аварийного характера, а также импульсные волны перенапряжения, возникающие из-за грозовых атмосферных разрядов.

Обмотки трансформатора и все его токоведущие части при работе нагреваются. Воздействие высоких температур приводит к старению изоляции, вследствие чего она теряет эластичность, становится хрупкой, снижается ее электрическая прочность. В правильно спроектированном трансформаторе и при правильной эксплуатации изоляция может служить 20–25 лет и более. Теплостойкость изоляции, позволяющая обеспечить безаварийную работу трансформатора, достигается применением изоляционных материалов соответствующего класса, а также конструкцией обмоток и деталей изоляции, обеспечивающей их нормальное охлаждение.

В результате контакта изоляции со средой, охлаждающей обмотку (трансформаторным маслом или другим заполнителем), возможны неблагоприятные воздействия на нее, особенно при наличии в изоляции посторонних примесей, в частности влаги. Поэтому одной из важнейших технологических операций обработки изоляции является вакуумная сушка трансформатора после окончания сборки перед заливкой трансформатора маслом, а также защита от увлажнения при эксплуатации.

В современных силовых трансформаторах в качестве главной используется преимущественно маслобарьерная изоляция, а на отдельных участках, например, на отводах, применяется изолирование. Для защиты обмоток от импульсных перенапряжений используют в сочетании с емкостными кольцами переплетенные катушечные обмотки.

Более высокой электрической прочностью по сравнению с маслобарьерной изоляцией обладает бумажно-масляная изоляция. В связи с этим в последние годы интенсивно изучается возможность использования бумажно-масляной изоляции в качестве главной изоляции трансформаторов, что позволило бы уменьшить габариты изоляции и трансформаторов в целом. Последнее обстоятельство имеет особо важное значение для наиболее мощных трансформаторов, габариты которых затрудняют их транспортировку. Основная трудность применения бумажно-масляной изоляции в силовых трансформаторах – охлаждение.

#### Литература

1. Базуткин, В.В. Техника высоких напряжений / В.В. Базуткин. – М. : Медиа, 2012. – 267 с.
2. Изоляция установок высокого напряжения / Под ред. Г.С. Кучинского. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.

УДК 620.9

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОГРАНИЧЕНИЯ УРОВНЕЙ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Бояровский Н.В.

Научный руководитель – к.т.н., профессор Силюк С.М.

Короткими замыканиями (КЗ) называют замыкания между фазами (фазными проводниками электроустановки), замыкания фаз на землю (нулевой провод) в сетях с глухо- и эффективно-заземленными нейтралью, а также витковые замыкания в электрических машинах.

Короткие замыкания возникают при нарушении изоляции электрических цепей. Причины таких нарушений различны: старение и вследствие этого пробой изоляции, набросы на провода линий электропередачи, обрывы проводов с падением на землю, механические повреждения изоляции кабельных линий при земляных работах, удары молнии в линии электропередачи и др.

Короткие замыкания, как правило, сопровождаются увеличением токов в поврежденных фазах до значений, превосходящих в несколько раз номинальные значения.

Протекание токов КЗ приводит к увеличению потерь электроэнергии в проводниках и контактах, что вызывает их повышенный нагрев. Нагрев может ускорить старение и разрушение изоляции, вызывать сваривание и выгорание контактов, потерю механической прочности шин и проводов и т. п. проводники и аппараты должны без повреждений переносить в течение заданного расчетного времени нагрев токами КЗ, т. е. должны быть термически стойкими.

Протекание токов КЗ сопровождается также значительными электродинамическими усилиями между проводниками. Для защиты токоведущих частей и их изоляции то разрушения принимаются необходимые меры.

Рост генераторных мощностей современной энергосистем, создание мощных энергообъединений, увеличение мощностей нагрузок приводят с одной стороны, к росту электрооборуженности и производительности труда, к повышению надежности и устойчивости электроснабжения, а с другой – к существенному повышению токов КЗ.

В настоящее время разработан комплекс мер, который позволяет регулировать уровни токов КЗ, ограничивать их при развитии электроустановок. Однако применение таких средств не является самоцелью и оправданно только после специального технико-экономического обоснования.

Наиболее распространенными и действенными способами ограничения токов КЗ являются: секционирование электрических сетей; установка токоограничивающих реакторов; широкое использование трансформаторов с расщепленными обмотками низшего напряжения.

Первый способ является эффективным средством, которое позволяет уменьшить уровни токов КЗ в реальных электрических сетях в 1,5–2 раза – секционирование электроустановки с целью ограничения токов КЗ.

Секционирование электрической сети обычно влечет за собой увеличение потерь электроэнергии в линиях электропередачи и трансформаторах в нормальном режиме работы, так как распределение потоков мощности при этом может быть неоптимальным. По этой причине решение о секционировании должно приниматься после специального технико-экономического обоснования.

Реакторы служат для ограничения токов КЗ в мощных электроустановках, а также позволяют поддерживать на шинах определенный уровень напряжения при повреждениях за реакторами. Реактор представляет собой индуктивную катушку, не имеющую сердечника из магнитного материала. Благодаря этому он обладает постоянным индуктивным сопротивлением, не зависящим от протекающего тока.

Основная область применения реакторов – электрические сети напряжением 6–10 кВ. Иногда токоограничивающие реакторы используются в установках 35 кВ и выше, а также при напряжении ниже 1000 В.

Наряду с реакторами обычной конструкции в электроустановках находят применение сдвоенные реакторы. Конструктивно они подобны обычным реакторам, но от средней точки обмотки имеется дополнительный вывод. В случае применения сдвоенных реакторов источник может быть присоединен к средней точке, а потребители – к крайним, или наоборот.

Преимуществом сдвоенного реактора является то, что в зависимости от схемы включения и направления токов в обмотках индуктивное сопротивление его может увеличиваться или уменьшаться. Это свойство сдвоенного реактора обычно используется для уменьшения падения напряжения в нормальном режиме и ограничения токов при КЗ.

Особенности сдвоенного реактора определяются наличием магнитной связи между ветвями каждой фазы (взаимной индуктивности).

За счет взаимной индуктивности потеря напряжения в сдвоенном реакторе меньше, чем в случае обычного реактора с таким же индуктивным сопротивлением. Это обстоятельство позволяет эффективно использовать сдвоенный реактор в качестве группового.

Методы ограничения токов короткого замыкания:

1. Установка токоограничивающих электрических реакторов.
  2. Распараллеливание электрических цепей, отключение секционных и шиносоединительных выключателей.
  3. Использование понижающих трансформаторов с расщеплённой обмоткой низкого напряжения.
  4. Отключающее оборудование – быстродействующие коммутационные аппараты с функцией ограничения тока короткого замыкания (плавкие предохранители и автоматические выключатели).
  5. Внедрение устройств релейной защиты.
- Устройства ограничения токов КЗ можно разделить на две группы:
1. Устройства ограничения уровня токов КЗ на сравнительно небольшую степень.
  2. Устройства глубокого ограничения токов КЗ, обладающие высоким быстродействием и большим сопротивлением в режимах КЗ.

#### Литература

1. Рожкова, Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций / Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В. Чиркова. – М. : АКАДЕМА, 2004. – 304 с.
2. Маргулова, Т.Х. Атомные электрические станции / Т.Х. Маргулова. – М. : Высшая школа, 2002. – 178 с.

УДК 621.3

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

Лукашевич Р.В.

Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

При использовании в промышленной электронике разнообразного оборудования его нужно снабжать необходимыми источниками питания, которые должны обеспечивать надёжную безаварийную работу питаемых узлов. Наибольшим спектром потребительских качеств обладают вторичные источники напряжения – преобразователи на основе полупроводниковых приборов. Целью настоящей работы является расчёт источника питания, преобразующего и выпрямляющего входное напряжение до необходимой выходной величины с требуемым коэффициентом пульсаций и величиной выходного тока.

У преобразовательных устройств сейчас 120 различных применений в народном хозяйстве. При этом номенклатура преобразователей (без модификаций) насчитывает более 1000 типов. Основными потребителями преобразовательных устройств (около 80 %) являются электрический транспорт, металлургическая промышленность, энергетика, строительная индустрия, машиностроение, химия и нефтехимия.

По степени управляемости преобразователи электрической энергии подразделяются на неуправляемые и управляемые. В управляемых преобразователях выходные переменные: напряжение, ток, частота – могут регулироваться.

По характеру преобразования электроэнергии силовые преобразователи подразделяются на выпрямители, инверторы, преобразователи частоты, регуляторы напряжения переменного и постоянного тока, преобразователи числа фаз напряжения переменного тока.

В современных автоматизированных электроприводах применяются главным образом полупроводниковые тиристорные и транзисторные преобразователи постоянного и переменного тока.

Достоинствами полупроводниковых преобразователей являются широкие функциональные возможности управления процессом преобразования электроэнергии, высокие быстродействие и КПД, большие сроки службы, удобство и простота обслуживания при эксплуатации, широкие возможности по реализации защит, сигнализации, диагностирования и тестирования как самого электрического привода, так и технологического оборудования.

Преобразователь мощности относится к измерительной технике и может быть использован в счетчиках электрической энергии.

Преобразователи мощности, особенно преобразователи постоянного тока в переменный, хорошо работают при чисто активных нагрузках, но следует соблюдать осторожность при попытке работать с другими типами нагрузок, включая нелинейные активные нагрузки, например, осветительные лампы накаливания. Обычная осветительная лампа накаливания в холодном состоянии имеет сопротивление, составляющее десятую часть от сопротивления в горячем состоянии. В некоторых типах преобразователей такая работа может вызвать избыточный ток в транзисторе и кончиться его выходом из строя.

При работе преобразователя мощности любого типа следует обращать внимание на то, чтобы транзисторы находились в надлежащем электрическом режиме и обеспечивалось соответствующее охлаждение посредством принудительного теплоотвода или конвекции. Температура перехода транзистора не должна превышать для обеспечения надёжной работы преобразователя. Для наблюдения за работой транзистора в схеме следует использовать осциллоскоп постоянного тока с хорошей связью, чтобы измерить напряжение на транзисторе в состоянии включено. Это напряжение (которое должно быть одинаково для обоих транзисторов), умноженное на входной постоянный ток, даёт мощность, рассеиваемую в двух транзисторах генератора. Другим источником нагревания транзисторов может быть избыточный ток в цепи эмиттер-база, обусловленный избыточным возбуждением от обмотки

трансформатора. Так как обмотка шунтируется посредством диода эмиттер-база, ток следует измерять при включении малого сопротивления последовательно с нагрузкой базы. Если появляется избыточный ток, его можно ограничить либо включением больших сопротивлений последовательно с базами, либо включением сопротивления в обратной цепи общей базы. Должны быть также установлены сопротивления для ограничения тока до нормального значения.

Как видите, для того чтобы обеспечить электроприборы качественным источником энергии с минимальным риском для них, необходимо выбирать инвертор с синусоидальной формой напряжения. Можете быть уверены, что подобным образом вы получите максимум комфорта от использования бытовой техники и с минимальным риском для электрооборудования

#### **Литература**

1. Марфенин, Н.Н. Организация проектирования автоматизированных систем контроля и учета энергии / Н.Н. Марфенин. – М. : Промышленная энергетика, 1995. – 125 с.

УДК 621.3

**МЕЖСЕТЕВЫЕ ЭКРАНЫ КАК МЕРА ЗАЩИТЫ ОТ КИБЕРАТАК**

Федосевич Э.А.

Научный руководитель – Сапожникова А.Г.

Одним из самых популярных методов защиты локальной сети от кибератак является использование межсетевого экрана (МСЭ). Межсетевой экран (firewall, брандмауэр) представляет собой программную или программно-аппаратную систему, которая устанавливается на границе охраняемой вычислительной сети и осуществляет фильтрацию сетевого трафика в обе стороны, разрешая или запрещая прохождение определенных пакетов внутрь локальной сети (в периметр безопасности) или из нее в зависимости от выбранной политики безопасности. Однако, только фильтрацией пакетов задачи современных МСЭ не ограничиваются, они выполняют также множество дополнительных действий:

– кэширование информации, когда часть полученной из внешней сети информации временно сохраняется на локальных запоминающих устройствах, что позволяет экономить время и потребляемый трафик при повторном обращении к той же информации;

– трансляция адресов, позволяющая использовать для внешних коммуникаций компьютеров локальной сети только один IP-адрес – адрес самого брандмауэра, внутренние адреса локальной сети могут быть любыми;

– переадресация, позволяющая отправлять пакеты, приходящие на некоторый IP-адрес, на компьютер с другим адресом. Это позволяет, например, распределить нагрузку на Web-сервер.

Существуют два основных типа МСЭ: пакетные фильтры и шлюзы приложений. При этом оба типа могут быть реализованы одновременно в одном брандмауэре. Пакетные фильтры (packet filter) представляют собой сетевые маршрутизаторы, которые принимают решение о том, пропускать или блокировать пакет на основании информации в его заголовке (рисунок 1).

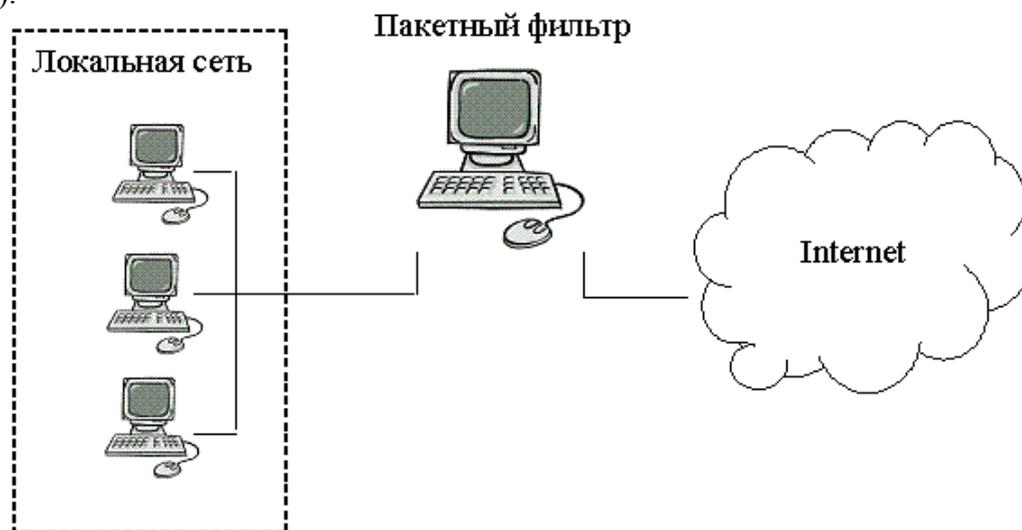


Рисунок 1. Пакетный фильтр на границе локальной сети

Пакетные фильтры работают с информацией в заголовках IP, ICMP, TCP и UDP – пакетов. Правила фильтрации пакетов задаются на основе следующих данных:

- название сетевого интерфейса и направление передачи информации;
- IP-адреса отправителя и получателя;
- протокол более высокого уровня (используется TCP или UDP);
- порт отправителя и получателя для протоколов TCP и UDP;
- опции IP (например, блокировка маршрутизации от источника);
- тип сообщения ICMP.

При определении правил фильтрации необходимо придерживаться одной из двух стратегий политики безопасности:

1. Разрешить весь трафик, не запрещенный правилами фильтрации.
2. Запретить весь трафик, не разрешенный правилами фильтрации.

С точки зрения безопасности более предпочтительной является вторая стратегия, согласно которой задаются правила, разрешающие прохождение пакетов определенного типа, прохождение остальных пакетов запрещается. Это связано с тем, что, во-первых, количество запрещенных пакетов обычно гораздо больше, чем количество разрешенных, а во-вторых, со временем могут появиться новые службы, для которых при использовании первой стратегии необходимо будет дописывать запрещающие правила (если доступ к ним, конечно, нежелателен), в то время как вторая стратегия запретит доступ к ним автоматически.

Пакетные фильтры классифицируются на фильтры без памяти и фильтры с памятью (динамические). Первые из них фильтруют информацию только исходя из информации в заголовке рассматриваемого пакета. Динамические же пакеты учитывают при фильтрации текущее состояние соединений, формируя таблицы входящих и исходящих пакетов, и принимают решение на основании информации в нескольких взаимосвязанных пакетах.

Кроме того, пакетные фильтры могут реализовывать также множество дополнительных возможностей. Например, перенаправление пакетов, дублирование пакетов, подсчет трафика, ограничение полосы пропускания, запись пакетов в файл протокола и многое другое. Настройка пакетного фильтра требует от администратора значительной квалификации и понимания принципов работы всех протоколов стека TCP/IP от протоколов прикладного уровня до протоколов сетевого уровня.

Большинство современных операционных систем имеют встроенные пакетные фильтры, например, `ipfw` в Unix или Internet Connection Firewall в Windows. Функции пакетного фильтра могут выполнять и аппаратные маршрутизаторы, например, CISCO PIX 515E.

Главным недостатком пакетных фильтров является невозможность осуществления фильтрации пакетов по содержимому информационной части пакетов, то есть по данным, относящимся к пакетам более высокого уровня. Этот недостаток может быть устранен путем использования шлюзов приложений (*application gateway*, *proxy-server*). Proxy-серверы работают на прикладном уровне, обеспечивая работу той или иной сетевой службы. При этом в отличие от пакетных фильтров, которые лишь перенаправляют пакет из одной сети в другую, прокси-серверы принимают запрос от клиента и направляют его во внешнюю сеть от своего имени, разрывая таким образом нормальный сетевой трафик (рисунок 2). Поэтому брандмауэр в виде шлюза приложений может быть реализован на компьютере всего с одним сетевым интерфейсом.

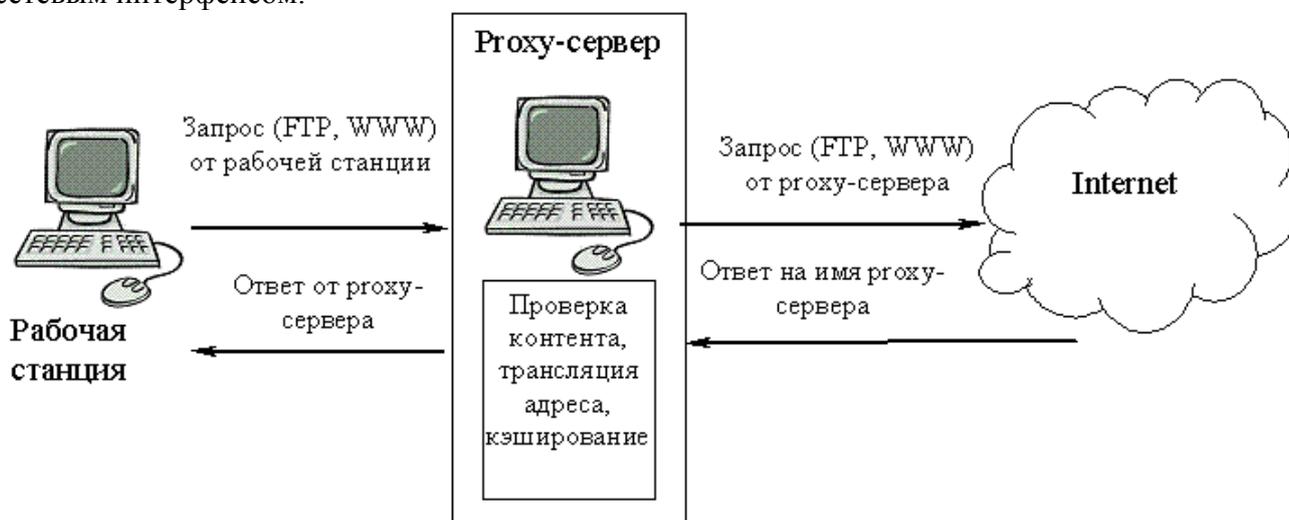


Рисунок 2. Выполнение запроса через прокси-сервер

Поясним схему на рисунке 2. Клиент формирует запрос на сервер какой-либо службы в Internet (например, запрос на внешний Web-сервер). Запрос поступает на проху-сервер (конфигурация брандмауэра должна быть такова, чтобы все запросы к какой-либо службе в Internet обязательно поступали на соответствующий проху-сервер). Приняв запрос от клиента, проху-сервер проверяет его по заданным правилам фильтрации содержимого пакета и, если запрос не содержит запрещенных параметров, формирует пакет с запросом уже от своего имени (со своим обратным адресом) внешнему серверу. Ответ от внешнего сервера поступает, очевидно, на имя проху-сервера. Пройдя проверку, аналогичную запросу, ответ может быть принят либо отвергнут. Если ответ принят – ответ направляется на адрес клиента, первоначально сформировавшего запрос.

Фильтрация содержимого может осуществляться по множеству параметров:

- IP-адрес отправителя и получателя;
- запрашиваемый URL;
- наличие вложений (приложения Java, компоненты ActiveX) и т. п.
- время запроса и другие, в зависимости от используемого проху-сервера.

Важной функцией современных проху-серверов является трансляция сетевых адресов (Network Address Translation, NAT), которая подразумевает замену адреса клиента в запросе во внешнюю сеть на собственный адрес (или несколько адресов) проху-сервера. Это позволяет скрыть от посторонних структуру внутренней сети, список используемых в ней адресов. С другой стороны, это позволяет иметь на всю локальную сеть лишь один легальный IP-адрес, который должен быть присвоен проху-серверу. Рабочие станции внутри сети могут иметь любые IP-адреса, в том числе и те, которые запрещено использовать во внешней сети. NAT может быть организована по статической и динамической схеме. При статической трансляции адрес клиента в локальной сети привязывается к конкретному адресу, который транслируется во внешнюю сеть. Динамическая трансляция предполагает наличие диапазона доступных внешних адресов и при каждом запросе клиента проху-сервер выделяет один из свободных адресов для представления клиента во внешней сети, по окончании транзакции этот адрес возвращается в список свободных и может быть использован в дальнейшем для передачи запроса другого клиента. Развитием идеи NAT стала трансляция адресов портов (Network Address Port Translation, NAPT), когда один и тот же IP-адрес распределяется при трансляции на несколько пользователей и каждому пользователю сопоставляется в отправляемом во внешнюю сеть пакете уникальная комбинация IP-адреса и номера порта отправителя. Иными словами, различным пользователям сети проху-сервер сопоставляет один и тот же IP-адрес, но присваивает различные номера портов в исходящих запросах. Это стало возможным за счет того, что порт отправителя зачастую не несет в запросе никакой полезной информации и может быть использован для уникальной идентификации клиента локальной сети для проху-сервера.

Современные проху-серверы выполняют обычно еще одну важную функцию – кэширование информации. Информация, пришедшая на проху-сервер, сохраняется на локальных запоминающих устройствах, и при очередном запросе клиента запрашиваемая им информация сначала ищется в локальной памяти, и только если ее там нет – запрос передается во внешнюю сеть. Это позволяет уменьшить объем трафика, потребляемого из внешней сети, а также уменьшить время доступа к информации для конечного клиента.

Рассмотрим свойства наиболее распространенных проху-серверов.

Microsoft Proxy Server (версия 2.0) представляет собой брандмауэр с расширяемым набором функций и сервер кэширования информации, обеспечивает поддержку протоколов HTTP и gopher, а также поддержку клиентских приложений (например, Telnet и RealAudio) для компьютеров интрасети, использующих протоколы TCP/IP или IPX/SPX, поддерживает VPN, выполняет функции фильтра пакетов. Работает в среде Windows.

Squid – высокопроизводительный кэширующий проху-сервер для web-клиентов с поддержкой протоколов FTP, gopher и HTTP, имеющий реализации как под Unix, так и под Windows – платформы. Squid хранит метаданные и особенно часто запрашиваемые объекты в

ОЗУ, кэширует DNS-запросы, поддерживает неблокирующие DNS-запросы и реализует негативное кэширование неудачных запросов. Поддерживает протокол ICP (Internet Casing Protocol), позволяющий организовывать нескольким серверам иерархические структуры кэширования.

Помимо перечисленных, на практике могут быть использованы так называемые персональные межсетевые экраны. Они устанавливаются на компьютер пользователя, и все правила безопасности задаются для обмена этого компьютера с внешней сетью. Это позволяет настроить политику безопасности персонально под каждого пользователя непосредственно на его рабочей станции. Примером подобного МСЭ является брандмауэр AtGuard, который включает в себя функции проху-сервера и локального пакетного фильтра. AtGuard способен блокировать баннеры, файлы cookie, Java-скрипты и апплеты, а также элементы ActiveX. Еще одна особенность AtGuard – способность работать в режиме обучения, когда при каждой попытке подключиться к какому-либо порту запрашивается разрешение на установку соединения, и сделанный пользователем выбор становится правилом для дальнейшей работы программы.

#### Литература

1. Лапони́на, О.Р. Межсетевые экраны / О.Р. Лапони́на. – М. : ИНТУИТ, 2016. – 466 с.
2. Лебедь, С.В. Межсетевое экранирование. Теория и практика защиты внешнего периметра / С.В. Лебедь. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 306 с.
3. Фаронов, А.Е. Основы информационной безопасности при работе на компьютере / А.Е. Фаронов. – М. : ИНУИТ, 2016. – 155 с.

УДК 621.3

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ВЫВОДАХ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В СИСТЕМЕ ИМИТАЦИОННОГО БЛОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ SIMULINK

Дударев А.В., Русецкий К.И.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.

Программа Simulink является приложением к пакету MatLab. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым, пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования, пользователю не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний, требующихся при работе на компьютере и, естественно, знаний той предметной области в которой он работает.

Simulink является достаточно самостоятельным инструментом MatLab. В нем имеются библиотеки блоков для разных областей применения (например, Power System Blockset - моделирование электротехнических устройств, Digital Signal Processing Blockset – набор блоков для разработки цифровых устройств и т. д.).

При моделировании можно выбирать метод решения дифференциальных уравнений, а также способ изменения модельного времени (с фиксированным или переменным шагом). В ходе моделирования имеется возможность следить за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные устройства наблюдения, входящие в состав библиотеки Simulink. Результаты моделирования могут быть представлены в виде графиков или таблиц.

В ходе выполнения работы составлена (рисунок 1) структурная модель сети, состоящей из синхронного генератора, трансформатора и системы.

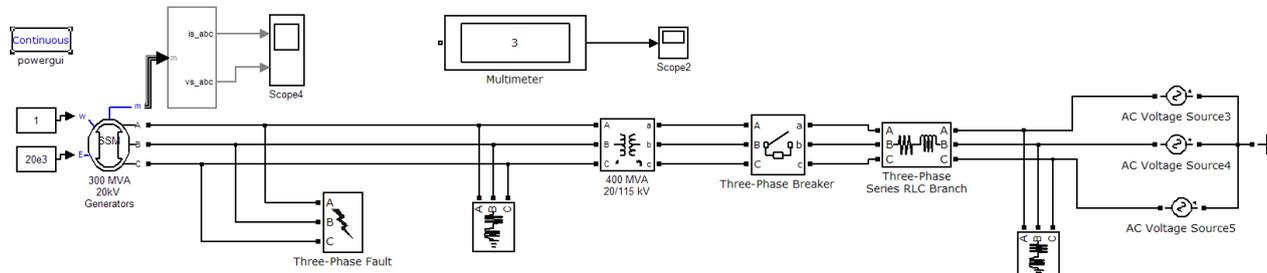


Рисунок 1. Структурная модель генератор-трансформатор-питающая система

Был составлен сценарий последовательного во времени воспроизведения программой установившегося нормального режима, предшествующего короткому замыканию, режима короткого замыкания – двухфазного или развивающегося трехфазного, режима отключения КЗ, послеаварийного режима. Результаты моделирования выводятся на экран монитора. На рисунках 2 и 3 представлены результаты расчета в среде MatLab.

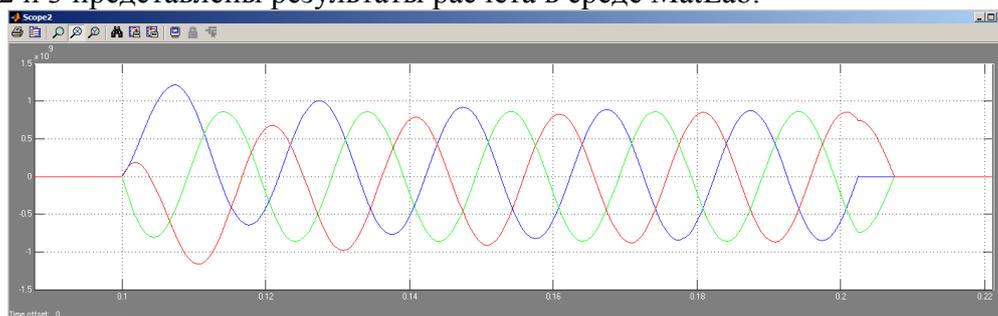


Рисунок 2. Результаты расчета в среде MatLab

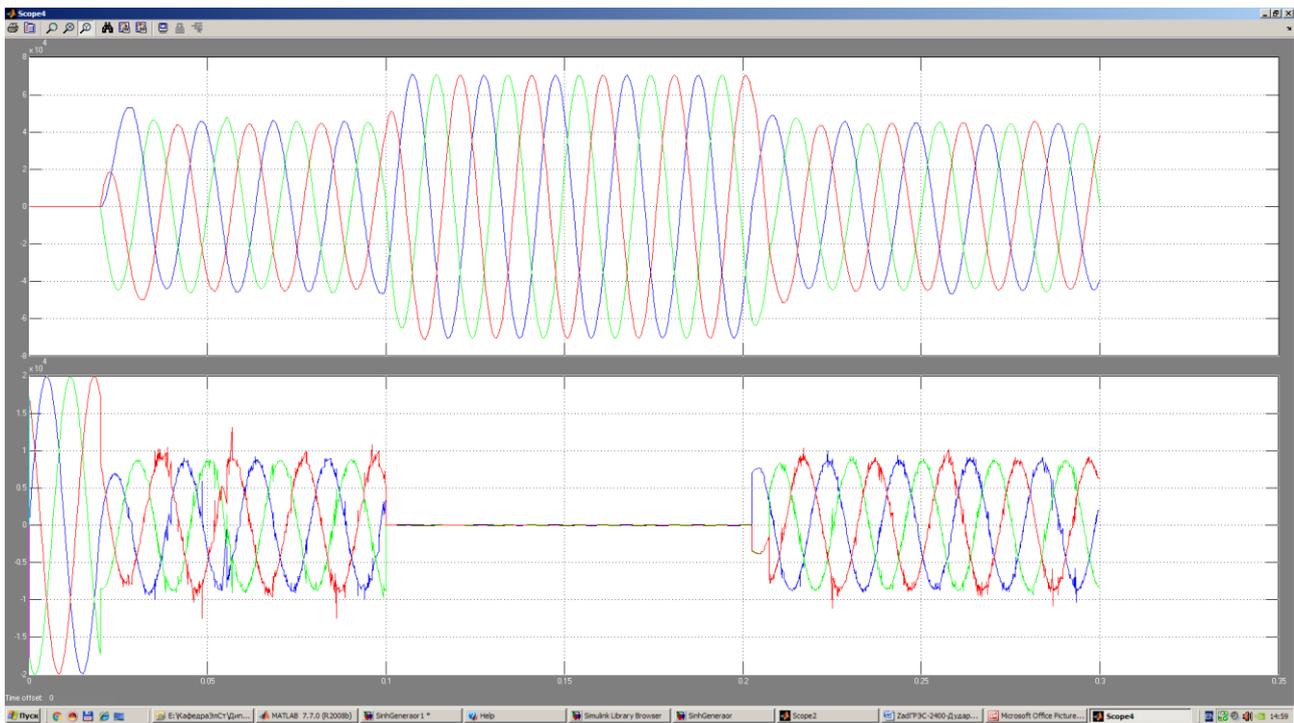


Рисунок 3. Результаты расчета в среде MatLab

Преимущество Simulink заключается также в том, что он позволяет пополнять библиотеки блоков с помощью подпрограмм написанных как на языке MatLab, так и на языках C++, Fortran и Ada.

#### Литература

1. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

УДК 621.3

## ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ САРИ РЕТОМ

Райчук В.О.

Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

Надежность работы устройств релейной защиты и автоматики во многом определяется качеством проверки их характеристик в условиях эксплуатации. Такие проверки должны проводиться регулярно, однако, учитывая наличие большого числа релейных устройств и устройств автоматики в энергосистемах, это требует значительных временных затрат и высокой квалификации персонала.

В настоящее время благодаря применению новых современных технологий и компьютерной техники были разработаны специальные испытательные системы «реле-томограф» для проверки устройств релейной защиты и автоматики. Некоторые из них представлены в лаборатории релейной защиты и автоматики кафедры электроэнергетических сетей и систем ЭНИН:

РЕТОМ-11М – испытательный прибор для проверки простых реле (тока, напряжения, времени, указательных, промежуточных) и другого оборудования в схемах электроснабжения. Не требует наличия ПК.

РЕТОМ-41М – компьютерный испытательный комплекс для проверки сложных устройств релейной защиты и автоматики. Использует операционную систему MS DOS.

РЕТОМ-51 – компьютерный испытательный комплекс для проверки сложных устройств релейной защиты и автоматики. Использует операционную систему Windows.

Наиболее современными моделями реле-томографов на сегодняшний день является РЕТОМ-21 и РЕТОМ-61.

Релейная защита осуществляет автоматическую ликвидацию повреждений и ненормальных режимов в электрической части энергосистем и является важнейшей автоматикой, обеспечивающей их надежную и устойчивую работу.

В современных энергетических системах значение релейной защиты особенно возрастает в связи с бурным ростом мощности энергосистем, объединением их в единые электрически связанные системы в пределах нескольких областей, всей страны, и даже нескольких государств.

Характерным для современных энергосистем является развитие сетей высокого и сверхвысокого напряжения, с помощью которых производится объединение энергетических систем и передача больших потоков электрической энергии от мощных электростанций к крупным центрам потребления.

Рост нагрузок, увеличение протяженности линий электропередачи, ужесточение требований к устойчивости энергосистем осложняют условия работы релейной защиты и повышают требования к ее быстродействию, чувствительности и надежности. В связи с этим идет непрерывный процесс развития и совершенствования техники релейной защиты, направленный на создание все более совершенных защит, отвечающих требованиям современной энергетики.

УДК 621.3

## ДИАГНОСТИКА ИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ СПЕКТРОСКОПИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Короткевич В.Б.

Научный руководитель – Гурьянчик О.А.

Наличие дополнительной информации о состоянии изоляции дает возможность более точно представить процессы, происходящие в изоляционной конструкции, и позволяет, с одной стороны, исключить эксплуатацию оборудования, находящегося в критическом состоянии, а с другой – избежать неоправданных затрат на ремонт вполне работоспособного оборудования.

Результаты измерений характеристик изоляции могут быть представлены в виде графиков, удобных для анализа и сопоставления с уже существующими результатами измерений на аналогичных объектах.

Сравнивая же полученные результаты с результатами предыдущих измерений можно четко проследить тенденцию ухудшения или улучшения изоляционных свойств материалов, обеспечивающих электрическую прочность оборудования.

Увлажнение и связанные с ним тепловой пробой или перекрытие по поверхности наблюдаются у негерметизированных конструкций.

Развитие дефектов определяется рядом взаимно зависимых процессов ухудшения изоляции.

Следует заметить, что увеличенное значение  $\operatorname{tg}\delta$  масла не всегда свидетельствует об опасности такого процесса.

В качестве диагностического следует также использовать обобщенный параметр - комплексную проводимость изоляции.

В настоящее время за рубежом большое внимание уделяется методам определения степени увлажнения и старения бумажной изоляции на основании результатов спектроскопии электрических параметров, характеризующих явление поляризации в диэлектриках.

Анализ этих спектров выявил существенное влияние удельной проводимости, содержания влаги и уровня старения масла и бумаги на значения токов зарядки и разрядки.

Непосредственное измерение комплексной относительной диэлектрической проницаемости затруднительно, поэтому обычно измеряются значения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь (отношение действительной и мнимой частей комплексной емкости), при напряжении от 5 до 200 В и в частотном диапазоне между 1 МГц и 1 кГц.

Диэлектрическая спектроскопия считается одним из перспективных методов диагностики силовых трансформаторов, так как позволяет выявлять и локализовать дефекты в изоляционной конструкции, а в будущем проводить отдельное определение увлажненности и старения бумажной изоляции.

Рассеяние энергии в диэлектрике при воздействии на него переменного напряжения т. е. диэлектрические потери, обусловлено двумя процессами: проводимости и поляризации, развивающимся с задержкой во времени.

Измерение диэлектрических параметров изоляции электроэнергетического оборудования (силовые и измерительные трансформаторы, вводы, конденсаторы связи, силовые кабельные линии и др.) осуществляется высоковольтным мостом переменного тока типа Р-5026.

УДК 621.3

## ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ GPS-ТЕХНОЛОГИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Баран Ю.Г., Войтович А.В.

Научный руководитель – Романович С.М.

Развитие и совершенствование системы отраслевого, хозяйственного управления порождает проблему сбора и обработки большого количества информации, которая становится практически неразрешимой при использовании старых технологий (бумажные носители и пр.). Однако, не только объем информации, но и ее содержание, и вид, и оперативность доступа к ней явились основной причиной появления программных и аппаратных средств, которые получили название геоинформационные системы (ГИС).

Любая ГИС, а тем более ГИС-энергетический кадастр, подразумевает наличие основы – картографического материала той территории, к которой «привязана» информация, хранящаяся в базе данных этой ГИС. Как правило, подобной основой служит цифровая карта. Способ связи информации и цифровой карты в каждой ГИС решается по-разному, но наличие основы – общая черта всех ГИС.

Существует несколько способов получения цифровых карт:

- дигитализация имеющихся картографических планшетов, карт на бумажных носителях (выполняется с помощью дигитайзера);
- векторизация растрового изображения территории, полученной путем сканирования аэрофотоснимка или готовой карты (выполняется с помощью сканера и программного обеспечения для векторизации);
- векторизация цифрового изображения местности, полученного с помощью цифровых аэрокамер;
- сканирование земной поверхности лазерным дальномером с борта летающей лаборатории.

Пока наиболее распространенным является первый способ, благодаря сравнительно небольшим затратам на программно-аппаратное обеспечение. Но в последнее время, в связи с усовершенствованием сканерной технологии, удешевлением сканеров, второй способ приобретает все большую популярность. Третий способ пока экзотичен в наших условиях, вследствие затрат на аппаратное обеспечение. Четвертый – не дорогой и, пожалуй, самый перспективный.

Но главным условием информационной системы ГИС-энергетический кадастр для управления, является не только создание цифровых карт, но и постоянное их обновление в соответствии с происходящими изменениями.

Основным источником информации об изменениях картографической ситуации служили результаты топографических съемок и аэрофотосъемок.

Первый метод слишком трудоемок для больших, труднодоступных территорий, требует больших затрат времени и средств. Кроме того, информация, полученная из результатов топосъемок, может устареть на этапе обработки данных полевых измерений, вследствие быстрых изменений ситуации.

Второй метод более оперативен и информативен, но слишком дорог. Поэтому, для оптимального решения проблемы постоянного обновления пространственной информации требуется иной подход к ее сбору и представлению в цифровом виде.

Наиболее перспективным решением этой проблемы является применение GPS-технологий при сборе информации, что позволит собирать не только пространственную (картографическую) информацию в цифровом виде, но и связанные с ней семантические данные. Метод сбора данных с помощью GPS-приемников принципиально не отличается от полевых геодезических работ традиционным методом (теодолит, светодальномер или тахеометр), но имеет ряд несомненных преимуществ, вытекающих из особенностей и технических возможностей GPS-технологии.

Помимо задач сбора и обновления информации GPS-технологии решают и еще одну важную проблему энергетического кадастра – создание жесткой координатной основы цифровой подложки. Как известно, любой объект цифровой карты имеет вполне определенные координаты, «привязанные» к жесткой координатной основе. Как правило, исходной координатной основой являются пункты ГГС (государственной геодезической сети). Но в ходе создания карт, обработки материалов аэрофотосъемки, оцифровки имеющихся карт, возникает задача уточнения исходной координатной основы или трансформации в другую. Эти проблемы решались ранее и решаются теперь развитием и сгущением геодезических сетей на основе более высокочасных. Но развитие геодезических сетей с применением традиционных приборов и методов слишком долгий, дорогой процесс, особенно там, где внешние условия препятствуют проведению традиционных геодезических работ. Применение GPS-технологий может существенно снизить затраты на проведение комплекса работ по созданию координатной основы энергетического кадастра, а главное повысить точность и надежность геодезической сети.

Это две основные задачи, которые можно и нужно решать с помощью GPS технологий применительно к энергетическому кадастру.

УДК 621.3

## ПРОФИЛАКТИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Давыденко А.Г.

Научный руководитель – Климкович П.И.

В работе рассмотрены основные сведения о техническом обслуживании и ремонте электротехнического оборудования. Описаны способы выявления неисправностей и методы диагностики электротехнического оборудования.

Повышению надежности работы электрооборудования в процессе эксплуатации в значительной степени способствует правильная организация и своевременное проведение технического обслуживания в полном объеме. Основной задачей технического обслуживания является поддержание электрооборудования в работоспособном состоянии. Работы по техническому обслуживанию проводят на месте установки электрооборудования.

Техническое обслуживание электрооборудования подразделяют на производственное и плановое. Производственное техническое обслуживание включает в себя эксплуатационное обслуживание, которое проводится персоналом, обслуживающим электрифицированные рабочие машины и механизмы (очистка и осмотр до начала и после окончания работы, управление, контроль за работой), и дежурное обслуживание, выполняемое дежурными электромонтерами (производство отключений и переключений, устранение мелких неисправностей, проведение необходимых регулировок). При плановом техническом обслуживании электрооборудование очищают, проверяют, регулируют, смазывают и при необходимости заменяют недолговечные, легкоъемные детали (щетки, пружины и др.).

Отказы электрооборудования зачастую объясняются простейшими причинами, такими как коррозия контактов разъемов, выход из строя предохранителя, перегорание плавкой вставки или повреждение реле.

В разные периоды развития техники, организация системы технического обслуживания строилась с учетом специфических особенностей эксплуатируемого оборудования, но всегда стояла проблема повышения эффективности использования средств, выделяемых на техническое обслуживание и ремонты (ТОиР).

Принципиально, можно выделить три основных варианта системы ТОиР:

– консервативный – при котором весь объем работ по ТОиР выполняется собственным персоналом эксплуатирующей организации и в строгом соответствии с установленным регламентом и актуальной дефектной ведомостью;

– прогрессивный – при котором весь объем работ по ТОиР выполняется персоналом специализированной подрядной организации в соответствии с установленным регламентом и актуальной дефектной ведомостью;

– интеллектуальный – при котором объем работ по ТОиР определяется актуальной дефектной ведомостью, составленной по результатам предсервисного мониторинга и распределяется между эксплуатирующей организацией и специализированным подрядчиком исходя из имеющихся в наличии средств.

Проведение технического обслуживания позволяет своевременно обнаруживать и устранять неисправности, возникающие в процессе эксплуатации электрооборудования, или причины, которые могут вызвать неисправности. Таким образом, в своей основе техническое обслуживание является профилактическим мероприятием, направленным на обеспечение работоспособности электрооборудования и предупреждение возникновения и развития неисправностей. При обнаружении во время проведения технического обслуживания неисправностей, устранение которых требует разборки электрооборудования или применения специального оборудования, решается вопрос о необходимости проведения ремонта (текущего или капитального).

УДК 621.3

## ИНДИКАТОРЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ

Полонский И.П.

Научный руководитель – Климкович П.И.

Линии электропередач высокого напряжения – довольно часто повреждаемые элементы электроэнергетической системы. Выход из работы линии всегда сопровождается или недоотпуском электроэнергии, или снижением надежности, себестоимости и качества электроснабжения. Поэтому одной из важнейших задач линейных ремонтных служб предприятий электросетей является быстрейший поиск места повреждения и организация ремонтно-восстановительных работ. До появления в энергосистемах приборов определения места повреждения (начало 60-х годов) поиск повреждения совершался путем обходов, объездов, иногда облетов на вертолете трассы линии. На это тратилось значительное время, поскольку линии имеют большую протяженность (до сотен километров), а трасса часто идет по труднопроходимой местности. К тому же место повреждения иногда плохо различимо даже с близкого расстояния – на гирлянде изоляторов после перекрытия часто не остается значительных следов обгорания.

Еще сложнее обстоит дело с поиском места самоустраняющегося повреждения, при котором после АПВ линия остается в работе. Между тем ремонтным службам весьма полезна информация о таких повреждениях, поскольку обычно после них часть изоляторов в гирлянде оказывается пробитыми и на линии остается ослабленное место, которое в будущем способно привести к возникновению аварии. Известен случай, когда сверхответственная линия отключалась три раза с промежутком в несколько недель, пока не было найдено дерево с обгоревшими ветвями, которые при сильном ветре сближались с проводом. Поэтому необходимо искать место не только устойчивого, но и самоустраняющегося повреждения.

Сказанное предопределило широкое внедрение в электроэнергетику методов и средств определения места повреждения (ОМП) на линии. Однако обычно они сводятся к определению места короткого замыкания (ОМКЗ) разрывы проводов без замыкания бывают редко и определить их место по соотношению каких-либо электрических величин довольно сложно. Внедрение приборов определения места повреждения началось в нашей стране в 60-х годах и в настоящее время большинство линий напряжением 110 кВ и выше оснащено такими приборами. Идет внедрение приборов и на напряжениях 6–35 кВ, хотя и значительно более медленными темпами.

Электрические воздушные линии (ВЛЭП) предназначены для передачи и распределения электрической энергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и прикрепленным к различным опорным конструкциям. Воздушные линии электропередачи могут быть с напряжением до 1 кВ включительно и выше 1 кВ (3, 6, 10 кВ и выше по шкале стандартных напряжений).

Воздушные линии состоят из следующих основных конструктивных элементов: опор различного типа для подвески проводов и грозозащитных тросов; проводов различных конструкций и сечений для передачи по ним электрического тока; грозозащитных тросов для защиты линий от грозовых разрядов; изоляторов, собранных в гирлянды, для изоляции проводов от заземленных частей опоры; линейной арматуры для крепления проводов и тросов к изоляторам и опорам, а также для соединения проводов и тросов; заземляющих устройств для отвода токов грозовых разрядов или короткого замыкания в землю.

УДК 621.3.022

## УСТАНОВКИ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Волов Р.А.

Научный руководитель – Климкович П.И.

Частичный разряд – это искровой разряд очень маленькой мощности, который образуется внутри высоковольтной изоляции, или на ее поверхности. Они возникают в зоне дефекта изоляции. Наибольшую опасность для оборудования представляют не сами разряды, а результат их воздействия на изоляцию. Частичные разряды возникают в изоляции оборудования среднего и высокого классов напряжения. Обычно считается, что измерение частичных разрядов можно проводить при рабочем напряжении от 4 кВ.

Качественная и количественная оценка состояния изоляции обмоток статора на основании измерения и анализа частичных разрядов

Количественная оценка состояния оборудования по контролируемым параметрам может быть выполнена только сравнительным методом, при этом текущее, измеренное значение сравнивается с каким-либо другим значением, являющимся опорным. Для традиционных методов диагностики количественное сравнение производится с пороговыми значениями, которые интегрально соответствуют изменению категорий качества оборудования. Количественные значения этих порогов являются нормированными, справедливыми для большинства типов и марок оборудования.

Основное различие между качественной и количественной оценкой состояния оборудования, применительно к методу контроля частичных разрядов, заключается в том, какие разряды используются в каждом анализе, и определяется степень их опасности для дальнейшей эксплуатации контролируемого оборудования. Эти параметры тесно связаны между собой. При проведении количественной оценки интенсивности частичных разрядов в изоляции учитываются все зарегистрированные разряды.

Конфигурация измерительного прибора (переносного, или системы мониторинга), ориентированная на отстройку от максимального количества помех уже «на аппаратном уровне».

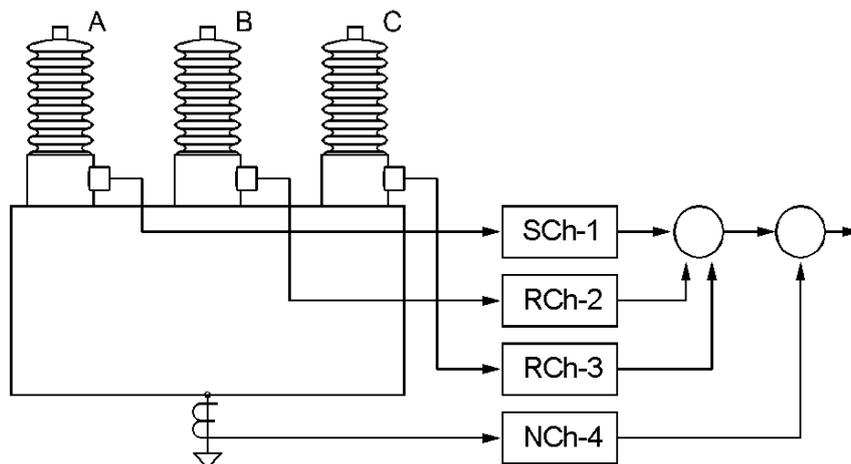


Рисунок 1. Конфигурация измерительного прибора

В приведенной на рисунке конфигурации схемы измерения частичных разрядов задействованы 4 канала прибора системы мониторинга, имеющих различное методическое назначение. Измерительный канал «SCh-1» предназначен для регистрации импульсов частичных разрядов в изоляции фазы трансформатора, это основной канал в регистрации. Референсные (опорные) измерительные каналы «RCh-2» и «RCh-3» предназначены для сравнения параметров импульсов в основном измерительном канале с импульсами от датчиков, установленных в двух других фазах одноименной обмотки трансформатора. Шумовой канал «NCh-4» позволяет проводить амплитудное сравнение импульсов,

регистрируемых со всех других первичных датчиков, подключенных не к ПИН вводов первичной обмотки трансформатора.

Оборудование:

Переносной многоканальный прибор марки R2200 предназначен для регистрации и анализа распределения частичных разрядов в изоляции различного высоковольтного оборудования – трансформаторов, кабельных линиях, электрических машинах и т. д. Уникальной отличительной особенностью прибора R2200, отсутствующей в приборах производства других фирм, является наличие встроенной экспертной системы «PD-Expert».

Измеритель частичных разрядов ИЧРц с функцией помехоподавления имеет до 6 измерительных каналов. Выполняет сбор и хранение измеренных статистических данных по всем шести каналам и отображает их на экране. В ИЧРц применяется операционная система Windows, в которой можно выбрать различные формы отображения сигнала: эллипс, прямолинейная, синусоидальная; методы двухмерного и трехмерного графического анализа.

Система мониторинга ADM-9 (Acoustic Diagnostic Monitor) предназначена для оперативного контроля технического состояния и поиска дефектов изоляции высоковольтного оборудования под рабочим напряжением. В системе ADM-9 диагностика осуществляется на основе метода регистрации и анализа частичных разрядов, который имеет максимально высокую чувствительность при поиске дефектов в изоляции любого типа. Акустические датчики системы ADM-9 устанавливаются непосредственно на поверхности контролируемого оборудования, максимально близко к контролируемой зоне изоляции. Обычно, это заземленные или изолированные поверхности, корпуса оборудования, на которых отсутствует высокий потенциал.

Прибор для регистрации и анализа частичных разрядов PD-Analyzer HF/UHF/3P предназначен для измерения и анализа частичных разрядов в изоляции высоковольтных трансформаторов, кабельных линий, КРУЭ, электрических машин является эффективным способом поиска дефектов и общей оценки технического состояния.

Прибор PD-Analyzer HF/UHF/3P предназначен:

– для регистрации частичных разрядов в высоковольтной изоляции при высоком уровне высокочастотных помех;

– для оперативного выявления дефектов в изоляции различного высоковольтного оборудования, оценки их опасности.

Частичные разряды возникают в изоляции оборудования среднего и высокого классов напряжения. Эти разряды приводят к разрушению изоляции (ее старению) и несвоевременному выходу ее из строя. Поэтому нужно применять установки для анализа частичных разрядов для их контролирования. В данной работе было рассмотрено часть того оборудования, которое на данный момент предлагается на рынке и используется на производстве.

### Литература

1. Веникова, В.А. Электрические системы / В.А. Веникова. – М. : Высш. школа, 1971. – 215 с.
2. Холодный, С.Д. Методы испытания и диагностики кабелей и проводов / С.Д. Холодный. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 200 с.
3. Кучинский, Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях / Г.С. Кучинский. – Л. : Энергия, 1979. – 224 с.
4. Казарновский, Д.М. Испытание электроизоляционных материалов и изделий / Д.М. Казарновский. – Л. : Энергия, 1980. – 216 с.
5. Электронприбор [Электронный ресурс] / Компания «Электронприбор». – М., 2018. – Режим доступа : <http://www.electronpribor.ru>. – Дата доступа : 23.04.2018.

УДК 621.3

## ПОВЕРОЧНЫЕ УСТАНОВКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Вакульчик Е.В.

Научный руководитель – Баран А.Г.

Поверочная установка – устройство для проведения испытаний, проверки и настройки всех типов радиоэлектронной аппаратуры и различных средств релейной защиты.

Переносная поверочная установка разработана для осуществления проверки и отладки простых и сложных систем релейных защит и элементов автоматики (реле, контактов, пускателей и т. п.) на месте их функционирования (на электростанциях или промышленных объектах) или в условиях лабораторий.

### **Виды переносных поверочных установок и приборов.**

Классификация поверочных устройств.

– Переносной трехфазный прибор. Предназначен для поверки электрических счетчиков на объектах. Может работать в лаборатории.

– Многофункциональное устройство для энергетической промышленности. Имеет обширную сферу применения и небольшие габариты.

– Эталонный выносной электроизмерительный прибор. Полученные данные выводятся на монитор ПК. Работает в автономном режиме или в совокупности с аналогичными устройствами поверки.

### **Автоматизированные поверочные установки для поверки расходомеров.**

Что же представляет собой современная автоматизированная установка?

Автоматизированная поверочная установка для поверки расходомеров-счетчиков жидкости в общем случае представляет собой достаточно сложное техническое устройство, обеспечивающее воспроизведение потока жидкости с расходом от 10–20 до 600000 литров в час (0,01–600 м<sup>3</sup>/ч) и измерение объема (массы) эталонными расходомерами или весовым устройством с необходимой для поверки точностью.

В общем случае в состав установки входят:

- устройство подачи воды
- система хранения и подготовки воды
- трубная обвязка

### **КПУ-1 установка поверочная кондуктометрическая.**

Кондуктометрическая поверочная установка КПУ-1 предназначается для поверок промышленных солемеров и кондуктометров, и автоматического нахождения приведенной и относительной погрешности измерения удельной электрической проводимости приведенной к установленной температуре у поверяемых устройств.

### **Установка для поверки амперметров и вольтметров У300.**

Установка для поверки и градуировки электроизмерительных приборов У300 предназначена для поверки амперметров и вольтметров постоянного и переменного токов всех систем методом сличения с показаниями образцовых приборов классов точности 0,2 и менее точных. Установка У300 представляет собой многопредельный источник питания, в котором стабильность выходного напряжения и тока обеспечивается феррорезонансным стабилизатором, а чистота формы кривой напряжения переменного тока – двухступенчатой фильтрацией стабилизированного напряжения.

Поверочные установки необходимы в настоящее время, поскольку любая выпускаемая продукция должна проходить периодическую поверку во избежание поломок и несчастных случаев на производстве, тем более в сфере энергетики, которая является сферой повышенной опасности.

### **Литература**

1. Каргапольцев, В.П. Автоматизированные поверочные установки: какими они должны быть / Косолапов, А.В. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_](http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_)

shablon.php?id=445. – Дата доступа : 29.04.2018.

2. КПУ-1 установка поверочная кондуктометрическая [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.vodoanaliz.ru/КПУ-1-ustanovka-poverochnaia-kondyktometrisheskaia.html>. – Дата доступа : 29.04.2018.

3. Переносные поверочные установки и приборы [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://www.meters.taipit.ru/catalog/mo/portativnue\\_ustanovki\\_i\\_pribory/](https://www.meters.taipit.ru/catalog/mo/portativnue_ustanovki_i_pribory/). – Дата доступа : 29.04.2018.

4. Установка для проверки амперметров и вольтметров У300 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.pribori.net.ua/y300.html>. – Дата доступа : 29.04.2018.

5. Установки поверочные [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL : <https://www.ksrv.ru/e-store/411/>. – Дата доступа : 29.04.2018.

УДК 621.3

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ВОССТАНОВЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Телущенко А.А.

Научный руководитель – Климович П.И.

Новый подход к оценке состояния бумажной электрической изоляции по результатам измерений восстановленного напряжения. Измерение восстановленного (возвратного) напряжения (ВН) в изоляции кабелей и электротехническом оборудовании все чаще используют как метод контроля их технического состояния, в том числе, кабелей с пропитанной бумажной изоляцией (ПБИ) и маслонаполненных трансформаторов. Это обусловлено возможностью проводить контроль непосредственно в эксплуатации не нарушая при этом существующие электрические соединения и не разрушая изоляцию.

Методы измерения и обработки кривой восстановленного напряжения. Общепринятыми параметрами описания кривой ВН являются ее максимум  $U_{tm}$ , время достижения максимума  $t_{tm}$ , начальная крутизна переднего фронта. Для оценки состояния ПБИ разработчики установки CD-31 предлагают проводить измерения два раза подряд, при двух зарядовых напряжениях  $U_{ch}$ , равных 1 и 2 кВ, времени разрядки  $t_d$  равном 2 с, временах зарядки  $t_{ch}$  и измерения  $t_m$ , равных по 30 минут. В качестве показателя степени старения предлагается брать отношение кривой ВН при напряжениях 2 и 1 кВ. Такой прием, как полагают разработчики, дает возможность избежать зависимости показателей старения от длины кабеля и окружающей температуры.

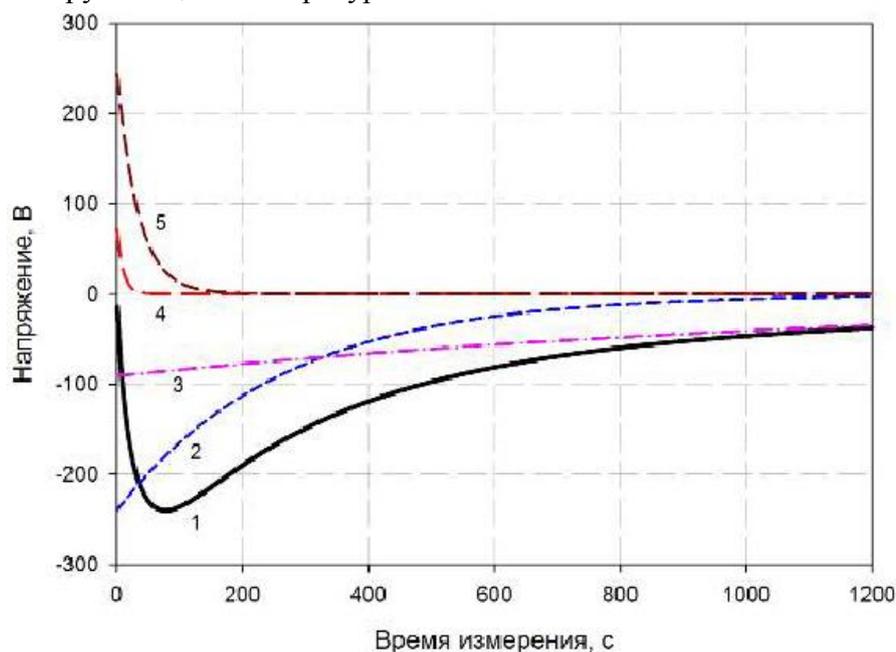


Рисунок 1. Типичная кривая восстановленного напряжения (1) и ее компоненты (2–5)

Результаты измерения восстановленного напряжения и их анализ. Для измерения ВН использовали установку CD-31 производства фирмы «SebaKMT». Время частичной предварительной разрядки  $dt$  было фиксировано и равно 2 с во всех измерениях ВН. Дополнительно в ряде случаев измеряли тангенс угла диэлектрических потерь  $tg\delta$  в частотном диапазоне 0,001–1000 Гц, используя установку IDA-200 производства фирмы «Programma Electric», и сопротивление изоляции  $R$ . Определение  $tg\delta$  в данном случае проводили как для оценки содержания влаги в бумажной изоляции кабелей по величине минимального значения  $tg\delta_{min}$  в измеряемом диапазоне частот, так и для контроля старения бумажной изоляции по величине диэлектрических потерь в диапазоне частот 0,001–0,002 Гц.

Показатели технического состояния электрической бумажной изоляции, основанные на измерении восстановленного напряжения. Как было сказано выше метод ВН медленно внедряется в повседневную практику для проведения контроля состояния ПБИ и других изоляционных материалов. Основной причиной этого является отсутствие моделей, позволяющих при описании формы кривой  $U(t)$  разделить вклады процессов поляризации и электропроводности и как следствие – отсутствие количественных показателей состояния изоляции.

УДК 621.3

## **УСТРОЙСТВА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ВВОДА РЕЗЕРВА**

Щербо А.Ю.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Булойчик Е.В.

В работе рассмотрены четыре типа устройств быстродействующего автоматического ввода резерва.

Для исключения ущербов и обеспечения непрерывности технологических процессов разработаны более технически совершенные, по сравнению с традиционными, устройства АВР, отличающиеся сверх быстродействием – устройства быстродействующего АВР (БАВР).

Быстродействующий АВР предназначен для обеспечения непрерывного электроснабжения потребителей путем их переключения на резервный источник при перерывах электропитания.

Комплекс устройств БАВР включает в себя быстродействующие вакуумные выключатели типов ВБТЭ-М, ВВЭМ, ВБЧЭ и других с электродинамическим устройством управления приводом и быстродействующее пусковое устройство АВР (ПУ АВР) типа БЭ 8302, размещаемые в шкафах КРУ серий К-104м, К-113, КРУ2-10 и других, в шкафах КСО и других типах ячеек РУ 6–10 кВ (по запросу заказчика).

МБПУ АВР представляет собой многоэлементное устройство релейной защиты и противоаварийной автоматики и обеспечивает двухстороннее действие на отключение выключателей двух вводов и на включение секционного выключателя резервного питания.

Устройство быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР) SUE 3000 гарантирует оптимальное обеспечение бесперебойным электропитанием. Благодаря автоматическому переключению на резервный источник питания данный прибор гарантирует продолжение подачи электроэнергии к потребителям и предохраняет последующие процессы от дорогостоящего простоя.

Серия устройств БАВР 072.xx предназначена для быстродействующего включения резервного электропитания в распределительных сетях напряжением 0,4/6/10/20/35 кВ.

БАВРы достаточно активно распространяют в нефтегазовой отрасли, на заводах, так как там потеря электроэнергии несет существенные экономические потери в виде недоотпуска производимой продукции. Встречаются БАВРы и на ТЭЦ.

УДК 621.3

**РЕЗОНАНСНОЕ СМЕЩЕНИЕ НЕЙТРАЛИ В СЕТЯХ 6–35 кВ**

Верташонок В.В.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Дерюгина Е.А.

Изолированная нейтраль применяется в схемах сетей питания в случаях соединения вторичных обмоток трансформаторов по схеме треугольника, а также при невозможности отключения питания при аварии. Поэтому точка нейтрали отсутствует.

Smart grid (умные сети электроснабжения) – это модернизированные сети электроснабжения, которые используют информационные и коммуникационные сети и технологии для сбора информации об энергопроизводстве и энергопотреблении, позволяющей автоматически повышать эффективность, надёжность, экономическую выгоду, а также устойчивость производства и распределения электроэнергии.

Замыкание фазы на землю не считается коротким при схеме сети с изолированной нейтралью, так как нет соединения между землей и проводниками сети. Но это не значит, что не будет тока утечки при замыкании.

Релейная защита и автоматика (РЗА) – комплекс автоматических устройств, предназначенных для быстрого (при повреждениях) выявления и отделения от электроэнергетической системы повреждённых элементов этой электроэнергетической системы в аварийных ситуациях с целью обеспечения нормальной работы всей системы. Действия средств релейной защиты организованы по принципу непрерывной оценки технического состояния отдельных контролируемых элементов электроэнергетических систем. Релейная защита (РЗ) осуществляет непрерывный контроль состояния всех элементов электроэнергетической системы и реагирует на возникновение повреждений и ненормальных режимов. При возникновении повреждений РЗ должна выявить повреждённый участок и отключить его от ЭЭС, воздействуя на специальные силовые выключатели, предназначенные для размыкания токов повреждения (короткого замыкания).

Дугогасящие реакторы применяются для заземления нейтрали трёхфазных сетей 6, 10, 35 кВ. Из-за распределённой по линии электропередач или кабелю ёмкости, при ОЗЗ в месте повреждения изоляции возникает ёмкостный ток. Если он превышает 20–30 А, возникает электрическая дуга, горение которой разрушает изоляцию и проводник кабеля, что может приводить к переходу ОЗЗ в двух- или трёхфазное замыкание и отключению линии релейной защитой. Таким образом потребитель электроэнергии может временно лишиться электроснабжения.

**Литература**

1. Емельянцева, А.Ю. Феррорезонансные процессы без замыкания на землю / А.Ю. Емельянцева // *Новости ЭлектроТехники*. – 2009. – № 4 (58). – С. 25–29.
2. Зихерман, М.Х. Антирезонансные трансформаторы напряжения. Перспективы развития / М.Х. Зихерман // *Новости ЭлектроТехники*. – 2012. – № 4 (76). – С. 18–21.
3. Зихерман, М.Х. Антирезонансные трансформаторы напряжения. Технические требования и методы испытаний / М.Х. Зихерман // *Новости ЭлектроТехники*. – 2011. – № 2 (68). – С. 20–25.
4. Глушко, В.И. Белорусские сети 6–35 кВ переходят на режим заземления нейтрали через резистор / В.И. Глушко, О.Е. Ямный, Э.П. Ковалев, Н.В. Бохан // *Новости ЭлектроТехники*. – 2006. – № 3 (39). – С. 15–20.

УДК 621.3.022

## СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ

Бетанов И.А., Волов Р.А.

Научный руководитель – Климкович П.И.

Влажность и содержание молекул воды в веществах и материалах являются одним из наиболее важных характеристик состава. Влагу необходимо измерять в газах (концентрация паров воды), в смесях жидкостей (собственно содержание молекул воды) и в твердых телах в качестве кристаллизационной влаги, входящей в структуру кристаллов. Соответственно, набор методов и устройств для измерения содержания молекул воды в материалах оказывается весьма разнообразным.

В связи с этим характеристики влажности, а также величины и единицы влажности подразделяются на характеристики влагосостояния и влагосодержания.



Рисунок 1. Гигрометр CENTER 314

Большое распространение получили гигрометры на основе изменения импеданса.

Гигрометры на основе переменного импеданса имеют чувствительный элемент, состоящий из гигроскопичного вещества, у которого происходит изменение какого-либо электрического параметра (сопротивления или емкости) при изменении окружающей влажности.

Импедансные гигрометры можно разделить на три группы:

- резистивные гигрометры;
- емкостные гигрометры на основе полимерных диэлектриков;
- емкостные гигрометры на основе диэлектрического оксида алюминия.

Электротехнические методы измерения влажности твердых тел большей частью основаны на зависимости электропроводности, диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь от влажности.

Основное достоинство метода электропроводности – простота схем и конструкции влагомеров. Однако зависимость показаний прибора от изменения концентрации примесей (кислот, солей, щелочей), структуры, плотности, температуры и других параметров контролируемых материалов значительно сужает область применения этого метода.

Более широко применяется емкостный метод измерения влажности. Он основан на использовании большого различия между значением диэлектрической проницаемости сухих материалов и воды.

К электрическим методам измерения влажности может быть также отнесен метод, основанный на резонансном поглощении радиоволн ядрами водорода (протонами), входящими в состав воды (явление ядерного магнитного резонанса).

Электротехнические методы измерения влажности широко применяют в практике, поскольку они обеспечивают высокую точность измерений, отличаются широким диапазоном измеряемых величин, а также дают возможность проводить измерения в труднодоступных местах.

УДК 621.3

## ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Рабушко П.С., Чуприков Т.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Новаш И.В.

Цифровое моделирование в реальном времени современных электроэнергетических систем становится неотъемлемой частью нашей повседневной исследовательской деятельности. Невозможно представить разработку современных преобразователей напряжения (VSC) или даже многомодульных преобразователей без использования данного метода. Оптимизация (задание) уставок устройств защиты комплексных линии в современных сетях без цифрового моделирования невозможна или представляет собой, по крайней мере, чрезвычайно трудоемкий процесс. В работе перечислены некоторые наиболее важные сферы применения цифрового моделирования энергосистем в реальном времени.

Устройства релейной защиты были первыми пользователями цифрового моделирования замкнутого цикла в реальном времени (CLRTDS). Сегодня практически невозможно представить реализацию современных интеллектуальных устройств защиты и управления сетей со сложной конфигурацией без проверки этих устройств, оптимизации их уставок и конфигураций без помощи CLRTDS.

Требования, предъявляемые к современной защите линии, очень высоки. Предполагается отключать поврежденные фазы и сохранять всю линию в работе до тех пор, пока две различные фазы двухцепной параллельно работающей линии остаются неповрежденными (так называемое многофазное отключение). Пример использования комплекса RTDS, работающего на двухцепной параллельно работающей линии со сложными отключениями приведен на рисунке 1.

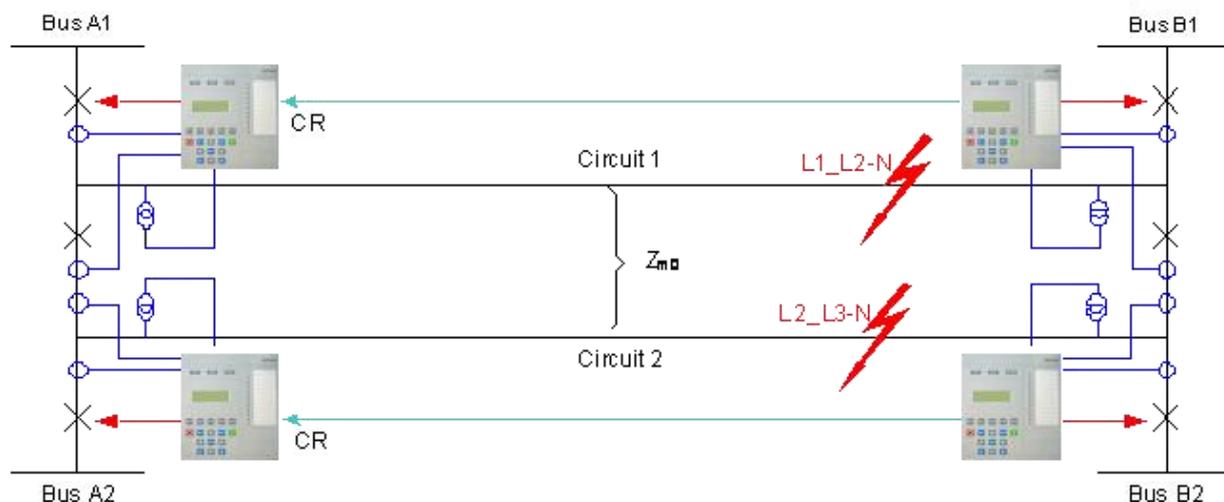


Рисунок 1. Двухцепная параллельно работающая линия со сложными КЗ, многополюсным отключением и адаптивным АПВ

Автоматическое повторное включение (АПВ) должно быть адаптивным на пофазной основе. Все вышесказанное требует тщательного изучения, моделирования различных режимов КЗ (внутренних и внешних), а также точной настройки уставок защиты. Вполне возможно, что проверяться будут не только реле защиты, но и все панели защиты на каждом конце линии. После этого они будут установлены на объекте и введены в работу.

Разработка защиты и автоматики энергосистем за последнее десятилетие сделала значительный шаг вперед, хотя еще большие изменения ожидают нас впереди.

Существует ряд компаний по всему миру, которые сформулировали свои требования к сертификации и методике испытаний для различных типов устройств защиты. Большая часть испытаний, которые должно (независимо от производителя) пройти сертифицируемое

устройство, осуществляется на стандартизованных моделях системы при помощи CLRTDS. Кроме того, для ряда специальных проектов, в особенности применительно к системам сверх- и ультравысокого напряжения, выполняются проектно-ориентированные испытания.

В настоящее время синхрофазоры в энергосистеме используются не только для глобального мониторинга. Все больше энергокомпаний переходят на противоаварийную автоматику (SIPS) на базе синхрофазоров, получающих информацию из всей энергосистемы. Современные CLRTDS используются для моделирования крупных систем и обеспечивают в реальном времени передачу значений из различных точек наблюдений непосредственно в подключенные концентраторы данных. Таким образом, разработчики получают возможность тестировать в оперативном режиме свои алгоритмы по контролю устойчивости системы и аварийному контролю. Интеграция различного программного обеспечения, имеющегося в распоряжении синхрофазоров сегодня, в средства моделирования системы дает пользователю возможность:

- наглядно представить и проанализировать сигналы на достоверность;
- проверить работоспособность в смоделированных условиях посредством анализа и визуализации результатов;
- оценить функционирование сети на основании количественных показателей энергосистемы, включая разность фаз, нагрузку электрической сети, межзональные и локальные колебания, чувствительность по напряжению и частотную характеристику.

Тестирование и оптимизация параметров различного оборудования управления в энергосистеме при помощи CLRTDS на сегодняшний день является стандартным подходом во многих энергетических компаниях по всему миру. На рисунке 2 показан типовой пример статического возбудителя, применяемого для контроля напряжения генератора мощности. Аналогичный подход применяется и для стабилизатора энергетической системы (PSS) и управления регулятором частоты вращения.

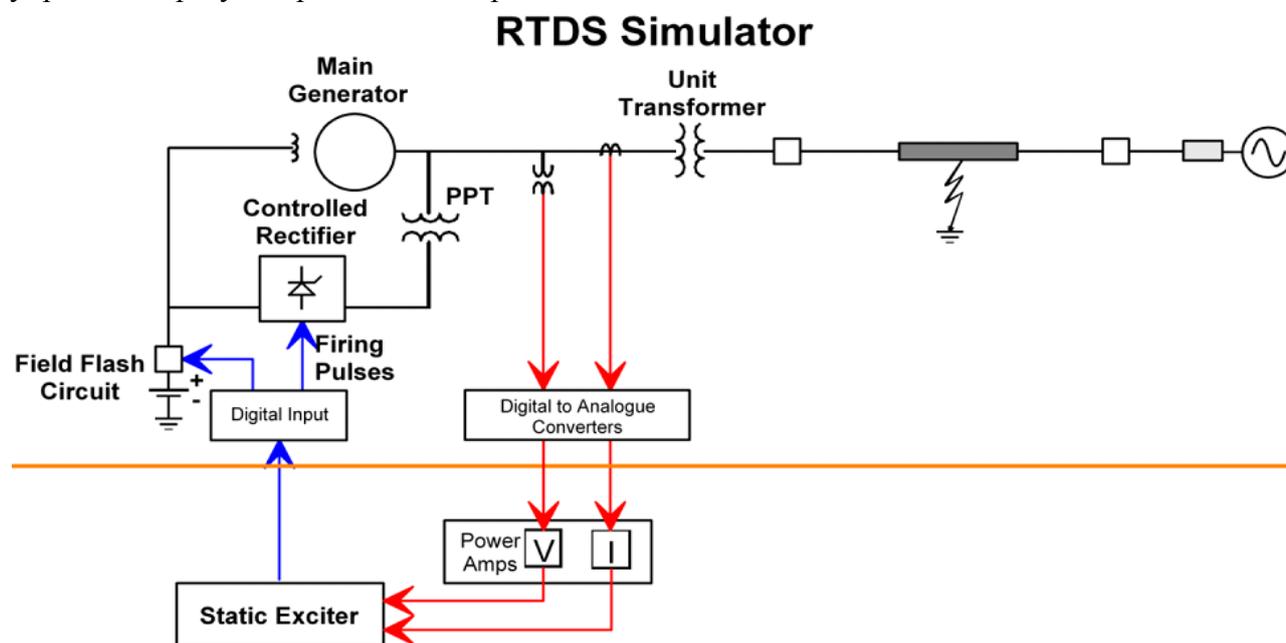


Рисунок 2. Тестирование регулятора возбуждения

Аналогичный подход используется также для разработки и тестирования контроллеров, используемых в устройствах силовой электроники. В этом случае можно рассмотреть следующие примеры:

- установки постоянного тока высокого напряжения на базе классических тиристорных схем с использованием алгоритмов отпирания или 2-, 3- и многоуровневых схем на базе преобразователя напряжения с использованием подсетей с небольшими интервалами времени;
- статический компенсатор реактивной мощности (SVC);

- тиристорно-управляемая продольная компенсация (TCSC);
- статический компенсатор с 2-, 3- и многоуровневыми схемами на базе преобразователя напряжения с использованием подсетей с небольшими интервалами времени и т. д.

Типовой временной шаг для таких случаев обычно составляет не более 2–5 мкс.

Особую задачу для моделирования замкнутого цикла в реальном времени представляют в этом смысле многомодульные преобразователи (MMC), получающие все большее распространение в HVDC и FACTS. В этом случае необходимо правильно представить свыше 500 подмодулей на вентиль или более 3000 на станцию HVDC в целом.

Управление каждым подмодулем должно осуществляться с микросекундным интервалом времени. Такие модули применяются для детальной разработки систем управления и заводских приемочных испытаний, когда требуется физическое подключение к внешним органам управления импульсом возбуждения. Модель должна также поддерживать различные внутренние КЗ для всесторонней проверки управления.

Последние разработки энергосистем в значительной степени отличаются от тех, которыми мы пользовались в прошлом. Возобновляемые источники энергии, распределенная генерация, активно-адаптивная сеть вносят множество изменений в работу системы, защиту и управление. Практически невозможна дальнейшая разработка таких систем без предварительного анализа, который на заключительных этапах должен обязательно включать в себя моделирование в реальном времени. Все это требует дополнительной работы по развитию самих симуляторов. Надежная и высокоскоростная передача данных является важной составляющей активно-адаптивной сети и является обязательным условием для симуляторов в реальном времени, чтобы обеспечить их коммутационные возможности.

Кроме того, обязательно использование точных моделей различных ветряных генераторов, источников солнечной энергии, топливных элементов и соответствующих силовых электронных преобразователей. Нельзя забывать о грядущей эре электромобилей, для которых необходимы надежные системы хранения и средства преобразования постоянного тока.

На сегодняшний день два больших энергетических предприятия установили так называемые крупномасштабные цифровые симуляторы реального времени: KEPCO в Корее и Энергосистема Южного Китая (CSG) в Китае. Основные преимущества использования таких симуляторов заключаются в эффективности реального времени: реализуется большее число сценариев в течение меньшего времени, что приносит больший объем информации и лучшее понимание. Частотная характеристика при помощи одного единственного инструмента дает возможность наблюдать за работой в пределах всего спектра частот, куда входят также все аспекты защиты и управления. Обеспечивается сплошной контроль энергосистемы с непосредственным взаимодействием с энергосистемой можно моделировать только или при условии подключения внешнего оборудования

Энергосистема Южного Китая признала свои LSRTDS в качестве одной из четырех ключевых стратегий обеспечения безопасности и надежности единой энергосистемы. Сильный ледяной дождь в 2008 году привел к значительным повреждениям сети 110 кВ. Свыше 7000 линий было повреждено, и миллионы потребителей остались без электроэнергии. Инженеры Энергосистемы Южного Китая работали круглые сутки для того, чтобы смоделировать систему в исходном виде (том виде, в котором она была до разрушения) и использовали симуляторы для управления восстановлением системы.

С увеличением сложности энергосистемы методы обучения и изучения на различных этапах обучения идут в ногу с развитием и предлагают студентам новые инструменты и методы, которые позволят им лучше подготовиться к решению сложных задач при их самостоятельной работе. Многие университеты уже отметили потребность в моделировании студентом систем и событий в реальном времени и подготовили для своих студентов полный курс лекций с различными характерными примерами.

Различные энергопредприятия по всему миру признали необходимость всестороннего обучения своего персонала при введении новых технологий в энергосистеме, поскольку не могут полностью зависеть от каждого конкретного поставщика. Кроме того, возникает потребность в изучении и анализе различных событий в ходе работы системы, а также необходимость в изменении со временем некоторых параметров. Именно поэтому в практику входит заказ цифрового симулятора реального времени одновременно с приобретением готового проекта.

Кроме вышеперечисленных вариантов комплексы RTDS могут использоваться с целью исследований и разработок систем судовой и корабельной электроэнергетики, для моделирования сетей железнодорожного транспорта (схем питания, фидеров и их защит, сетей постоянного тока, выпрямительных и тяговых подстанций), тягового привода.

На данный момент системы моделирования в реальном времени имеют довольно широкое распространение в мире. Поставлено около 250 комплексов, состоящих из более чем 1100 вычислительных кассет в 36 стран мира, в том числе 8 из них в Россию. На территории Беларуси подобных комплексов не имеется, однако проводятся семинары о целесообразности их приобретения.

### Литература

1. Рябов, В.А. Цифровое моделирование электромеханических процессов в режиме реального времени / В.А. Рябов // Новости электротехники. – 2012. – № 4. – С. 18–23.
2. Технический обзор комплекса RTDS [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа : <http://www.enlab.ru/rus/product/15>. – Дата доступа : 17.05.2018.
3. Перспективы использования современных цифровых симуляторов энергетических систем [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа : <http://www.энергетик.бел/index.php?newsid=976>. – Дата доступа : 03.04.2018.
4. Жуков, А.В. Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения : монография / А.В. Жуков, Е.И. Сацук. – М. : МЭИ, 2004. – 432 с.
5. Наумов, В.А. Моделирование оборудования энергосистемы на аппаратно-программном комплексе RTDS для испытания устройств РЗА : монография / В.А. Наумов, Ф.Л. Коган. – СПб. : НПП ЭКРА, 2011. – 586 с.

УДК 621.3

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВЫРАБОТКИ, ПЕРЕДАЧИ И ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Стасенок Р.М.

Научный руководитель – Потачиц Я.В.

Новое в энергетике зачастую связано с изобретением ранее неиспользуемых способов выработки и передачи электроэнергии. Одному из технических предприятий в Японии удалось осуществить передачу электричества на дальнее расстояние без использования проводов. Это может стать первоначальным шагом на пути к получению электрической энергии из космического пространства посредством преобразования солнечной энергии. В настоящее время специалисты проводят тестирование установки для получения энергии в городе Кобе.

Ученым уже удалось успешно передать электроэнергию на дальность более 500 метров при помощи луча в микроволновом диапазоне. Получающая сигнал установка представляет собой комплект LED-ламп, общая мощность которых достигает 10 кВт. В ходе испытаний были изучены последствия и функционирования установки. В дальнейшем будущем планируется использовать большое количество солнечной энергии и применять ее для различных земных целей. При помощи проведенного эксперимента ученым удалось наглядно продемонстрировать возможность коммерциализации беспроводной передачи.

С каждым днем возрастает привлекательность возобновляемых источников энергии, в том числе электростанций, работающих на основе биомассы. Рост востребованности таких электростанций объясняется такими параметрами, как:

- удобная возможность производства больших объемов энергии;
- минимальные вложения средств;
- высокая производительность функционирования;
- надежность эксплуатации энергетического объекта.

Распространение выработки электроэнергии из биомасс особенно важно для ряда европейских стран, имеющих довольно амбициозные цели в области энергетики. В то же время, ухудшение экономических условий существенно сдерживает возможность расширения данного рынка.

За последние несколько лет власти некоторых стран в Европе минимизировали или полностью приостановили выделение субсидий на выработку электроэнергии из биотоплива. Таким образом, дальнейшее развитие таких электростанций поставлено под угрозу. Несмотря на это, электричество в которых играет ключевую роль, показывают, что выручка предприятий на рассматриваемом рынке возрастает.

Эксперты в области энергетики говорят о том, что объемы установленных мощностей выработки энергии из биомасс будут увеличиваться по мере модернизации устаревших электростанций и их перевод на работу с биомассой.

Стоит отметить, что биомасса является далеко не единственным источником возобновляемой энергии. Согласно заявлениям специалистов, уже через несколько десятилетий в число наиболее популярных источников энергии будет входить ветер. К 2040 году солнечные и ветряные электрические станции смогут обеспечить около 2/3 все производственных мощностей сегмента альтернативной энергетики. При этом темпы развития солнечной энергетики будут более ускоренными, но большая доля в выработке придется на новейшие ветряные электростанции. Прогнозы аналитиков говорят о том, что ветряные станции смогут вырабатывать большее количество энергии, чем нынешние гидроэлектростанции.

В общей сложности, валовое потребление энергии во всем мире с каждым годом возрастает на 0,8 процентов. Доля эксплуатации возобновляемых ресурсов по всему миру постоянно возрастает. К примеру, в Соединенных Штатах доля энергии, выработанной при

помощи возобновляемых источников, составляет 13–15 процентов в год. Аналитики предполагают, что данный показатель вырастет до 18 процентов в будущем. На данное время в число лидеров по выработке электроэнергии из возобновляемых ресурсов входят такие страны, как: Китай, Индия, Италия, Великобритания, Германия.

Свой определенный вклад в развитие энергетики вносят и крупные технологические компании. Так, корпорация Google намерена запустить новый проект по выработке электрической энергии. В исследовательской лаборатории компании были разработаны змеи-аэропланы, способные производить энергию. Мощность одного такого устройства составляет 600 кВт, размах крыла – 25,6 метров, предельная дальность полета – 250 метров, длина встроенного троса – 450 метров. Одно подобное устройство сможет обеспечить производство электроэнергии, которой хватит для одного стандартного многоквартирного дома в городе или для небольшой деревни на 50–60 домов.

Вырабатывающий энергию воздушный змей на высокой скорости и большой высоте летает по кругу для генерирования поток энергии при помощи восьми турбин. Теоретически, такой способ выработки ресурса является более эффективным, по сравнению с применением ветряных станций, так как ветер более сильный на высоте. К числу прочих преимуществ использования новой технологии относятся:

- мобильность устройства;
- отсутствие необходимости возводить крупное сооружения для выработки энергии;
- легкость ремонта;
- возможность запуска практически в любом месте.

Насколько успешным окажется данный проект, станет известно после его тестирования на практике. Как правило, все новое в энергетике сначала проходит серию проверок, после чего вводится в эксплуатацию на постоянной основе.

#### Литература

1. Родионов, В. madenergy.ru / В. Родионов // Новое в энергетике – развитие энергетической сферы на современном этапе [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://madenergy.ru/stati/novoe-v-energetike.html>. – Дата доступа : 02.03.2018.

УДК 621.3

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ГИЛЬБЕРТА

Горячко В.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Румянцев В.Ю.

Дискретное преобразование Гильберта представляет собой процедуру, используемую для генерации комплексных сигналов из действительных.

Комплексный сигнал — это двухмерный сигнал, значение которого в некоторый момент времени может быть задано одним комплексным числом, содержащим 2 части, мнимой и действительной.

Преобразование Гильберта для любого произвольного сигнала представляет собой идеальный широкополосный фазовращатель, который осуществляет поворот начальных фаз всех частотных составляющих сигнала на угол, равный  $90^\circ$ . В настоящее время преобразование Гильберта, применяется в следующих областях: квадратурная модуляция и демодуляция, автоматическая регулировка усиления, анализ двухмерных и трёхмерных комплексных сигналов, оценка мгновенной частоты, обработка сигналов в радарх, измерение задержки приёма сигналов, приёмники телевидения высокой частоты, акустические системы, сжатие аудио сигналов и цветных изображений, анализ нелинейный и нестационарных систем.

Он позволяет переходить от двухмерных действительных сигналов к трёхмерным комплексным, показано на рисунке 1.

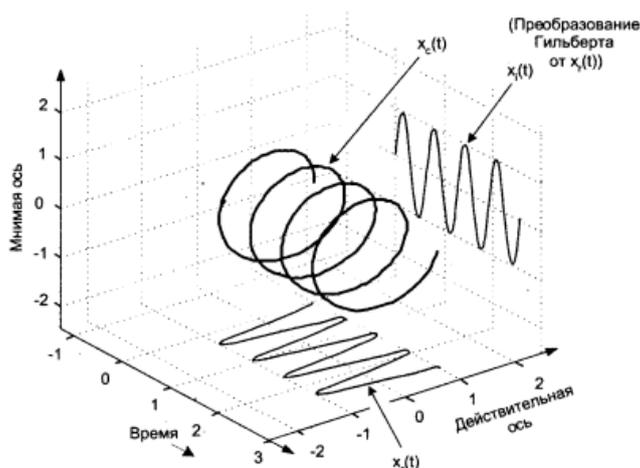


Рисунок 1. Преобразование Гильберта аналитического сигнала  $\cos(f_0 \cdot t)$

Прямое преобразование Гильберта определяется выражением:

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau.$$

Обратное преобразование Гильберта определяется выражением:

$$x(t) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{x}(\tau)}{t - \tau} d\tau.$$

После преобразования Гильберта, как видно из рисунка 1, аналитический сигнал  $\cos(f_0 \cdot t) = \sin(f_0 \cdot t)$ .

Докажем данное утверждение:

$$\cos(f_0 \cdot t) \rightarrow (1/2) \cdot (\delta(f - f_0) + \delta(f + f_0)) \cdot (\text{sign}(f)/i) = (1/(2 \cdot i)) \cdot (\delta(f - f_0) - \delta(f + f_0)) \rightarrow \sin(f_0 \cdot t).$$

Проектирование преобразователя Гильберта во временной области, представляет собой проектирование фильтров нижних частот. Идеальный дискретный преобразователь Гильберта не может быть реализован, но может обеспечить полосу пропускания, перекрывающую полосу частот исходного сигнала, который мы сдвигаем по фазе.

УДК 621.3

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И ТОКОВЫХ ЦЕПЕЙ ЗАЩИТЫ

Ламеко К.П.

Научный руководитель – Артёменко К.И.

Трансформаторы тока широко используются для измерения электрического тока и в устройствах релейной защиты электроэнергетических систем, в связи, с чем на них накладываются высокие требования по точности. Трансформаторы тока обеспечивают безопасность измерений, изолируя измерительные цепи от первичной цепи с высоким напряжением, часто составляющим сотни киловольт.

К трансформаторам тока предъявляются высокие требования по точности. Как правило, трансформатор тока выполняют с двумя и более группами вторичных обмоток: одна используется для подключения устройств защиты, другая, более точная для подключения средств учёта и измерения.

Трансформаторы тока (ТТ) в неустановившемся режиме существенно искажают информацию о состоянии защищаемого объекта, подводимую к устройству защиты. Полная погрешность ТТ при наличии в первичных токах апериодических составляющих в первые 2–5 периодов после возникновения КЗ может достигать 80–90 % и более. Основным фактором, определяющим искажение вторичного тока ТТ, является его ток намагничивания. Он достигает наибольших значений при наличии апериодических составляющих в первичном токе и остаточной индукции в сердечнике и совпадении их знаков.

Математическое описание ТТ, входящее в состав комплексных математических моделей релейной защиты (РЗ), предназначенных для оценки их ожидаемого поведения в переходных режимах защищаемого объекта, должно составляться с учетом реальных условий работы ТТ и их конструктивных особенностей. К ним относятся:

- схемы соединения вторичных обмоток – звезда с нулевым проводом, треугольник, дифференциальные схемы и т. п.;
- значения вторичных нагрузок, при необходимости с учетом их неодинаковости в различных фазах, наличия нелинейных индуктивностей в составе нагрузки и т. п.;
- характеристики намагничивания сердечника с возможностью задания остаточных индукций, учета динамики процесса перемангничивания;
- учет конструктивных особенностей – обычное или каскадное исполнение, наличие немагнитных зазоров в магнитопроводе и другое.

Трансформаторы тока с немагнитным зазором привлекают в последнее время все большее внимание. Основным достоинством ТТ с малым немагнитным зазором является низкий уровень статических индукций при сравнительно высокой отдаваемой мощности. Наряду со снижением переходной составляющей тока небаланса отсутствие остаточных индукций вносит большую определенность в характер протекания переходных процессов. Это позволяет более достоверно оценивать способность различных средств отстройки от переходных токов небаланса и тем самым повышать чувствительность дифференциальных защит. В ближайшем будущем можно ожидать широкого использования ТТ с немагнитным зазором, поэтому в математических моделях ТТ должна предусматриваться возможность их учета.

Для питания токовых цепей РЗ применяются ТТ простейшей конструкции без каких-либо дополнительных средств уменьшения погрешностей, за исключением витковой поправки. Устройство ТТ этого типа в общем случае с небольшим немагнитным зазором в сердечнике.

В переходном режиме падение напряжения в нулевом проводе оказывает существенное влияние на форму кривой вторичных токов. Поэтому математическое моделирование

трехфазной группы ТТ этого вида необходимо выполнять с учетом сопротивлений нулевого провода и включенных в него нагрузок.

Трехфазные группы ТТ с соединением вторичных обмоток в треугольник находят применение в дифференциальных защитах силовых трансформаторов. Вторичные нагрузки в этом случае соединяются в звезду без нулевого провода.

Продольная дифференциальная токовая защита электроэнергетического объекта содержит несколько трехфазных групп ТТ, имеющих общую нагрузку дифференциальной цепи. В защитах синхронных генераторов, высоковольтных электродвигателей содержится две, а в защитах сборных шин – более двух групп с соединением вторичных обмоток в звезду. Защиты силовых трансформаторов, автотрансформаторов, блоков генератор-трансформатор содержат несколько групп ТТ с разнородными схемами соединения вторичных обмоток.

В комплексных математических моделях дифференциальных защит целесообразно использовать модель токовых цепей, позволяющую задавать нужную схему соединений каждой трехфазной группы ТТ. Наиболее просто это осуществляется при одинаковых нагрузках отдельных фаз в плече защиты, когда группа ТТ с соединением вторичных обмоток в треугольник.

Трансформаторы тока с немагнитным зазором привлекают в последнее время все большее внимание. Основным достоинством ТТ с малым немагнитным зазором является низкий уровень остаточных индукций при сравнительно высокой отдаваемой мощности. Наряду со снижением переходной составляющей тока небаланса отсутствие остаточных индукций вносит большую определенность в характер протекания переходных процессов. Это позволяет более достоверно оценивать способность различных средств отстройки от переходных токов небаланса и тем самым повышать чувствительность дифференциальных защит. В ближайшем будущем можно ожидать широкого использования ТТ с немагнитным зазором, поэтому в математических моделях ТТ должна предусматриваться возможность их учета.

#### Литература

1. Электрическая часть станций и подстанций / Под ред. А.А. Васильева. – М. : Энергия, 1980. – 576 с.
2. Федосеев, А.М. Релейная защита электроэнергетических систем : учеб. для вузов / А.М. Федосеев, М.А. Федосеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
3. Новаш, В.И. Расчёт переходных процессов в токовых цепях многоплечевых дифференциальных защит / В.И. Новаш, В.Х. Сопьяник // Электричество. – 1982. – № 7. – С. 74–76.
4. Романюк, Ф.А. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем / Ф.А. Романюк, В.И. Новаш. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. – 174 с.

УДК 621.3

## КОНФИГУРАЦИЯ ТЕРМИНАЛОВ SIEMENS

Гайдук К.Д.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Булойчик Е.В.

В работе представлена информация об устройстве терминалов Siemens, таких как 7SA522 и РЗА РЕТОМ-41М назначение данного изделия, технические характеристики, информация об эксплуатации. Назначением РЗ является автоматическое отключение поврежденного элемента от неповрежденной части ЭЭС.

В настоящее время для защиты элементов ЭЭС все чаще используются микропроцессорные терминалы. Одной из крупнейших компаний, выпускающих микропроцессорные терминалы, является Siemens (Германия). Применение терминалов Siemens нашло широкое распространение в структурах ОАО «ФСК ЕЭС» и других электроэнергетических компаниях. Поэтому умение производить настройку параметров подобных терминалов является одной из основных компетенций для специалиста, получающего образование по направлению «Электроэнергетика и электротехника» и по другим направлениям и специальностям, связанными с эксплуатацией электроэнергетических объектов.

Устройство защиты линии Siprotec 7SA522 обеспечивает, прежде всего, дистанционную защиту воздушных и кабельных линий и объединяет в себе практически все функции, которые обычно требуются для защиты линий электропередачи с односторонним и многосторонним питанием в радиальных, кольцевых или сложных сетях с любым уровнем напряжения. Может использоваться в качестве резервного комплекта защиты по отношению к любой из защит с абсолютной селективностью, устанавливаемых на линиях, трансформаторах, генераторах, двигателях и шинах всех уровней напряжения. При наличии внешних преобразователей можно использовать проводные каналы связи или ISDN-связи (интегральная цифровая сеть связи). Это способствует повышению надежности и безопасности электроэнергетической системы. Устройство обеспечивает однофазные и трехфазные отключения линий с числом концов от двух до шести, с любым типом заземления нейтрали системы. Схемы телезащиты гарантируют максимальную селективность и быстродействие. Устройства измеряют время задержки в сетях связи и на основе этого регулируют соответствие своих измерений. Специальная GPS-версия позволяет использовать эти реле в сетях связи, где значения времени задержки в трактах приема и отправления могут достаточно сильно различаться. Устройство защиты линии 7SA522 обладает следующими преимуществами:

- высокоскоростное отключение (10–15 мс);
- последовательные интерфейсы защиты данных реле можно легко приспособить к требованиям всех имеющихся каналов связи;
- при изменении способа коммуникации возможна свободная настройка коммуникационных модулей на действующую конфигурацию;
- инструменты ввода в эксплуатацию на основе компьютерной системы просмотра;
- компенсация емкостного тока повышает чувствительность дистанционной защиты на кабелях и длинных линиях;
- высокая точность работы при КЗ через большое переходное сопротивление на длинных сильно нагруженных линиях.

Дополнительно к основным функциям реализации защит линии терминал обеспечивает:

- непрерывную проверку функционирования и самодиагностику;
- сигнализацию текущего состояния;
- измерение токов и напряжения;
- осциллографирование токов, напряжений и дискретных сигналов в аварийных режимах;

– веб-мониторинг.

Принципом работы дистанционной защиты является измерение сопротивления до места КЗ. В частности, для реализации защиты от сложных многофазных повреждений дистанционная защита имеет шесть контуров (ступеней) измерения сопротивления. Различные схемы пуска предоставляют возможность адаптироваться к условиям сети, а также предоставить пользователю свободу принятия решений. Также возможно использовать защиту для длинных сильно нагруженных линий как с продольной компенсацией, так и без. Дистанционная защита может дополняться различными схемами телеускорения (для выполнения быстрого отключения повреждений на протяжении всей длины линии). Для линий со слабой подпиткой или вовсе с отсутствием питания с одной стороны реализована возможность выполнения быстрого отключения на обоих концах при помощи схем передачи сигналов. При включении на короткое замыкание в любой точке защищаемой линии имеется возможность формирования сигнала отключения без выдержки времени.

#### Литература

1. Правила устройства электроустановок [Текст] : утв. Минэнерго Российской Федерации 08.07.2002. – 7-е изд. – М. ; СПб. : ДЕАН, 2009. – 701 с.
2. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения [Текст] / В.А. Андреев. – 5-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2007. – 640 с.
3. Фигурнов, Е.П. Релейная защита [Текст]: учеб. для вузов. В 2 ч. Ч. 1. / Е.П. Фигурнов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : ГОУ УМЦ ЖД, 2009. – 414 с.

УДК 621.3

## СОБСТВЕННЫЕ НУЖДЫ ПОДСТАНЦИЙ 35–330 КВ

Карпушонк К.А.

Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

Все механизмы собственных нужд приводятся в движение электродвигателями короткозамкнутого типа непосредственного включения. В котельных отделениях, как правило, применены электродвигатели полностью закрытого исполнения, в машинных залах – продуваемые, защищенные от капежа; электродвигатели для привода питательных насосов выполнены с замкнутой системой охлаждения.

Для привода механизмов собственных нужд применяют главным образом электродвигатели, так как по сравнению с двигателями других типов они более надежны, экономичнее, дешевле, компактнее, отличаются простотой пуска, установки и ремонта. При электрическом приводе значительно упрощается автоматизация технологического процесса станции. На паротурбинных электростанциях для некоторых механизмов собственных нужд применяют и паровые приводы. Так, например, на электростанциях с крупными на высокие параметры пара для рабочих питательных насосов применяют мощные быстроходные паровые турбины; на некоторых паротурбинных электростанциях паровыми турбинками снабжают резервные питательные насосы, чем обеспечивают питание котлов при полном исчезновении напряжения в сети собственных нужд станции.

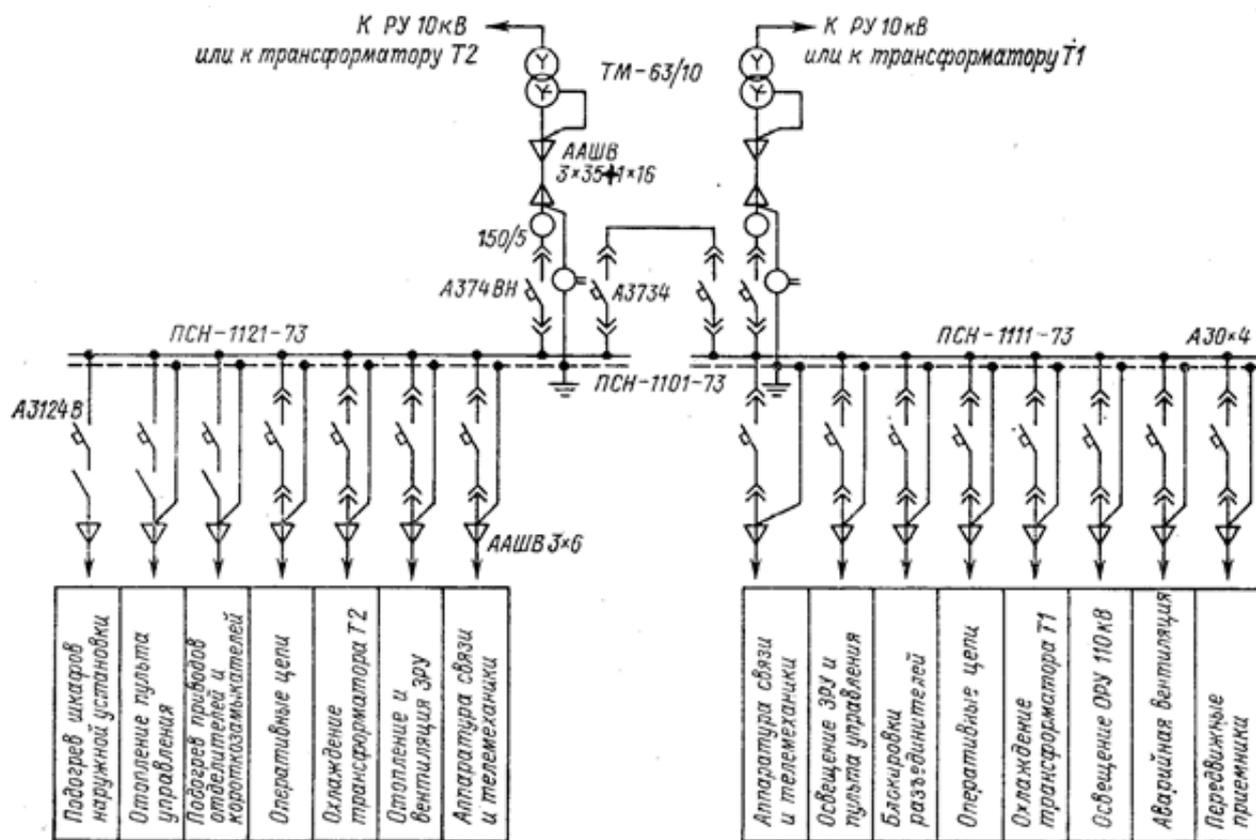


Рисунок 1. Схема СН типовой двухтрансформаторной подстанции 110 кВ

Потребителями системы собственных нужд переменного тока 0,4 кВ являются: охлаждение трансформаторов (электродвигатели вентиляторов и насосов); устройства РПН; электропитание аппаратуры связи и телемеханики, АСУТП, АСКУЭ; обогрев, освещение и вентиляцию помещений (ОПУ, ЗРУ, аккумуляторной, помещения дежурного оперативного персонала); обогрев релейных шкафов наружной установки; обогрев приводов выключателей; обогрев электродвигательных приводов разъединителей.

Как правило, питание ЩСН осуществляется через отдельные автоматы от двух независимых источников – трансформаторов собственных нужд 10/0,4 кВ. На стороне НН трансформаторы собственных нужд должны работать отдельно с АВР. Выбираем трансформатор типа ТМ-160/10.

#### Литература

- 1 Семенов, Н.И. Основное и вспомогательное оборудование станций и подстанций / Н.И. Семенов, И.А. Чапаев. – 2-е изд. – Л., 1972. – 423 с.
- 2 Курбангалиев, У.К. Самозапуск двигателей собственных нужд / У.К. Курбангалиев. – М. : Энергоиздат, 1986. – 393 с.

УДК 621.3

## ИНДИКАТОРЫ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Русакович А.И.

Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

Релейная защита (РЗ) является важной частью автоматики, с помощью которой происходит обнаружение неисправностей в электроустановках и подача сигнала на их отключение или оповещение дежурного персонала.

Релейная защита выполняется с помощью различных реле, реагирующих на ток, напряжение, мощность или другие электрические параметры. Получили распространение реле с электромагнитным и индукционным принципами действия, а также поляризованные, магнитоэлектрические и полупроводниковые реле на электронной элементной базе.

Реле подразделяются на первичные и вторичные, прямого и косвенного действия. Первичные реле включаются непосредственно в защищаемую цепь, вторичные – через трансформаторы тока или напряжения. Реле прямого действия воздействуют непосредственно на расцепитель механизма привода выключателя, а реле косвенного действия подает сигнал на подачу оперативного тока (напряжения) на катушку расцепителя.

Комплект РЗ состоит из пусковых органов, непосредственно и постоянно контролирующих состояние и режим работы защищаемого оборудования, и логической части, которая выбирает режим работы РЗ. Пусковыми органами являются реле тока, напряжения, мощности и др.; логическая часть в основном состоит из реле времени, промежуточных и указательных реле. В отдельных случаях пусковая и логическая части РЗ выполняются как одно целое.

Для быстрого отключения линии, на которой произошло короткое замыкание, она оборудуется РЗ, реагирующей на все виды КЗ и действующей на отключение выключателей. В системах электроснабжения, как правило, линии работают по схеме одностороннего питания. Для их защиты используют максимальную токовую защиту, токовую отсечку и токовую поперечную дифференциальную защиту параллельных линий.

### Литература

1 Защита воздушных и кабельных линий электропередачи [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://rza.org.ua/rza/view/Zashchita-vozdushnih-i-kabelnih-linij-elektroperedachi\\_9.html](http://rza.org.ua/rza/view/Zashchita-vozdushnih-i-kabelnih-linij-elektroperedachi_9.html). – Дата доступа : 29.04.2018.

2 Современные средства релейной защиты и автоматики [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://nashaucheba.ru>. – Дата доступа : 29.04.2018.

3 Основные принципы выбора уставок защит [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://studfiles.net/preview/5864534/page:2/>. – Дата доступа : 29.04.2018.

4 Как устроена релейная защита линий электропередач [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://electricalschool.info/relay/1647-kak-ustroena-relejnjaja-zashchita-linij.html>. – Дата доступа : 29.04.2018.

УДК 621.3

## ПЛЯСКА ПРОВОДОВ И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЕЕ ОГРАНИЧЕНИЮ

Кулак Н.С.

Научный руководитель – Потачиц Я.В.

Пляска проводов, так же, как и вибрация, возбуждается ветром, но отличается от вибрации большой амплитудой, достигающей 12–14 м, и большой длиной волны. На линиях с одиночными проводами чаще всего наблюдается пляска с одной волной, т. е. с двумя полуволнами в пролете, на линиях с расщепленными проводами – с одной полуволной в пролете.

В плоскости, перпендикулярной оси линии, провод движется при пляске по вытянутому эллипсу, большая ось которого вертикальна или отклонена под небольшим углом (до 10–20°) от вертикали. Диаметры эллипса зависят от стрелы провеса: при пляске с одной полуволной в пролете большой диаметр эллипса может достигать 60–90 % стрелы провеса, при пляске с двумя полуволнами 30–45 % стрелы провеса. Малый диаметр эллипса обычно составляет 10–50 % длины большого диаметра.

Как правило, пляска проводов наблюдается при гололеде. Гололед отлагается на проводах преимущественно с подветренной стороны, вследствие чего провод получает неправильную форму. При воздействии ветра на провод с односторонним гололедом скорость воздушного потока в верхней части увеличивается, а давление уменьшается. В результате возникает подъемная сила  $V_y$ , вызывающая пляску провода.

Опасность пляски заключается в том, что колебания проводов отдельных фаз, а также проводов и тросов происходят несинхронно; часто наблюдаются случаи, когда провода перемещаются в противоположных направлениях и сближаются или даже схлестываются. При этом происходят электрические разряды, вызывающие оплавление отдельных проволок, а иногда и обрывы проводов. Наблюдались также случаи, когда провода линий 500 кВ поднимались до уровня тросов и схлестывались с ними.

Удовлетворительные результаты эксплуатации опытных линий с гасителями пляски пока недостаточны для уменьшения расстояний между проводами.

На некоторых зарубежных линиях с недостаточными расстояниями между проводами разных фаз установлены изолирующие распорки, исключаящие возможность схлестывания проводов при пляске.

На основании мирового опыта можно сделать следующие выводы:

– создать способ, который гарантировал бы полное гашение и предотвращение пляски проводов при любых природных условиях воздействия ветра и гололеда невозможно;

– создать гасители, ограничивающие пляску до безопасной величины, работающие на регулирование фазовых соотношений между крутильными и поступательными колебаниями, возможно и они оцениваются в мировой практике, как наиболее перспективные и готовые к практическому применению. Такими гасителями являются маятниковые гасители, которые нашли практическое применение в Канаде, США, Германии, Норвегии, Японии, Бельгии, Словакии, Исландии, Латвии, России и т. д. Маятниковый гаситель представляет собой груз на удлиненной консоли;

– метод борьбы с пляской проводов за счет нарушения однородности нарастания гололеда и аэродинамической однородности за счет вращения провода и изменения его сечения по длине в настоящее время также считается наиболее перспективным и осуществляется как за счет установки грузов ограничителей закручивания провода, так и за счет, например, спиральных гасителей.

Отсюда вытекает, что можно создать ограничитель пляски проводов, работающий как грузограничитель закручивания провода, который будет ограничивать величину гололедообразований и одновременно гасить пляску проводов.

В отличие от вибрации пляска характеризуется малой частотой, большой амплитудой колебания и большой длиной волны. На проводах образуются стоячие волны, когда длина полуволны становится кратной длине пролета.

Вибрирующий провод в пролете ВЛ (воздушной линии) имеет волнообразную форму. Колебания провода при вибрации представляют собой стоячие волны, когда точки провода с наибольшим размахом колебаний (пучности) и точки провода, остающиеся неподвижными в процессе колебаний (узлы), не меняют своего положения по длине провода.

Длина волны вибрации равна удвоенному расстоянию между двумя соседними узлами (или пучностями). Наибольший размах колебаний называется амплитудой вибрации. Амплитуда вибрации обычно не превышает 3–5 см при длине волны от 1 до 10 м. За 1 с происходит от 5 до 100 колебаний.

Наименьшая скорость ветра, при которой возможна вибрация проводов, составляет 0,5–0,6 м/с. Верхняя граница колеблется от 4–5 м/с при высоте подвески провода 12 м, до 8–10 м/с при высоте подвески провода около 70 м (на специальных переходах).

Вибрация проводов возникает вследствие образования завихрений воздушного потока при обтекании провода. Отрывы от провода образующихся за ним воздушных вихрей раскачивает провод в вертикальном направлении. Для возникновения вибрации необходимо, чтобы усилия, действующие на провод, были достаточно большими и чередовались по направлению. Такие усилия возникают только при равномерном ветре. Вероятность возникновения вибрации возрастает с увеличением длины пролета линии, диаметра и высоты подвески провода. С изменением тяжения по проводу меняются длина волны, амплитуда и частота вибрации. Вибрация проводов возникает при направлении ветра под углом 45–90° к оси линии.

При углах 30–45° вибрация неустойчива, а при углах менее 20° – вообще не возникает. Чаще всего вибрация возникает на линиях, проходящих по открытой местности. Кустарники, постройки и деревья на трассе влияют на возникновение вибрации, так как они меняют направление и скорость воздушного потока. На линиях, проходящих по лесным массивам с высотой деревьев, близкой к высоте подвески провода, вибрация проводов практически не наблюдается.

В результате вибрации в месте крепления провода в поддерживающем или натяжном зажиме возникают перегибы. Количество их в процессе эксплуатации быстро достигает очень больших величин и вызывает усталость металла провода. Происходит разрушение отдельных проволок провода, а затем и обрыв провода при нормальном тяжении. Провод до разрушения выдерживает от полумиллиона до нескольких десятков миллионов перегибов.

С увеличением тяжения по проводу усталость металла наступает при меньшем числе перегибов. Повреждения проводов от вибрации чаще всего возникают вблизи поддерживающих зажимов. Чем сильнее изгибается провод в зажиме и чем острее края плашек, зажимающих провод, тем скорее наступает разрушение провода от вибрации.

Наилучшие условия для работы провода создаются в зажимах с широким устьем и закругленными краями в месте выхода провода. Повреждения проводов от вибрации вблизи натяжных зажимов наблюдаются редко, так как натяжной зажим может колебаться вокруг оси крепления вместе с проводом. Однако, если зажимы оказываются массивными, возможны повреждения провода от вибрации и вблизи натяжного зажима

При вибрации обычно в первую очередь, происходит разрушение проволок наружного повива провода, так как они испытывают наибольшие перегибы. Проволоки в месте излома имеют мелкозернистую структуру, края излома – гладкие. Шейки, характерные для разрыва проволок под действием тяжения, отсутствуют. Разрушение провода от вибрации развивается очень быстро, так как увеличиваются напряжения в оставшихся проволоках за счет уменьшения суммарного сечения провода.

Расщепленные фазы на линиях электропередач 330–750 кВ, состоящие из связанных распорками двух-пяти проводов, подвержены вибрации в меньшей степени, чем отдельные провода. Наличие связей между проводами препятствует развитию колебаний и

способствует рассеянию энергии вибрации. Амплитуда вибрации расщепленных фаз снижается в 1,5–10 раз в зависимости от числа проводов и расстояния между распорками, в большинстве случаев это устраняет опасность повреждения проводов от вибрации.

При двух проводах в фазе иногда требуется установка гасителей, а на трех и более защита гасителями вибрации не требуется.

При применении на линиях электропередачи расщепления проводов в фазе дистанционные распорки, устанавливаемые на проводах, в значительной степени обеспечивают гашение вибрации проводов. Особенно эффективно гасят вибрацию парные распорки при групповой схеме их расположения и расщеплении фазы на три и более проводов. В этих условиях установка дополнительных гасителей вибрации, как правило, не требуется, если расстояние между «кустами» распорок не превышает 60–75 м.

На линиях с расщеплением фазы только на два провода виброгасящее действие дистанционных распорок несколько слабее и может потребоваться установка дополнительных гасителей вибрации, хотя количество их на каждом проводе обычно меньше, чем на линиях с нерасщепленными проводами, проходящими в таких же условиях.

Так, на линиях с расщепленной фазой из двух проводов, соединенных распорками, защита от вибрации необходима при длинах пролетов более 150 м и среднеэксплуатационных напряжениях в сталеалюминиевых проводах, превышающих 40–45 МПа, в зависимости от марки провода и характера местности, по которой проходит линия.

Установка гасителей не требуется, если линия проходит по лесному массиву с высотой деревьев, превышающей высоту подвеса проводов, вдоль горных долин и других препятствий, защищающих линию от поперечных ветров

В соответствии с действующими «Методическими указаниями по типовой защите от вибрации проводов и тросов воздушных линий электропередачи напряжением 35–750 кВ» защита от вибрации одиночных проводов и тросов не требуется, если среднеэксплуатационные напряжения в них оказываются меньше 35–40 МПа для алюминиевых проводов и проводов из сплава АН; 40–45 МПа для сталеалюминиевых проводов и проводов из сплава АЖ; 100–110 МПа для медных проводов и 180–200 МПа для стальных проводов и тросов. Более точно эти величины определяются в зависимости от сечения проводов, длины пролетов и характера местности, по которой проходит линия, открытая ровная местность без древесной растительности, сильно пересеченная или застроенная местность, или наличие редкого или низкорослого леса.

В зависимости от условий прохождения трассы тинии, конструктивных особенностей линий и тяжения по проводам и тросам гасители вибрации устанавливаются либо с обеих сторон пролета, либо только с одной стороны, при этом рекомендуется устанавливать гасители вибрации через одну опору, т. е. по обе стороны от одной опоры и пропускающая следующую.

Установка гасителей с одной стороны пролета допускается в условиях пониженной опасности вибрации в пролетах длиной менее 200 м, а также в пролетах длиной 200–320 м, если среднеэксплуатационное – напряжение в проводах незначительно (на 5–10 %) превышает указанные ранее безопасные для вибрации значения.

Установка гасителей вибрации обязательна как для одиночных проводов, так и для расщепленных независимо от среднеэксплуатационного напряжения в проводах при пересечении больших рек, водоемов, открытых горных долин, если длина пролета пересечения превышает 500 м для больших рек и водоемов и 800 м для горных долин, где вибрация проявляется несколько в меньшей степени, чем при пересечении рек и водоемов.

В переходных пролетах через реки и водоемы длиной 500–1500 м, а также через горные долины шириной 800–1500 м рекомендуется установка с каждой стороны пролета по два гасителя вибрации. Защита от вибрации проводов и тросов в переходных пролетах длиной более 1500 м, а также независимо от длины пролета для проводов диаметром более 38 мм и проводов со среднеэксплуатационным тяжением более 180 кН должна производиться по специальному проекту.

На линиях с расщепленными фазами наряду с вибрацией наблюдается еще один вид колебаний проводов – это колебания проводов на участках между дистанционными распорками, связанные с экранированием одного из проводов другим при воздействии ветра на провода, расположенные в одной горизонтальной плоскости. Такой вид колебаний получил название субколебаний. Экранирование одного провода другим при ветре поперек линии и сравнительно небольшом расстоянии между проводами (0,3–0,4 м) приводит к тому, что экранируемый провод попадает в зону завихрений воздушного потока и возникают его колебания в основном в горизонтальной плоскости.

#### Литература

1. Сергей, И.И. Упрощенный расчет максимальных тяжений проводов на двух стадиях их движения при коротком замыкании / И.И. Сергей, А.П. Андрукевич, Е.Г. Пономаренко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 6. – С. 12–26.
2. Васильев, А.А. Электрическая часть станций и подстанций : учеб. пособие для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

УДК 621.316

## АППАРАТУРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ

Мильный А.Г., Жиркова К.Ю.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Румянцев В.Ю.

Аппаратурная реализация цифровых фильтров (ЦФ) может быть осуществлена в результате выполнения следующих процедур:

- выбора соответствующей структуры фильтра;
- выбора типа арифметического устройства с фиксированной или плавающей запятой;
- использования конкретной системы представления чисел, например, в прямом или дополнительном коде;
- выбора последовательного или параллельного способа обработки;
- выбора элементной базы.

Рассмотрим три устройства с использованием фиксированной запятой.

### 1. Построение фильтра по методу Джексона – Кайзера – Макдональда.

При использовании этого метода фильтр выполняется в виде каскадного соединения канонических блоков второго порядка. Для представления сигналов используется дополнительный код, при этом предполагается, что наименьший значащий разряд вводится во время паузы между тактовыми импульсами. Однако для хранения коэффициентов умножения используется прямой код. Для сложения применяется сумматор чисел в дополнительном коде, а умножение выполняется с использованием умножителя чисел в прямом коде. Необходимое сопряжение между сумматорами и умножителями можно осуществить с помощью схем формирования и дополнительного кода. Для получения единичных задержек применяются регистры сдвига с последовательной формой записи и считывания.

До начала операции умножения необходимо иметь в наличии  $N$  разрядов множимого, а поскольку данный умножитель вводит задержку  $K$  разрядов, то регистры задержки должны иметь число разрядов, равное по крайней мере  $N + K$ , для обеспечения необходимой синхронизации при прохождении сигналов через блоки фильтра.

Если скорость поступления входных данных (частота дискретизации, умноженная на число разрядов в выборке) оказывается ниже допустимой для данных цифровых схем, то для повышения эффективности может быть использовано мультиплексирование, когда одни и те же вспомогательные блоки используются для обработки одновременно нескольких отдельных сигналов. Каждый блок по существу является устройством за исключением того, что число разрядов каждого регистра увеличено до  $M \cdot (N + K)$  и каждый регистр для хранения коэффициентов заменён постоянным запоминающим устройством (ПЗУ). Входные выборки от  $M$  источников чередуются от выборки к выборке и последовательно вводятся в фильтр. Выходные выборки появляются в том же чередующемся порядке и поэтому могут быть легко разделены.

### 2. Способ построения фильтра по Пелэду – Лиу.

Данный способ построения, аналогично рассмотренному выше, базируется на последовательном представлении чисел в дополнительном коде. Отличительная особенность способа состоит в том, что все операции умножения и сложения в каждом блоке выполняются одновременно за счёт использования ПЗУ совместно с сумматором-вычитателем.

Дополнительный код числа  $u(n)$  можно сформировать с помощью следующего алгоритма:

- накопитель устанавливается в начальное состояние 0;
- вычисляется значение  $F_i$  для  $i = L$ ;
- значение  $F_i$  (в обратном коде) прибавляется к содержимому накопителю;
- содержимое накопителя сдвигается вправо на один разряд (сдвиг обратного кода);
- повторяются этапы 2 – 4 данной процедуры для  $i = L - 1, L - 2, \dots, 1$ ;

- вычисляется значение  $F_0$ ;
- значение  $F_i$  вычитается из содержимого накопителя.

Можно получить 32 возможных значения  $F_i$  с помощью  $(32 \times L)$ -разрядного ПЗУ.

### 3. Способ построения фильтра по методу Монкевича – Стинаарта.

При данном методе построения, как и в предыдущем случае, за счёт использования нескольких ПЗУ отпадает необходимость в умножителях. Постоянные запоминающие устройства предназначены для хранения всех возможных значений произведений (полученных при умножении сигналов на коэффициенты) и поэтому должны иметь значительный объём памяти. Например, если для представления сигналов и коэффициентов используется 13 разрядов, то требуемый объём памяти каждого ПЗУ составит  $13 \cdot 2^{13} = 106\,496$  разрядов. Однако за счёт логарифмического квантования входного сигнала число его возможных значений можно уменьшить до 27 без уменьшения отношения сигнала-шум ниже того уровня, который требуется в стандартных системах с импульсно-кодовой модуляцией. Таким образом, необходимый объём памяти можно уменьшить.

Логарифмическое квантование можно осуществить включением квантователей. ПЗУ могут быть запрограммированы для выработки правильных значений произведений (полученных при умножении сигналов на коэффициенты), поэтому можно использовать стандартный сумматор. Квантователь на выходе сумматора преобразует сигналы в цепи обратной связи снова в квантованные.

УДК 621.316

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ОШИНОВКИ КРУ 10 КВ

Алехнович А.С.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.

Целью научной деятельности, на которую направлена данная работа, является исследование электродинамической стойкости ошиновки комплектных распределительных устройств с целью повышения их надежности и безопасности эксплуатации.

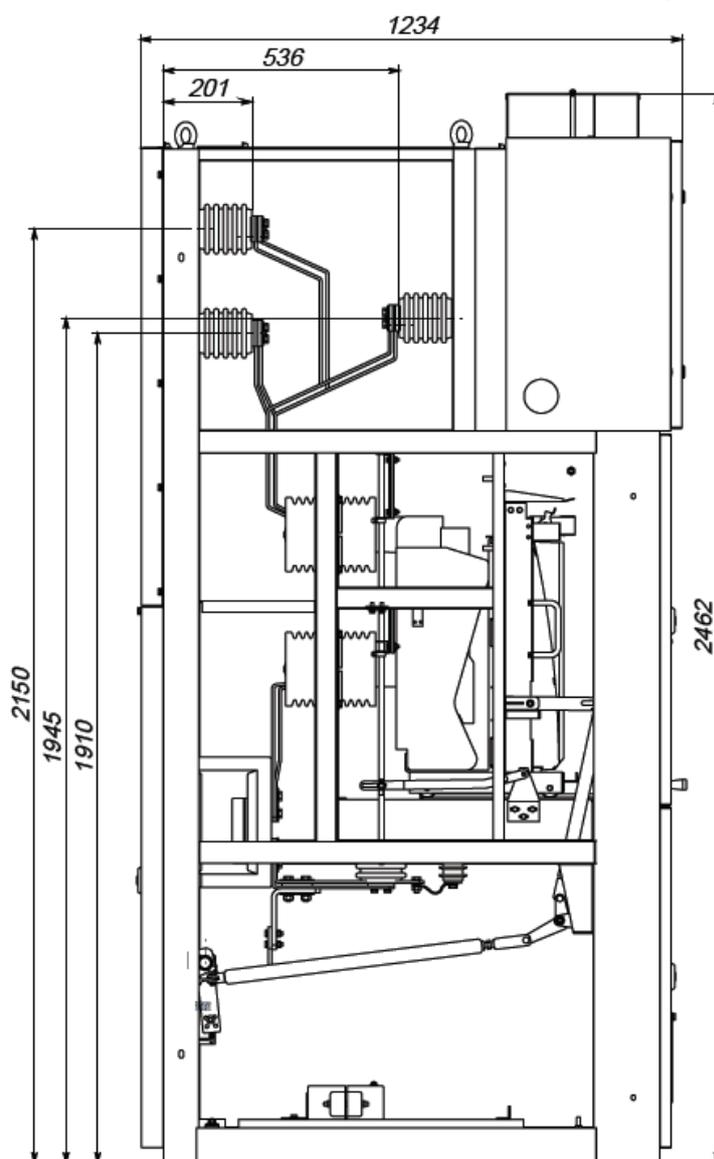


Рисунок 1. Геометрические параметры шкафа

Из вышесказанного следуют основные проблемы эксплуатации комплектных распределительных устройств 10 кВ, позволяющие определить степень их разработки на текущем этапе, пути и методологию решения:

- необходимость компактного расположения токоведущих частей с целью экономии пространства и расходов на производство комплектных распределительных устройств;
- необходимость поиска методологии (алгоритмов), позволяющей максимально повысить электродинамическую стойкость токоведущих частей (ошиновки) комплектных распределительных устройств;

- проблема эффективности применения существующих решений повышения электродинамической стойкости ошиновки комплектных распределительных устройств;
- задача внедрения и последующего применения разработанных методов, в реальных конструкторских решениях.

Объектом исследования является ошиновка комплектных распределительных устройств. В роли части объекта, определяющего поставленную задачу, т. е. предмета исследования – электродинамическая стойкость ошиновки комплектного распределительного устройства 10 кВ типа КРУ-БЭМН. Номинальный ток сборных шин составляет 1250 А. В соответствии с целью научной работы необходимо проверить на электродинамическую стойкость ошиновку при токе КЗ равном 51 кА. Геометрические параметры шкафа представлены на рисунок 1.

Особенностью данных шкафов КРУ является расположение сборных шин по вершинам треугольника, углы которого не равны  $90^\circ$  и  $60^\circ$  (произвольный треугольник). Сборные шины расположены в вершинах треугольника и пропускаются в соседнюю ячейку через проходные изоляторы и резиновые вкладыши, допускающие поперечные перемещения шин. Шины жестко закреплены на медных стержнях-надставках в двух соседних камерах и, как правило, образуют многопролетную шинную конструкцию с неразрезными шинами. Расчетной схемой для них является балка с жестким опиранием (защемлением) на обоих опорах пролета [2]. Для комплектных шкафов с разрезными шинами, длина которых равна длине одного пролета, изменяются коэффициенты расчетной схемы  $\lambda$  и  $r_1$  [2].

#### Литература

1. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
2. ГОСТ 30323-95. Короткие замыкания в электроустановках: Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. – Введен в действие с 01.03.1999. – 57 с.
3. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М. : Издательство НИЦ ЭНАС. – 2003. – 506 с.
4. Кудрявцев, Е.П. Расчет жесткой ошиновки распределительных устройств / Е.П. Кудрявцев, А.П. Долин. – М. : Энергия, 1981. – 96 с.

УДК 621.3

## ИСТОЧНИКИ ОПЕРАТИВНОГО ТОКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Рубина У.В.

Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

Оперативным называется ток, при помощи которого производится управление выключателями, а также питание цепей защит, автоматики и различного вида сигнализации.

Оперативный ток служит для питания вторичных устройств, к которым относятся оперативные цепи защиты, автоматики и телемеханики, аппаратуры дистанционного управления, аварийная и предупреждающая сигнализация и др. При нарушениях нормальной работы станции (подстанции) оперативный ток в некоторых случаях используется также для аварийного освещения и для электроснабжения особо ответственных механизмов собственных нужд.

На электрических станциях (подстанциях) находят применение как свинцово-кислотные, так и железоникелевые щелочные аккумуляторы.

Под энергией аккумулятора понимают энергию (в ампер-часах), которую аккумулятор способен отдать во внешнюю сеть в режиме разряда.

Номинальным напряжением аккумулятора называют наименьшее допустимое напряжение на его зажимах в течение первого часа десятичасового разряда.

Существует несколько схем включения аккумуляторных батарей. На старых электроустановках можно встретить схемы заряд-разряд, при которой всю основную нагрузку длительно несет батарея, а зарядное устройство подключается только на время заряда разряженной батареи. Сейчас применяют исключительно схему постоянного подзаряда, которая отличается от схемы заряд-разряд режимами работы батареи и наличием специального подзарядного агрегата.

Оперативный, постоянный ток на электростанциях распределяется между отдельными присоединениями централизованно. Вблизи от аккумуляторного помещения устанавливается щит постоянного тока, состоящий из нескольких панелей, по одной для каждой батареи, каждого зарядного и подзарядного агрегата. На панелях размещают приборы и аппараты контроля и управления источниками постоянного тока, а также сборные шинки, к которым присоединены эти источники и кабели, питающие отдельные участки сети оперативного тока.

В закрытых распределительных устройствах (ЗРУ) питание включающих электромагнитов осуществляется от шинки из изолированных проводов, проложенных по стенкам коридора управления вдоль ячеек. Число секций таких шинки обычно выбирается равным числу секций сборных шин высокого напряжения.

В открытых распределительных устройствах (ОРУ) используют кольцевую схему питания шкафов управления выключателей. Как видно из рисунка 1, к крайним шкафам управления подводят питающие кабели от центрального щита управления, а все остальные получают питание от соседних шкафов по кабельным перемычкам.

Панели центрального щита управления разделены на отдельные участки, число которых соответствует числу РУ. Таким образом, панели управления оборудованием РУ 220 кВ, например, относятся к одному участку, РУ 110 кВ – ко второму участку и так далее. Каждый из участков при этом питается по отдельному кабелю, при повреждении которого он может получить питание от соседнего включением секционного рубильника.

Схема распределения постоянного тока на щите управления приведена на рисунке 2.

Большое значение для надежности работы оперативной сети постоянного тока имеет своевременное обнаружение дефектов изоляции и локализация поврежденных участков. Во многих случаях аппараты и приборы, служащие для контроля изоляции оперативной сети, устанавливаются на отдельных панелях.

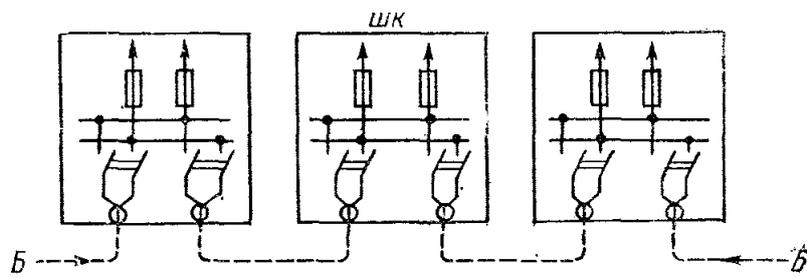


Рисунок 1. Схема распределения постоянного тока в ОРУ

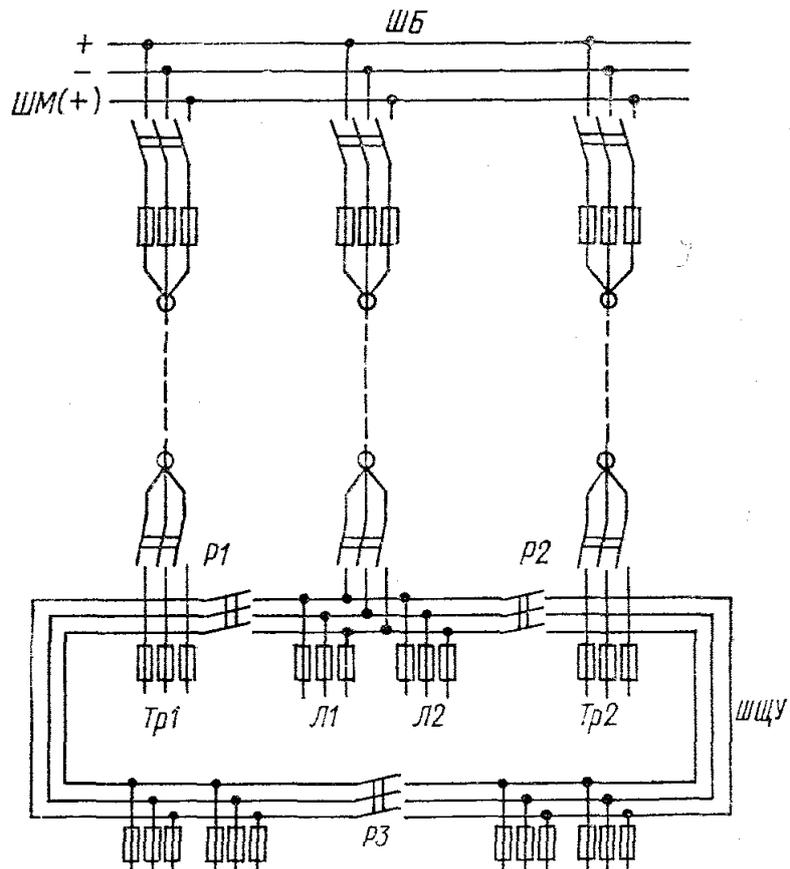


Рисунок 2. Схема распределения постоянного тока на щите управления

### Литература

1. Чернобровов, Н.В. Релейная защита энергетических систем / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. – М. : Энергоатомиздат, 1998.
2. Поярков, К.М. Электрические станции, подстанции, линии и сети / К.М. Поярков. – М. : Высшая школа, 1983.

УДК 620.9

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ГИБКОЙ ОШИНОВКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Васильева А.А., Баран А.Г., Зарихта К.С., Umedzhoni A.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Пономаренко Е.Г.

Под электродинамической стойкостью гибких проводов электроустановок понимают их способность противостоять электродинамическому действию токов КЗ до и после автоматического отключения цепи КЗ без повреждений. С возрастанием токов КЗ их электродинамическое действие становится ключевым фактором, определяющим габариты и механические характеристики токоведущих конструкций с гибкими проводами при проектировании.

Анализ и обобщение результатов экспериментальных исследований позволяет составить подробную картину поведения гибких проводов при КЗ. Минимальное расстояние между проводниками соседних фаз в процессе сближения, очевидно, будет зависеть от максимального отклонения у обоих проводников.

Определение токов электродинамической стойкости несколько усложняется тем, что в пролетах применяются провода с разными сечениями, разные типы изоляторов в гирлянде, что, безусловно, влияет на величину тока электродинамической стойкости  $I_{\text{дин}}$ . Из всех пролетов выбираются пролеты наибольшей длины, где отклонения проводов будут больше, чем в коротких пролетах. Чтобы учесть влияние расположения отпайек в пролете, расчет производится для шинных и ячейковых пролетов. Токи электродинамической стойкости гибких шин для пролетов с другими параметрами могут быть определены путем интерполяции и экстраполяции имеющихся результатов или отдельным численным расчетом.

Численные эксперименты показывают, что наибольшие сближения проводников соседних фаз в пролетах с отпайками наблюдаются при двухфазных коротких замыканиях. Это объясняется тем, что при трехфазном коротком замыкании средняя фаза получает значительно меньший импульс электродинамических усилий (ЭДУ), чем крайние фазы, и движется преимущественно в вертикальном направлении. При двухфазном коротком замыкании фазы, участвующие в процессе, получают близкие по величине импульсы и движутся практически с одинаковой скоростью как при отталкивании, так и при сближении.

В некоторых конструкциях ячейкового пролета существует опасность сближения спусков соседних фаз, так как они находятся непосредственно под шинами в одной плоскости. В месте крепления к шине спуск повторяет ее движение. После прохождения точки наибольшего сближения шины начинают удаляться друг от друга, при этом соседние спуски некоторое время продолжают сближаться по инерции за счет изгиба. Сближение спусков, таким образом, может оказаться большим, чем сближение шин.

В шинных пролетах, где разъединители расположены перпендикулярно пролету, сближение соседних фазных проводов происходит при больших токах короткого замыкания – как при двухфазном, так и при трехфазном КЗ. Это объясняется влиянием длинных и поэтому тяжелых отпайек, которые сильно ограничивают движение шин. Более вероятным в данной конструкции пролета является сближение между собой сборных шин и спусков соседней фазы. Сближение происходит из-за того, что при движении спуск по инерции изгибается в сторону соседней шины. Траектории шины и спуска при этом могут пересечься. Минимальное расстояние может наблюдаться при сближении наиболее длинного спуска крайней фазы и фазного проводника средней. Сближение может оказаться еще большим при сопутствующем направлении ветра.

При выборе расчетных климатических режимов следует ориентироваться на сочетание климатических условий, предложенные ПУЭ для расчета воздушных линий (ВЛ) и ОРУ. Наибольшему сближению проводников способствуют режимы с максимальной

температурой, так как при этом гибкие шины имеют максимальный провес, а соответственно и большие горизонтальные отклонения. Если шины ОРУ могут быть длительно загружены током, близким по величине к допустимому, то максимальная температура провода должна быть принята равной 70 °С. В качестве расчетного следует рассматривать также режим с максимальным скоростным напором ветра.

Характер движения гибких шин при КЗ, их траектории, максимальные отклонения, сближения и тяжения зависят от продолжительности КЗ. Очевидно, что наибольшее электродинамическое воздействие на провода оказывают КЗ с наибольшей продолжительностью, когда импульс ЭДУ имеет максимальное значение. Поэтому в качестве расчетных следует рассматривать такие режимы, когда продолжительность КЗ будет наибольшей. Однако если продолжительность КЗ достаточно велика, провод успеет достигнуть своего наибольшего горизонтального отклонения, то при обратном движении ЭДУ противодействуют ему. Это может привести к тому, что сближение соседних шин будет меньшим при большей продолжительности КЗ. Таким образом, можно говорить о некоторой критической продолжительности КЗ, после достижения которой ток  $I_{дин}$  начинает возрастать

Повторное КЗ в цикле неуспешного автоматического повторного включения (АПВ) при некоторых продолжительностях бестоковой паузы, как показывают численные расчеты, может привести к большему сближению проводников. Однако для пролетов с отпайками это влияние незначительно. Основная опасность неуспешного АПВ в том, что перед повторным КЗ шины соседних фаз могут достигнуть своего максимального сближения. Тогда в момент включения тока повторного КЗ ЭДУ значительно возрастают, что приводит к увеличению отклонений, а также механических усилий в проводниках, опорных и изоляционных конструкциях. При достаточном уровне остаточного напряжения на шинах в этот момент возможен пробой воздушного изоляционного промежутка.

Компьютерный расчет токов электродинамической стойкости пролетов типовых конструкций ОРУ производится с помощью, разработанной на кафедре «Электрические станции» БНТУ, компьютерной программы FleBus. В ней применяется расчетная модель провода в виде гибкой упругой нити.

Программа FleBus позволяет выполнять расчеты динамики гибкой ошиновки при двухфазном и трехфазном коротком замыкании. Имеется возможность задать повторное КЗ в цикле неуспешного АПВ, выбрать место КЗ, фазы, участвующие в процессе КЗ, и другие характеристики. С помощью программы можно рассчитывать пролеты с числом отпайк от одной до трех. Это соответствует большинству конструкций типовых пролетов РУ. В программу заложен алгоритм расчета длин спусков, поэтому если длины неизвестны, можно ввести нулевые значения. Для удобства пользования в программу встроены каталоги проводов и гирлянд изоляторов. Предусмотрена возможность добавления новых данных в каталоги. Имеется также расширенная справочная система, которая вызывается из программы. В ней приведен курс обучения пользованию приложением и описаны все его возможности. В программу заложен алгоритм анализа условий электродинамической стойкости пролета. Если электродинамическая стойкость будет нарушена, в файле результатов расчета будет сделана соответствующая запись. Выбор расчетных условий короткого замыкания и климатического режима остается в компетенции пользователя. Для оптимизации рабочего времени пользователя в программе предусмотрена возможность проведения серии расчетов с изменением тока в заданном диапазоне. Приложение производит серию расчетов без участия пользователя. Результаты расчетов сохраняются в виде зависимостей основных параметров электродинамической стойкости от тока КЗ. Эта функция будет удобна для комплексных исследований, например, при определении тока электродинамической стойкости  $I_{дин}$ .

УДК 621.3

## МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОТДЕЛЬНО СТОЯЩИХ МОЛНИЕОТВОДОВ

Соленик Г.Л., Туманов П.С.

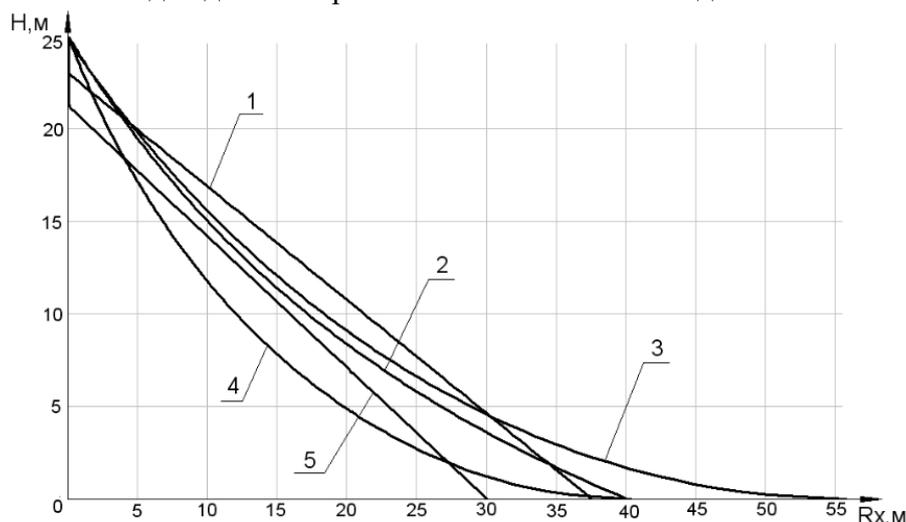
Научный руководитель – Климкович П.И.

Опасность для человека представляет прямой удар молнии, ее вторичные воздействия и занос потенциалов в здания. Прямой удар молнии опасен высоким потенциалом, который может вызвать поражения людей шаговыми напряжениями или прикосновения и высокой температурой канала молнии, которая может вызвать воспламенения или взрыв легковоспламеняющихся жидкостей, а также механические разрушения в результате повышения давления газов и паров в местах протекания больших токов молнии.

Вторичные воздействия возникают в результате действия электромагнитного поля молнии, ударяющей данного объекта или на расстоянии от него. Они могут вызвать искрения, опасные для взрыво- и пожароопасных помещений, и потенциалы на конструкциях, опасные для человека.

Занос высоких потенциалов в здания возможен по проводам воздушных линий электропередачи, подземным трубопроводам, кабелям, рельсовым путям в результате прямых ударов молнии в коммуникации или вблизи них и может вызвать опасные искрения, явиться причиной взрывов, пожаров и поражения людей.

Расположение отдельно стоящих молниеотводов и опор под тросовые молниеотводы на территории объекта проектирования носит субъективный характер, поскольку, в отличие от классической схемы (установка молниеприёмников на порталах), требуется учитывать положение прилегающих коммуникаций, главным образом трассы прокладки вторичных цепей. Это условие требует проработки сразу нескольких вариантов взаимного расположения молниеотводов, а зачастую и сравнительный анализ расчетных методик в виду ограниченности действия большинства нормативов, что затягивает выдачу готового проекта. Достаточно сравнить существующие методики, указанные в различных нормативных документах (рисунок 1). Очевидно, что результат расчета радиуса зоны защиты  $R_x$  одиночного стержневого молниеотвода хотя бы по двум различным нормативам может отличаться на 10 метров. И это для одного уровня защиты. Если говорить о возможностях НДТ, то основной действующий нормативный документ, СО 153-34.21.122-2003, позволяет выполнить расчет лишь для двойных равновысоких молниеотводов.

Рисунок 1. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода  $H = 25$  м:

- 1 – РД 34.21.122-87 (уровень защиты  $P_3 = 0,95$ ); 2 – Руководящие указания по расчету зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов «Энергосетьпроект» 1974 г. ( $P_3 = 0,9$ );  
 3 – DIN VDE 0101 Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV ( $P_3 = 0,9$ );  
 4 – Метод фиктивной сферы DIN EN 62305-3 Blitzschutz ( $P_3 = 0,91$ );  
 5 – СО153-34.21.122-2003 ( $P_3 = 0,9$ )

Данных недостатков лишены РД 34.21.122-87 и инструкция «Энергосетьпроект», однако с их помощью не представляется возможным оценить высоту защищаемого промежутка между тремя и более молниеотводами. Метод фиктивной сферы (МЭК 62305-3) является наиболее универсальным, поскольку зоны защиты строятся «обкатыванием» системы молниеотводов сферой радиуса  $R_{сф}$ , соответствующего уровню защиты. Однако, в стандарте не представлено ни одной расчетной формулы, а поиск координат центра сферы, опирающуюся на тройку молниеотводов, требует применения численных методов расчета. Отсутствие специальных компьютерных программ, заставляет проектные организации отказаться от данного метода.

#### Литература

1. Кузнецов, М.Б. Инструкция по устройству молниезащиты добавила проблем проектировщикам / М.Б. Кузнецов, М.В. Матвеев // Новости электротехники. – 2008. – № 5 (53). – С. 116–120.
2. Дьяков, А.Ф. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / Под общ. ред. А.Ф. Дьякова. – М. : Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.
3. Базелян, Э.М. Анализ исходных посылок и конкретных рекомендаций стандарта МЭК 62305 по защите от прямых ударов молнии / Э.М. Базелян // Первая Российская конференция по молниезащите: сборник докладов. – Новосибирск : Сибирская энергетическая академия, 2007. – С. 129–139.

УДК 621.316.344/.349

## БЛОКИ КОЛЬЦЕВОЙ МАГИСТРАЛИ

Лисовский А.Д.

Научный руководитель – Климкович П.И.

Блок кольцевой магистрали (БКМ) – это электрическое устройство, которое состоит из комплекта высоковольтных переключателей. Эти переключатели устанавливаются в стальной шкаф или переделываются в скомплектованный силовой агрегат кольцевой электросети.

Основной частью БКМ являются переключатель нагрузки и предохранитель.

Блок кольцевой магистрали имеет большое количество достоинств, такие как простая структура, небольшой объем, низкая стоимость, безопасная подача энергии, усовершенствованные параметры питания и производительности. Он широко используется в распределительных станциях и контейнерных подстанциях в узлах нагрузки.

В данной научно исследовательской работе были рассмотрены основные технические характеристики, конструкции ячеек и компоненты низковольтного отсека блока кольцевой магистрали на примере КРУЭ 8DJH компании SIEMENS (рисунок 1).



Рисунок 1

Распределительное устройство, собранное из типовых унифицированных блоков (т. н. ячеек) высокой степени готовности, собранных в заводских условиях, называется комплектным распределительным устройством. На напряжении до 35 кВ ячейки изготавливают в виде шкафов, соединяемых боковыми стенками в общий ряд. В таких шкафах элементы с напряжением до 1 кВ (цепи учёта, релейной защиты, автоматики и управления) выполняют проводами в твердой изоляции, а элементы от 1 до 35 кВ – проводниками с воздушной изоляцией (шины с изоляторами).

Для напряжений выше 35 кВ воздушная изоляция не применима, поэтому элементы, находящиеся под высоким напряжением помещают в герметичные камеры. В устаревшей

технологии используется элегаз, в то время как в Европе элегаз постепенно заменяется вакуумными дугогасительными камерами, имеющими относительно простую конструкцию. Ячейки с элегазовыми камерами имеют сложную конструкцию, внешне похожую на сеть трубопроводов. КРУ с элегазовой изоляцией сокращённо обозначают КРУЭ, сокращения для КРУ с вакуумными дугогасительными камерами пока не введено в оборот.

В связи с ростом городов, укрупнением промышленных предприятий и широкой автоматизацией производственных процессов резко возрастает потребление электроэнергии. При этом возникает необходимость максимального приближения линий 110, 220, 330 кВ к потребителям. При таких напряжениях допустимые изоляционные расстояния в воздухе между токоведущими частями РУ очень велики. Это приводит к резкому увеличению габаритов как самих РУ, так и зданий, и площадей для их установки. Существующие открытые РУ создают большие радиопомехи и звуковые эффекты (выстрелы), связанные с работой воздушных выключателей.

Выходом из этого положения является создание РУ, в которых изоляция осуществляется твердыми и жидкими изоляционными материалами или газами под повышенным давлением. Твердая изоляция распространения не получила – трудно обеспечить надежную изоляцию при переходе от одного элемента РУ к другому. Минеральное масло из-за пожаро- и взрывоопасности не применяется. Другие жидкости (негорючие хлорированные масла) дороги, выделяют хлор. Поэтому наиболее подходящими являются газы – воздух и элегаз. Первый требует высокого давления, а, следовательно, большой прочности оболочек. Поэтому элегаз нашел преимущественное применение. Свойства элегаза рассмотрены выше. Площадь, занимаемая КРУ с напряжением 110, 220 кВ, может быть уменьшена в 10–15 раз за счет использования элегаза. В элегазовых КРУ (КРУЭ) элегаз используется и как изолирующая, и как дугогасящая среда. Заключение в металлические оболочки токоведущих цепей высокого напряжения резко снижает уровень радиопомех. Применение элегазовых выключателей, работающих без выброса газа в окружающую среду, делает работу КРУЭ бесшумной.

Распределительные устройства 8DJH (рисунок 2) применяются в городских и промышленных силовых сетях системы вторичного распределения, например, в:

- трансформаторных и распределительных подстанциях, энергоснабжающих организаций и городских электростанций;
- ветросиловых и солнечных установках, гидроэлектростанциях;
- установках для обработки воды и сточных вод;
- аэропортах, железнодорожных вокзалах, станциях метрополитена;
- установках для разработки бурого угля открытым способом;
- высотных зданиях.



Рисунок 2

Все открытые токоведущие части и коммутационные аппараты помещаются в резервуар с электрическим газом (SF<sub>6</sub>), заваренным на весь срок службы (35 лет) без каких-либо уплотнений, тем самым обеспечивается полная недоступность к токоведущим частям под напряжением. Резервуар присоединяется к системе заземления, поэтому можно безопасно касаться с внешней стороны.

Применена конструкция резервуара и отсека кабельных присоединений, стойкая во внутренней дуге, тем самым даже при возникновении электрической дуги не будет нанесён вред здоровью эксплуатирующего персонала и рядом стоящим ячейкам.

Подключение кабелей осуществляется с помощью кабельных наконечников, присоединяемых к проходным изоляторам болтом, закрытых Т-образными или Г-образными экранированными адаптерами, тем самым нет доступа к контактному соединению.

Все трансформаторы тока выполнены с тороидальным сердечником и устанавливаются либо на проходной изолятор, либо на кабель.

Трансформаторы напряжения закрываются металлической оболочкой, тем самым нет возможности попасть под потенциал.

Вакуумный выключатель и разъединитель в стационарном исполнении находятся в резервуаре с электрическим газом и нет возможности его выкатить, тем самым сводится на ноль возможность попасть под напряжение или привести к возникновению дуги в случае неправильных действий при выкатывании.

К компонентам низковольтного отсека относится максимальная токовая защита с выдержкой времени SIPROTEC 7SJ82 которая содержит в себе следующие элементы:

- направленная и ненаправленная максимальная токовая защита с выдержкой времени и дополнительными функциями;
- оптимизация по времени расцепления путем сравнения направлений и передачи данных о защите;
- частотная защита и защита от скорости изменения частоты для области применения со сбросом нагрузки;
- защита от повышения и понижения напряжения во всех необходимых форматах;
- защита направления мощности, настраивается как защита активной или реактивной мощности;
- управление, проверка синхронизма и защита от неверной коммутации;
- встроенный порт Ethernet J для DIGSI;
- полное соответствие требованиям IEC 61850 (отчетность и GOOSE) через встроенный порт J;
- возможность использования двух опциональных вставных коммуникационных модулей для различных резервных протоколов.

Исходя из выше перечисленных пунктов можно сделать вывод о том, что КРУЭ 8DJH обладает следующими преимуществами:

- безопасность персонала, надёжность, удобство;
- не требует технического обслуживания в течение всего срока службы (35 лет);
- простота и надёжность в эксплуатации;
- компактность.

#### Литература

1. Распределительное устройство среднего напряжения: Руководство по монтажу и эксплуатации: ООО «Сименс», 2015. – 300 с.
2. Особенности применения КРУЭ для сетей 6–20 кВ: каталог-справочник / ред.-сост. И.И. Петров: ООО «Сименс», 2012. – 18 с.
3. КРУЭ для систем вторичного распределения до 24 кВ: Каталог НА 40.2 – 2014: ООО «Сименс», 2014. – 212 с.

УДК 621.3

## СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПО ЧАСТИЧНЫМ РАЗРЯДАМ

Савицкий П.Ю., Волов Р.А.

Научный руководитель – Климович П.И.

Частичные разряды (ЧР) появляются в слабом месте кабельной линии под воздействием переменного напряжения и приводят к постепенному развитию дефекта и разрушению изоляции.

Системы мониторинга частичных разрядов различаются своими параметрами и количеством измерительных каналов.

### 1. Система мониторинга и диагностики «CDM-30» для кабельных линий 6–35 кВ.

Система мониторинга марки «CDM-30» (Cables Diagnostics Monitor, 30 Channel) предназначена для постоянного контроля технического состояния изоляции до 30 (45) кабельных линий 6–10 кВ под рабочим напряжением. Все контролируемые кабельные линии должны быть подключены (через выключатели) на одном КРУ, чтобы соединительные сигнальные кабели от датчиков до измерительного прибора не превышали 60 метров.

Использование многоканальной системы мониторинга «CDM-30» позволяет снизить общие затраты на систему мониторинга и диагностики, рассчитываемые на один контролируемый кабель. С другой стороны, возможность проведения одновременного анализа частичных разрядов по нескольким каналам позволяет более эффективно отстраиваться от наводок высокочастотных помех на контролируемое оборудование, которые в условиях больших КРУ очень значительны.

В «CDM-30» контроль технического состояния высоковольтной изоляции кабельных линий, соединительных и концевых муфт, осуществляется на основе метода регистрации и анализа частичных разрядов, который имеет максимально высокую чувствительность для диагностики дефектов в изоляции любого типа.

Достоинства использования системы марки «CDM-30» для организации непрерывного мониторинга:

- одновременно контролируется состояние от 15 до 30 кабельных линий, подключенных в одном месте;
- состояние кабельных линий контролируется не одномоментно, а постоянно, во всех наиболее важных режимах работы;
- на основании анализа полученной информации системой вырабатываются оперативные диагностические решения, и даются рекомендации по дальнейшей эксплуатации кабельных линий.

При помощи «CDM-30» реализуются следующие функции диагностики:

- осуществляется непрерывный контроль состояния изоляции высоковольтной кабельной линии на основе метода регистрации и анализа уровня и распределения частичных разрядов. Определяется тип дефекта в изоляции, анализируется степень его развития и опасности для дальнейшей эксплуатации;
- производится автоматическая локализация мест возникновения дефектов в изоляции, выявленных системой по частичным разрядам, как в муфтах, так и в самом кабеле. Уникальность этой важной диагностической функции в данном случае заключается в том, что она реализована для кабельных линий в режиме «on-line», т. е. под рабочим напряжением.

Оперативная диагностика технического состояния изоляции контролируемых кабельных линий осуществляется внутри прибора в режиме реального времени, при помощи встроенных алгоритмов. При достижении заданных пороговых значений информация о критическом состоянии кабелей отображается на крышке монтажного шкафа прибора при

помощи красных светодиодов. По итогам работы в программе мониторинга (в компьютере) автоматически формируются протоколы состояния всех кабельных линий.

Для практической организации мониторинга состояния кабельных линий необходимо на всех кабельных линиях, состояние которых предполагается контролировать системой мониторинга, на поводках заземления концевых муфт, заранее смонтировать первичные датчики частичных разрядов марки «RFCT-7». Прибор «CDM-30», при помощи коаксиальных кабелей одинаковой длины, подключается к первичным датчикам.

Для полноценной работы прибора «CDM-30» в экспертном и диагностическом режиме необходимо заранее сформировать «схемную конфигурацию» контролируемой кабельной сборки на контролируемом распределительном устройстве. Эта конфигурация создается пользователем в компьютере, а затем загружается в прибор перед началом работы системы мониторинга.

Для создания схемной конфигурации применяется специальная программа – конструктор, позволяющая рисовать схемы кабелей и места установки датчиков быстро, максимально просто и эффективно. При создании конфигурации контролируемых кабелей вводится вся техническая информация, необходимая для выявления дефектного кабеля, оценки его технического состояния, определения типа дефекта в изоляции и его опасности.

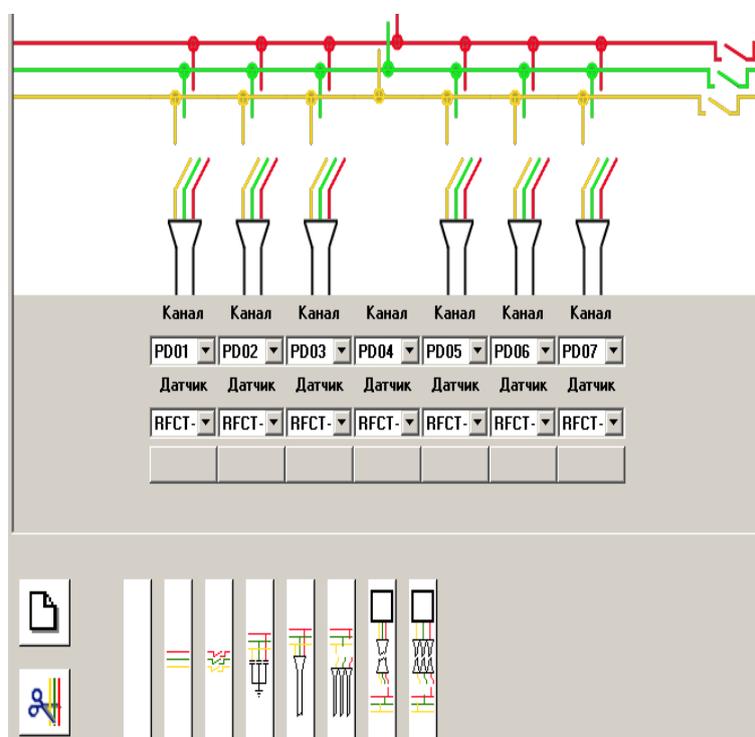


Рисунок 1. Интерфейс диагностического программного обеспечения для создания конфигурации контролируемых кабельных линий

Наиболее сложной задачей при проведении регистрации частичных разрядов в высоковольтных кабельных линиях является отстройка от помех, из-за которых чувствительность систем мониторинга падает в десятки и даже сотни раз.

Для решения этого вопроса – выявления дефектов на ранних стадиях развития в приборе «CDM-30» реализован набор самых современных средств отстройки от внешних помех. Он включает в себя алгоритмы:

- совместный анализ времени возникновения импульсов и фазы питающего напряжения;

- «Time of arrival» – отстройка от помех по времени прихода импульсов от разных кабельных линий, с разрешением в единицы наносекунд;

- амплитудная «разборка импульсов» разрядов, предназначенная от удаления из рассмотрения импульсов, наведенных из соседних кабельных линий;

- анализ частотных свойств каждого импульса, позволяющий разделять случайные импульсы помех и повторяющиеся импульсы частичных разрядов;
- для повышения информативности всех диагностических заключений в приборе дополнительно производится измерение температуры и влажности воздуха в помещении контролируемого КРУ.

Второй важной задачей встроенных алгоритмов является определение типа дефекта в изоляции кабельной линии, т. е. определение степени его опасности. Это осуществляется благодаря встроенной в прибор системе «PD-Expert», при помощи которой автоматически производится оценка не только уровня частичных разрядов, но и определяется тип конкретного дефекта в изоляции кабельной линии. Возможности системы «PD-Expert» позволяют даже разделить несколько однотипных дефектов, находящихся в разных местах одного кабеля.

В приборе «CDM-30» реализована функция локации места возникновения дефекта в линии. В качестве зондирующего используется импульс от частичного разряда, возникшего на месте дефекта изоляции. Если в линии нет импульсов достаточной амплитуды, то в качестве зондирующего импульса могут быть использованы импульсы от «наведенной внешней помехи». Наличие в приборе встроенного «on-line» рефлектометра еще в большей степени расширяет диагностические возможности системы.

Стандартная поставка системы мониторинга кабельных линий включает:

- прибор в защитном шкафу, со светодиодами на лицевой панели (опция);
- набор первичных датчиков частичных разрядов, определяемый в соответствии с требованиями заказчика;
- сигнальные кабели для датчиков длиной по 15 метров.

Для измерения частичных разрядов в комплекте с прибором могут поставляться следующие датчики:

- датчики марки «RFCT-7» разъемной конструкции допускающие протекание через них больших токов промышленной частоты, замыкающиеся по экранам кабелей. Такие датчики монтируются на поводках заземления экранов кабеля;
- электромагнитные датчики марки «TEV» для «магнитного» монтажа на поверхности распределительных шкафов КРУ. Используются там, где нельзя применять датчики типа «RFCT».



Рисунок 2. Датчики для систем мониторинга кабельных линий

Выбор необходимых датчиков для создания конкретной системы мониторинга определяется типом контролируемых кабельных линий и условиями их монтажа в КРУ.

Датчики марки «RFCT-7» имеют разъемную конструкцию и внутреннее окно, через которое будет проходить проводник заземления экрана кабельной линии размером 34×34 мм. Датчики марки RFCT (высокочастотные трансформаторы тока) могут регистрировать частичные разряды в проводниках, по которым могут протекать токи промышленной частоты большой амплитуды, до 1000 А. Они специально рассчитаны на использование в системах мониторинга изоляции кабельных линий. Если размеры заземляющего проводника

(шины) кабельной линии не позволяют использовать датчик «RFCT-7», то можно применять разъемный датчик марки «RFCT-4», внутреннее окно которого имеет диаметр 67 мм.

Если при помощи «CDM-30» планируется контролировать состояние изоляции шин, то необходимо использовать специализированные конденсаторы связи «СС», которые монтируются на двух сторонах сборных шин. Конструкция конденсаторов связи позволяет использовать их вместо опорных изоляторов шин.

Интерфейсы связи, реализованные в системе «CDM-30»:

- гальванически изолированный интерфейс RS-485;
- сетевой интерфейс Ethernet для включения в локальную вычислительную сеть;
- интерфейс USB для передачи зарегистрированных данных в переносной компьютер.

## **2. Система мониторинга «CDU-12» для кабельных линий до 110 кВ.**

Для более эффективного контроля кабельных линий, проводимого в режиме реального времени, используется двенадцати канальная система «CDU-12». Она предназначена для непрерывного контроля технического состояния изоляции до 12 кабельных линий под рабочим напряжением, расположенных на одном объекте (КРУ). При необходимости система мониторинга марки «CDU» может быть поставлена с большим количеством измерительных каналов.

В качестве датчиков частичных разрядов в системе «CDU-12» чаще всего используются высокочастотные трансформаторы тока марки «RFCT-7», хотя могут быть использованы датчики и других типов.

В системе мониторинга марки «CDU-12» осуществляется контроль состояния изоляции высоковольтной кабельной линии на основе регистрации и анализа уровня ЧР, и производится автоматическая локализация мест возникновения дефектов в изоляции, выявленных системой по частичным разрядам, как в муфтах, так и в самом кабеле. Встроенные в систему современные алгоритмы отстройки от помех реализованы на аппаратном уровне, позволяя устранить влияние до 95 %, и более, внешних высокочастотных импульсов.

Основное функциональное отличие системы мониторинга марки «CDU-12» от системы мониторинга «CDM-30» заключается в том, что в «CDU-12» измерения частичных разрядов в кабельных линиях по всем 12 измерительным каналам производится непрерывно, в режиме реального времени, а в системе «CDM-30» это производится по всем каналам последовательно, при помощи внутреннего коммутатора. Использование непрерывного контроля позволяет повысить надежность и эффективность работы систем мониторинга, установленных на наиболее ответственных кабельных линиях.

## **3. Система мониторинга «ADM-9» для мониторинга муфт кабельных линий.**

Система «ADM-9» – контроль изоляции высоковольтного оборудования по частичным разрядам при помощи акустических датчиков.

При помощи системы мониторинга марки «ADM-9» можно контролировать:

- состояние изоляции концевых и соединительных муфт кабельных линий;
- состояние изоляции КРУЭ и КРУ различных модификаций;
- состояние изоляции высоковольтного маслонаполненного оборудования – силовых и измерительных трансформаторов, выключателей и т. д. Система мониторинга «ADM-9» (Acoustic Monitor) предназначена для оперативного контроля технического состояния и поиска дефектов изоляции высоковольтного оборудования под рабочим напряжением. В системе «ADM-9» диагностика осуществляется на основе метода регистрации и анализа частичных разрядов, который имеет максимально высокую чувствительность при поиске дефектов в изоляции любого типа.

Акустические датчики системы «ADM-9» устанавливаются непосредственно на поверхности контролируемого оборудования, максимально близко к контролируемой зоне изоляции. Обычно это заземленные или изолированные поверхности, корпуса оборудования, на которых отсутствует высокий потенциал. При установке акустических датчиков

применяются специальные средства, улучшающие акустический контакт с контролируемым объектом.

Технические и алгоритмические возможности системы «ADM-9».

При помощи системы мониторинга марки «ADM-9» эффективно решаются наиболее важные проблемы диагностики состояния оборудования, непосредственно влияющие на эксплуатацию высоковольтного оборудования:

– при помощи одного измерительного прибора марки «ADM-9» может производиться контроль активности частичных разрядов в восьми различных точках оборудования, удаленных друг от друга на расстояние до 30 метров;

– благодаря наличию функции синхронной регистрации сигналов по нескольким измерительным каналам, в приборе «ADM-9» проводится локация места возникновения частичных разрядов внутри баков высоковольтного оборудования;

– на основании анализа полученной информации системой вырабатываются оперативные диагностические решения, и даются рекомендации о возможности дальнейшей эксплуатации оборудования.

Мониторинг концевых муфт высоковольтных кабельных линий.

Акустические датчики системы «ADM-9» могут быть эффективно применены для контроля технического состояния концевых, а при необходимости, и наличии технической возможности (наличии сетевого питания в этой зоне), и промежуточных соединительных муфт высоковольтных кабельных линий. Зона чувствительности акустических датчиков обычно не превышает  $\pm 1$  метр из-за интенсивного затухания акустических сигналов по длине кабеля, поэтому для контроля состояния изоляции самого кабеля такие датчики не применяются.

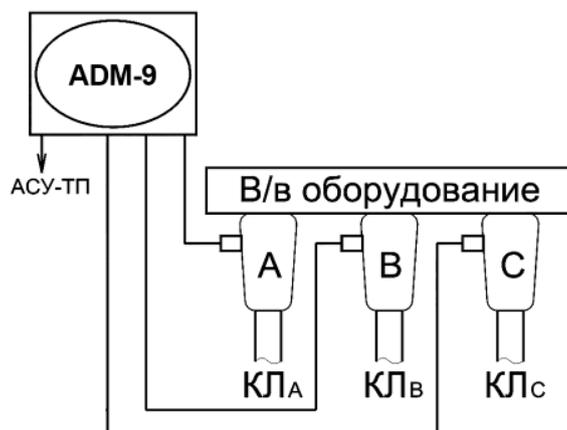


Рисунок 3. Контроль концевых муфт высоковольтных кабельных линий при помощи акустических датчиков

Акустические датчики системы «ADM-9» монтируются непосредственно на корпусе контролируемой муфты, или же, если сама муфта конструктивно недоступна, то на разделанной части кабеля, рядом с муфтой, максимально близко к ней. При установке датчика должен обеспечиваться надежный акустический контакт между датчиком и корпусом муфты.

Зарегистрированные акустические импульсы от частичных разрядов обрабатываются и анализируются в приборе «ADM-9», на выходе которого по каждому каналу формируется сигнал, пропорциональный интенсивности частичных разрядов «PDI», учитывающей количество и амплитуду зарегистрированных импульсов частичных разрядов. Полученная информация, и диагностические заключения о состоянии изоляции, оперативно передаются в систему АСУ ТП более высокого уровня.

Стандартная поставка системы «ADM-9» для мониторинга состояния изоляции по частичным разрядам включает в себя:

– измерительный прибор «ADM-9» в защитном корпусе;

- набор акустических датчиков для регистрации частичных разрядов в соответствии с заказной спецификацией;
- сигнальные коаксиальные кабели длиной по 15 метров для подключения датчиков;
- инструкция по эксплуатации системы на CD;
- программное обеспечение «iNVA» для реализации функции мониторинга на персональном компьютере.

Внешние интерфейсы «ADM-9».

Интерфейсы связи, реализованные в системе мониторинга марки «ADM-9»:

- гальванически изолированный интерфейс RS-485;
- сетевой интерфейс Ethernet для включения регистрирующего прибора в локальную вычислительную сеть по оптической линии, и передачи информации к компьютеру с программным обеспечением «iNVA»;
- интерфейс USB для передачи зарегистрированных данных в переносной компьютер.

#### Литература

1. Руссов, В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования / В.А. Руссов. – М. : Энергия, 2011. – 370 с.
2. CDM-30 – система мониторинга состояния изоляции кабельных линий 6÷10 кВ по частичным разрядам [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://dimrus.com/cdm.html>. – Дата доступа : 11.05.2018.
3. ADM-9 – система контроля изоляции высоковольтного оборудования по частичным разрядам при помощи акустических датчиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://dimrus.com/adm.html>. – Дата доступа : 11.05.2018.
4. Организация мониторинга технического состояния высоковольтных кабельных линий. – Пермь : ООО «DIMRUS», 2015. – 32 с.

УДК 621.3

## ВЫЯВЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Кондратеня В.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Пономаренко Е.Г.

Известно, что наиболее тяжелым повреждением трансформатора является любое (витковое, междуфазное, на землю) внутреннее короткое замыкание (КЗ). Внутренние КЗ в силовых трансформаторах в значительной степени связаны с повреждениями обмоток, высоковольтных вводов и РПН.

Возникновение внутренних КЗ в процессе эксплуатации обусловлено развитием физико-химических процессов, ухудшающих изоляцию трансформаторов и высоковольтных вводов, недостаточной электродинамической стойкостью обмоток к токам КЗ, длительными неотключениями сквозных токов КЗ, приводящих к выгоранию витковой изоляции, нарушением контактных соединений.

Данная научная работа посвящена характеристикам основных показателей ухудшения состояния изоляции вследствие развития физико-химических процессов, являющихся возможными причинами возникновения внутренних КЗ в силовых трансформаторах.

Короткое замыкание – это явление в электротехнике, которое сопровождается замыканием (электрическим соединением) между собой двух или трех фаз, фазы на нулевой проводник, замыкание фазного проводника на землю в сетях с глухозаземленной, а также эффективно заземленной нейтралью в трехфазной сети. Кроме того, коротким замыканием является межвитковое замыкание в электрических машинах.

Характерные особенности данного процесса – это значительное увеличение тока и падение напряжения. Рост тока происходит до значений, превышающих номинальный в несколько раз.

Общепринятое буквенное сокращение данного явления – КЗ. В зависимости от количества замыкаемых фаз различают несколько видов коротких замыканий. Для наглядности изобразим схемы, которые иллюстрируют тот или иной тип КЗ в трехфазной электрической сети.

Диэлектрическими потерями называют энергию, рассеиваемую в электроизоляционном материале под воздействием на него электрического поля.

Способность диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле обычно характеризуют углом диэлектрических потерь, а также тангенсом угла диэлектрических потерь. При испытании диэлектрик рассматривается как диэлектрик конденсатора, у которого измеряется емкость и угол  $\delta$ , дополняющий до  $90^\circ$  угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи. Этот угол называется углом диэлектрических потерь.

Следует отметить, что критерием загрязнения поверхности твердой изоляции трансформатора может быть неоправданно малое значение тангенса угла потерь маслябарьерной изоляции, измеренное по нормальной схеме. Это обуславливается токами утечки на заземленные части, минуя измерительную систему при испытаниях изоляции. Далее приведены предельные по малости значения тангенса угла потерь незагрязненной маслябарьерной изоляции в зависимости от значений тангенса угла потерь масла  $\text{tg}\delta$ , в трансформаторе, измеренного при температуре испытаний.

В любом случае измеренный тангенс угла потерь маслябарьерной изоляции должен быть больше 0,17%. Тангенс угла потерь менее 0,17% означает начало опасного перераспределения электрического поля в изоляции, которое в дальнейшем может привести к внутреннему КЗ. Это необходимо принимать во внимание при решении вопроса о дальнейшей эксплуатации трансформатора.

На основании накопленного за последние годы опыта эксплуатации, а также рекомендаций СИГРЭ и МЭК необходимо внесение некоторых изменений в РД «Объем и

нормы испытаний электрооборудования» (РД 34.45-51.300-97) в части контроля физико-химических процессов, приводящих к загрязнению изоляции и масла вследствие увлажнения, газовыделения из изоляции и коллоидного старения масла, с целью уменьшения возможности развития внутренних КЗ предлагается:

– допустимое значение влагосодержания твердой изоляции вновь вводимых трансформаторов и трансформаторов, прошедших капитальный ремонт, принять не выше 1 % по массе твердой изоляции, а эксплуатируемых трансформаторов не выше 2 % по массе;

– определение влагосодержания твердой изоляции расчетным путем по результатам измерений  $\text{tg}\delta$  изоляции и  $\text{tg}\delta$  масла должно производиться на трансформаторе, прогретом до 60 °С;

– ввести контроль мутности масла высоковольтных герметичных вводов, характеризующий коллоидное старение масла.

Целесообразно применение непрерывного контроля частичных разрядов для обнаружения предпробивных стадий процессов в силовых трансформаторах до перехода частичных разрядов в электрическую дугу.

УДК 621.3

## ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Исмаил Абдаллах

Научный руководитель – Климкович П.И.

Изоляция – элемент конструкции оборудования, препятствующий прохождению через него электрического тока.

Для изоляции используются материалы с диэлектрическими свойствами: стекло, керамика, многочисленные полимеры, слюда.

Также существует воздушная изоляция, в которой роль изолятора выполняет воздух, а конструктивные элементы фиксируют пространственную конфигурацию изолируемых проводников так, чтобы обеспечить необходимые воздушные промежутки. Исторически первые образцы изолированных медных проводов имели изоляцию из навитой бумаги, пропитанной парафином, резины.

Сейчас резиновая изоляция применяется редко и в основном для проводов, работающих в расширенном температурном диапазоне. Для изоляции гибких проводов при повышенных температурах используется фторопласт, для экстремально высоких – провод заключается в бусы из керамики. Для изоляции высоких напряжений используется резина без сажевого наполнителя (белая), так как сажа (углерод) проводит ток и может стать причиной электрического пробоя.

Габариты изоляционной конструкции определяются рабочим напряжением установки и длительной прочностью изоляции при заданном сроке службы.

Изоляция электроустановок разделяется на внутреннюю и внешнюю (рисунок 1).

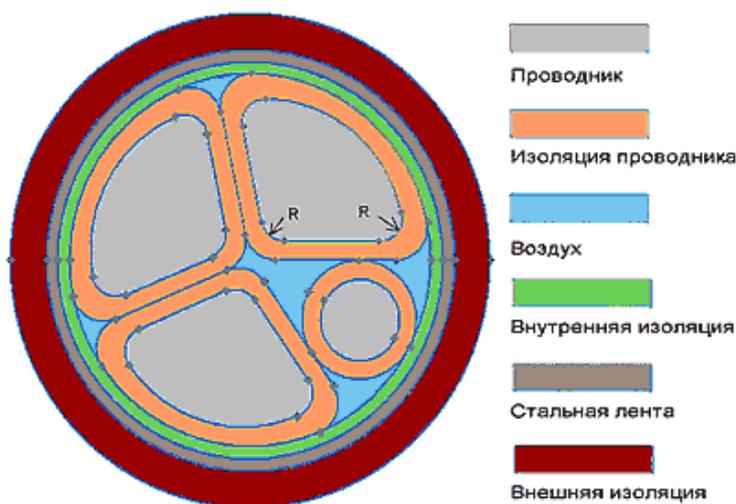


Рисунок 1. Схема изоляции (внутренняя и внешняя)

Внешняя изоляция электроустановок – изоляция, которая работает в атмосферном воздухе. Электрическая прочность определяется пробоем воздушных промежутков или перекрытием в воздухе по изолирующим поверхностям. Признак внешней изоляции: зависимость электрической прочности от атмосферных условий. Пример: воздушные промежутки между токоведущими частями и землей на линиях электропередачи и подстанциях, а также наружная поверхность изоляторов, соприкасающихся с воздухом.

Внутренняя изоляция – изоляция, электрическая плотность которой практически не зависит от внешних атмосферных условий. Пример: изоляция обмоток масляного трансформатора между собой и от магнитопровода.

Имеются конструкции, в которых применяется комбинация внешней и внутренней изоляций.

Пример: вводы трансформаторов и выключателей. Внешняя часть вводов работает в атмосферном воздухе, а внутренняя – в трансформаторном масле.

Диэлектрики, используемые для изготовления внутренней изоляции высоковольтного оборудования должны обладать комплексом высоких электрических, теплофизических и механических свойств и обеспечивать:

- необходимый уровень электрической прочности;
- тепловые и механические характеристики изоляционной конструкции при размерах, которым соответствуют высокие технико-экономические показатели всей установки в целом.

Диэлектрические материалы должны также:

- обладать хорошими технологическими свойствами, т. е. должны быть пригодными для высокопроизводительных процессов изготовления внутренней изоляции;
- удовлетворять экологическим требованиям, т. е. не должны содержать или образовывать в процессе эксплуатации токсичные продукты, а после отработки всего ресурса они должны поддаваться переработке или уничтожению без загрязнения окружающей среды;
- не быть дефицитными и иметь такую стоимость, при которой изоляционная конструкция получается экономически целесообразной.

В ряде случаев к указанным выше требованиям могут добавляться и другие, обусловленные спецификой того или иного вида оборудования. Например, материалы для силовых конденсаторов должны иметь повышенную диэлектрическую проницаемость; материалы для камер выключателей – высокую стойкость к термоударам и воздействиям электрической дуги.

Длительная практика создания и эксплуатации различного высоковольтного оборудования показывает, что во многих случаях весь комплекс требований наилучшим образом удовлетворяется при использовании в составе внутренней изоляции комбинации из нескольких материалов, дополняющих друг друга и выполняющих несколько различные функции.

Так, только твердые диэлектрические материалы обеспечивают механическую прочность изоляционной конструкции; обычно они имеют и наиболее высокую электрическую прочность. Детали из твердого диэлектрика, обладающего высокой механической прочностью, могут выполнять функцию механического крепления проводников.

Высокопрочные газы и жидкие диэлектрики легко заполняют изоляционные промежутки любой конфигурации, в том числе тончайшие зазоры, поры и щели, чем существенно повышают электрическую прочность, особенно длительную.

Использование жидких диэлектриков позволяет в ряде случаев значительно улучшить условия охлаждения за счет естественной или принудительной циркуляции изоляционной жидкости.

Целесообразность или необходимость применения внутренней изоляции, а не окружающего нас воздуха обусловлена рядом причин:

- материалы для внутренней изоляции обладают значительно более высокой электрической прочностью (в 5–10 раз и более), что позволяет резко сократить изоляционные расстояния между проводниками и уменьшить габариты оборудования. Это важно с экономической точки зрения;
- отдельные элементы внутренней изоляции выполняют функцию механического крепления проводников, жидкие диэлектрики в ряде случаев значительно улучшают условия охлаждения всей конструкции.

В установках высокого напряжения и оборудования энергосистем используется несколько видов внутренней изоляции. Наиболее широкое распространение получили:

- бумажно-пропитанная (бумажно-масляная) изоляция;
- маслобарьерная изоляция;
- изоляция на основе слюды;
- пластмассовая;

– газовая.

Эти разновидности обладают определенными достоинствами и недостатками, имеют свои области применения. Однако их объединяют некоторые общие свойства:

– сложный характер зависимости электрической прочности от длительности воздействия напряжения;

– в большинстве случаев необратимость разрушения при пробое;

– влияние на поведение в эксплуатации механических, тепловых и других внешних воздействий;

– в большинстве случаев подверженность старению.

При нормальных атмосферных условиях электрическая прочность воздушных промежутков относительно невелика. В большинстве изоляционных конструкций при приложении высокого напряжения создается резко неоднородное электрическое поле. Электрическая прочность в таких полях при расстоянии между электродами 1–2 м составляет приблизительно 5 кВ/см, а при расстояниях 10–20 м снижается до 2,5–1,5 кВ/см. В связи с этим габариты воздушных ЛЭП и РУ при увеличении номинального напряжения быстро возрастают. Целесообразность использования диэлектрических свойств воздуха в энергетических установках разных классов напряжения объясняется меньшей стоимостью и сравнительной простотой создания изоляции, а также способностью воздушной изоляции полностью восстанавливать электрическую прочность после устранения причины пробоя разрядного промежутка.

Для внешней изоляции характерна зависимость электрической прочности от метеорологических условий (давления, температуры, абсолютной влажности воздуха, вида и интенсивности атмосферных осадков), а также от состояния поверхностей изоляторов, т. е. количества и свойства загрязнений на них. В связи с этим воздушные изоляционные промежутки выбирают так, чтобы они имели требуемую электрическую прочность при неблагоприятных сочетаниях давления, температуры и влажности воздуха.

Электрическую прочность вдоль изоляторов наружной установки измеряют в условиях, соответствующих разным механизмам разрядных процессов, а именно, когда поверхности чистые и сухие, чистые и смачиваются дождем, загрязнены и увлажнены. Разрядные напряжения, измеренные при указанных состояниях, называют соответственно сухоразрядными, мокроразрядными и грязе- или влагоразрядными.

Основной диэлектрик внешней изоляции – атмосферный воздух – не подвержен старению, т. е. независимо от воздействующих на изоляцию напряжений и режимов работы оборудования его средние характеристики остаются неизменными во времени.

### Литература

1. Изоляция электрических установок // [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа : <http://electricalschool.info/main/visokovoltny/418-izoljacija-jelektricheskikh-ustanovok.html>. – Дата доступа : 12.10.2017.

2. Для чего нужна изоляция? // [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа : <http://www.isotecti.ru/Voprosy-i-otvety/Osnovy-izolyacii/Dlya-chego-nuzhna-izolyaciya>. – Дата доступа : 14.10.2017.

3. Основные виды и электрические характеристики внутренней изоляции электроустановок // [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа : <http://electricalschool.info/main/visokovoltny/437-osnovnye-vidy-i-jelektricheskie.html>. – Дата доступа : 27.09.2017.

4. Изоляция силовых трансформаторов // [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа : [http://www.ros-electro.ru/articles/articles\\_895.html/](http://www.ros-electro.ru/articles/articles_895.html/). – Дата доступа : 25.09.2017.

5. Кабель с бумажной пропитанной изоляцией // [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа : <http://snabelectrica.ru/products/power-cable/cabel-paperisolation>. – Дата доступа : 17.10.2017.

6. Двойная изоляция // [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа : <http://electricalschool.info/main/electrobezopasnost/345-dvojnjaja-izoljacija-zashhita-ot.html>. – Дата доступа : 17.10.2017.

УДК 621.3

## **ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ФАКТОР КАК ОСНОВОПОЛАГАЮЩАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ В РАЗРАБОТКЕ КОНЦЕПЦИИ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Дробышев С.А.

Научный руководитель – Сапожникова А.Г.

Распределительная электрическая сеть среднего напряжения является основным звеном, определяющим показатели качества и надежности электроснабжения потребителей. Распределительная сеть состоит из подстанций среднего напряжения, таких как РП, РТП, ТПП, ТП, соединенных между собой и центрами питания с помощью кабельных линий. По оценкам зарубежных экспертов, доля отключений, связанных с повреждениями в распределительной сети среднего напряжения, при расчете суммарного индекса SAIDI составляет 65 %. Одной из причин такого высокого значения является недостаточный уровень автоматизации сетей среднего напряжения.

Особое значение в решении этой проблемы в городах и сельской местности играют распределительные воздушные электрические сети среднего напряжения 6–10 кВ. По ним осуществляется поставка электроэнергии довольно широкому кругу потребителей – почти всем сельскохозяйственным потребителям (птицефабрикам, фермерским хозяйствам и т. п.), коттеджным поселкам, а также городам с малоэтажной застройкой, средним и малым промышленным предприятиям, электрифицированным железным дорогам, газопроводам и нефтепроводам. Практически все электроустановки указанных потребителей получают электроэнергию от сетей данного класса напряжения.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в сетях 6–10 кВ стоит проблема повышения надежности электроснабжения потребителей, которая решается проведением ряда мероприятий.

Первоочередным мероприятием, направленным на повышение надежности электроснабжения в условиях значительной протяженности распределительной сети 10 кВ и нашедшим широкое применение, является многократное резервирование линий. Однако, как показывает практика, традиционные способы резервирования недостаточно эффективны. Требуется их дальнейшее совершенствование. Кроме того, их наличие усложняет оперативное обслуживание сети, снижает уровень безопасности.

Ситуация усугубляется проблемами с защитой и автоматикой протяженных сетей 6–10 кВ. Сегодня свыше 60 % устройств релейной защиты и автоматики выработали свой ресурс и более 80 % – морально устарели.

Анализ зарубежного опыта говорит о том, что выходом из сложившейся ситуации (при этом, как правило, более дешевым) может быть децентрализованная автоматизация аварийных режимов работы распределительной сети.

Аппаратом, который позволяет реализовать принцип децентрализованной автоматизации сети является вакуумный реклоузер.

Реклоузер (от английского recloser – переключатель) – пункт автоматического секционирования воздушных распределительных сетей столбового исполнения, объединивший вакуумный выключатель; систему первичных преобразователей тока и напряжения; автономную систему оперативного питания; микропроцессорную систему релейной защиты и автоматики; систему портов для подключения устройств телемеханики; комплекс программного обеспечения.

Реклоузер объединил практически все виды противоаварийной защиты и автоматики, применяемые в распределительных сетях: многократное АПВ (автоматическое повторное включение), АВР (автоматический ввод резерва), МТЗ (максимальная токовая защита), ЗЗЗ (защиты от замыканий на землю), и др. На протяжении всего срока службы реклоузер не

нуждается в каком-либо обслуживании. На западе такие устройства относятся к системе «maintenance-free» (англ. – без обслуживания).

Реклоузер – это надежное и довольно простое в эксплуатации устройство, позволяющее отключать токи короткого замыкания за минимальное время, при этом за такое же время восстанавливать электроснабжение на не поврежденных участках.

Что касается опыта внедрения и эксплуатации реклоузеров, то за рубежом подобные устройства успешно применяются уже несколько десятков лет.

Основной экономический эффект от применения децентрализованной автоматизации распределительной сети на базе реклоузеров – снижение ущерба сетевой компании от недоотпуска электроэнергии потребителям. К техническому эффекту следует отнести снижения простаивающей установленной мощности трансформаторов и повышение надежности электроснабжения потребителей.

Помимо основной составляющей эффекта, при применении децентрализованной автоматизации на базе реклоузеров снижаются затраты на обслуживание линейного оборудования сети; расследование аварий, связанных с неправильными действиями РЗА; поиск и локализацию поврежденного участка линии электропередачи; ремонтные работы; сбор, обработку и запись информации о режимах и событиях.

Внедрение реклоузеров в распределительные сети 6–10 кВ является перспективным, технологически оправданным мероприятием. Проектирование и реализация электрических сетей с применением реклоузеров позволит в недалеком будущем вывести распределительные сети среднего напряжения на новый уровень автоматизации и управления.

Интеллектуальная электрическая сеть (Smart Grid) – это глобальная технология развития электроэнергетической системы. Основными предпосылками развития технологии Smart Grid являются повышение надежности и качества электроснабжения потребителей, а также развитие информационных технологий.

Основные цели внедрения «интеллекта» в электрическую сеть – наблюдаемость, контролируемость и автоматизация управления электроэнергетической системы.

Принцип технологии заключался в модернизации электроэнергетической системы с целью повышения надежности, контроля и оптимизации энергопотребления всех элементов и участников сети.

Отличительной особенностью сети Smart Grid является усиление интеграции всех субъектов электроэнергетики и потребителей на базе двустороннего коммуникационного обмена.

В части исполнения линий электропередачи сеть Smart Grid подразумевает сложную разветвленную сеть. Принцип традиционного радиального построения распределительной электрической сети заменяется сложной неструктурированной сетью с наличием пунктов секционирования, малых генераций, накопителей энергии.

Информационно-измерительная система мониторинга, диагностики и управления электрической сетью Smart Grid строится на основе информации, поступающей от самой сети. Это позволяет системе управления автоматически изменять конфигурацию сети для наиболее оптимального и надежного электроснабжения потребителей.

Информация поступает от интеллектуальных электронных устройств (intelligent electronic device – IED), которые включают в себя первичные преобразователи и устройства обработки и передачи данных. Современные IED позволяют получать формы кривых тока и напряжения, их симметричные составляющие, мощность, частоту, а также накапливать измеренную информацию, реализовывать запрограммированный алгоритм действий и передавать данные на пункты и в центры сбора и обработки данных.

Smart Grid – это интеграция технологий электроэнергетики, электроники, телекоммуникаций, сенсоров, программного обеспечения и математики. Реализация перехода к сети Smart Grid требует значительных инвестиций, поэтому на первоначальном этапе необходимо провести технико-экономическое обоснование внедрения технологии.

Развитие интеллектуальной распределительной электрической сети в Республике Беларусь имеет свои отличия от развития аналогичной сети за рубежом, где Smart Grid – это двухсторонний обмен цифровыми данными между всеми участниками электрической сети. В Республике Беларусь развитие Smart Grid предусматривает прежде всего комплексную модернизацию существующей сети.

В заключении хотелось бы отметить, что все электроснабжающие организации должны своевременно обращать серьезное внимание на надежность электроснабжения потребителей. При этом надо учитывать, что проблемы надежности в технике в целом и в электроэнергетике в частности неразрывно связаны с экономикой. Неоправданная экономия затрат на обеспечение надежности электроснабжения может привести к серьезным авариям в энергосистеме.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработка концепций автоматизации распределительных сетей среднего напряжения напрямую связана с экономическим фактором.

УДК 621.316

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТОКОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПРОЛЕТОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПО УСЛОВИЮ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО СБЛИЖЕНИЯ ФАЗ

Баран А.Г., Баран Ю.Г.

Научный руководитель – Климкович П.И.

Согласно ГОСТ Р 50254-92 оценка электродинамической стойкости гибких проводов должна производиться по двум условиям [1]:

$$S_{\max} \leq S_{\text{доп}},$$

$$T_{\max} \leq T_{\text{доп}},$$

где  $S_{\max}$ ,  $T_{\max}$ ,  $S_{\text{доп}}$ ,  $T_{\text{доп}}$  – соответственно максимальные и допустимые отклонения и тяжения гибких проводов при коротком замыкании (КЗ).

Оба параметра непосредственно связаны с током КЗ. С помощью вычислительного эксперимента изменением тока КЗ можно установить максимально допустимое значение тока КЗ для каждого из условий. Эти значения по двум условиям могут не совпадать, поэтому из двух полученных значений выбирается наименьшее, которое и будет являться расчетным током электродинамической стойкости.

Вычислительный эксперимент проводится по компьютерной программе FleBus. Было исследовано 9 вариантов длин пролета от 20 до 60 м с шагом 5 м. Пролеты длиной 20–30 м соответствуют напряжению 110 кВ, 35–40 м – 220 кВ и 45–60 м – 330 кВ. Междупазное расстояние согласно [2] на напряжение 110 кВ равно 3 м, на 220 кВ – 4 м и на 330 кВ – 6 м. Были рассмотрены следующие марки проводов, которые наиболее часто встречаются в ОРУ: АС-185/29, АС-500/27 и АС-800/105. Параметры рассматриваемых проводов представлены в таблице 1. Данные о гирляндах изоляторов в зависимости от номинального напряжения установки приведены в таблице 2. Влияние гибкости порталов в расчетах не учитывалось.

Таблица 1 – Параметры провода

Провод	АС-185/29	АС-500/27	АС-800/105
Вес одного метра провода, даН/м	0,729	1,538	3,093
Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	210,0	507,6	926,0
Диаметр провода, мм	18,8	27,4	39,7
Модуль упругости материала провода, даН/мм <sup>2</sup>	8193,0	7018,0	7853,0

Таблица 2 – Параметры гирлянд изоляторов

Класс напряжения ОРУ, кВ	Марка изолятора	Длина гирлянды изоляторов, м	Вес гирлянды изоляторов, даН	Число изоляторов в цепи, шт	Число цепей, шт
110	ПС 6А	1,5	41	9	1
220	ПС 6А	2,4	69	16	1
330	ПС 6А	3,3	204	22	2

За расчетное принято двухфазное КЗ, т. к. максимальное сближение соседних фаз гибких шин наблюдается при данном виде КЗ.

За максимально допустимый ток электродинамической стойкости гибких шин принималось значение тока КЗ, соответствующее минимально допустимому расстоянию между проводниками соседних фаз при их сближении после отключения КЗ. Согласно [2] минимально допустимое расстояние для:

- номинального напряжения 110 кВ составляет 0,45 м;
- номинального напряжения 220 кВ составляет 0,95 м;

– номинального напряжения 330 кВ составляет 1,40 м.

Результаты расчета тока электродинамической стойкости для гибких шин ОРУ, исходя из условия максимально допустимого сближения фаз, для провода АС-185/29 представлены в таблице 3, для провода АС-500/27 – в таблице 4, для провода АС-800/105 – в таблице 5.

Таблица 3 – Токи электродинамической стойкости, кА

Время КЗ, с	Длина пролета, м								
	20	25	30	35	40	45	50	55	60
	$a_{\min \text{ доп}} = 0,45 \text{ м}$			$a_{\min \text{ доп}} = 0,95 \text{ м}$		$a_{\min \text{ доп}} = 1,40 \text{ м}$			
0,1	–	33,38	27,15	27,21	25,40	43,00	45,81	49,36	37,02
0,2	20,90	29,15	23,50	22,65	20,93	35,78	38,78	42,12	32,23
0,3	–	26,85	21,80	20,05	18,35	31,52	34,78	37,95	27,25
0,4	–	17,00	12,60	18,40	16,65	29,75	32,68	35,58	25,61
0,5	17,55	15,80	11,20	17,30	15,45	28,05	31,69	35,17	25,19

Таблица 4 – Токи электродинамической стойкости, кА

Время КЗ, с	Длина пролета, м								
	20	25	30	35	40	45	50	55	60
	$a_{\min \text{ доп}} = 0,45 \text{ м}$			$a_{\min \text{ доп}} = 0,95 \text{ м}$		$a_{\min \text{ доп}} = 1,40 \text{ м}$			
0,1	–	36,62	33,52	46,67	30,60	54,40	54,70	51,35	39,45
0,2	–	31,05	27,87	27,47	24,97	45,19	44,19	43,38	33,15
0,3	39,65	29,05	25,65	23,45	22,10	40,75	39,95	38,34	28,98
0,4	–	28,05	24,42	21,22	20,00	37,48	36,50	34,50	27,20
0,5	–	–	24,50	19,80	18,55	35,74	33,98	32,10	24,78

Таблица 5 – Токи электродинамической стойкости, кА

Время КЗ, с	Длина пролета, м								
	20	25	30	35	40	45	50	55	60
	$a_{\min \text{ доп}} = 0,45 \text{ м}$			$a_{\min \text{ доп}} = 0,95 \text{ м}$		$a_{\min \text{ доп}} = 1,40 \text{ м}$			
0,1	–	47,58	–	58,10	42,53	94,80	89,30	84,85	80,25
0,2	–	40,05	38,97	48,28	34,68	77,85	73,65	70,32	65,70
0,3	–	37,55	36,25	44,45	30,76	73,10	67,60	63,90	59,25
0,4	–	37,40	35,18	42,30	28,20	45,16	64,95	60,64	55,15
0,5	–	–	24,90	41,85	26,60	41,60	39,70	38,00	52,80

Анализ результатов расчета показывает, что для пролетов с междуфазным расстоянием более чем в два раза превышающим стрелу провеса провода, опасное сближение фаз не наступает. Поэтому в этом случае ток электродинамической стойкости будет определяться из рассмотрения максимально допустимого тяжения провода при КЗ.

#### Литература

1. ГОСТ Р 50254-92. Короткие замыкания в электроустановках: Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. – Введ. 01.01.94. – М.: Госстандарт России, 1993. – 57 с.
2. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.

УДК 621.316

## ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ТОК ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ОШИНОВКИ ПРОЛЕТОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 110 КВ БЕЗ УЧЕТА СПУСКОВ К АППАРАТАМ

Баран А.Г.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Пономаренко Е.Г.

При выполнении исследования использованы типовые материалы для проектирования 407-03-539.90 «Открытые распределительные устройства 110 кВ на унифицированных конструкциях». С помощью компьютерной программы FleBus проведен вычислительный эксперимент по оценке влияния продолжительности короткого замыкания на параметры электродинамической стойкости гибкой ошиновки шинного пролета длиной 27 м типовых конструкций распределительных устройств 110 кВ для различных сечений проводов (рисунок 1). Исследования выполнены для пролетов с одним проводом в фазе АС-150/19, АС-185/25, АС-240/32, АС-300/39, АС-400/51, АС-500/27, АС-500/64, а также с расщепленной фазой с проводами 2×АС-300/39, 2×АС-400/51, 2×АС-500/27, 2×АС-500/64. Параметры конструктивных элементов распределительного устройства приняты по типовому проекту 407-03-539.90. Расчеты выполнены для климатического режима: температура воздуха 25 °С, отсутствие ветра и гололедного отложения.

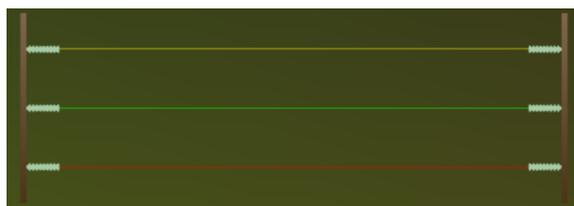
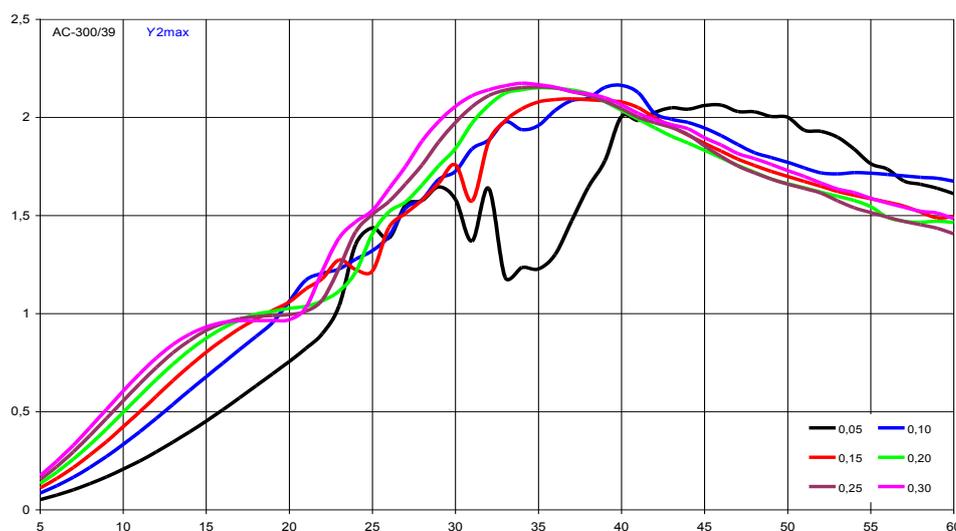


Рисунок 1. Геометрия исследуемого пролета

Для упомянутых сечений проводов построены семейства зависимостей максимального отклонения проводов в момент их сближения ( $Y_{2max}$ ) и минимального расстояния между фазными проводниками ( $a_{min}$ ) от тока двухфазного КЗ при продолжительности КЗ от 0,05 с до 0,30 с с шагом 0,05 с.

Рисунок 2. Зависимости  $Y_{2max} = f(I_{KЗ})$  при различной продолжительности КЗ для АС-300/39

В качестве примера выполненных исследований на рисунках 2–4 представлены упомянутые зависимости для проводов АС-300/39, АС-500/64 и 2×АС-300/39.

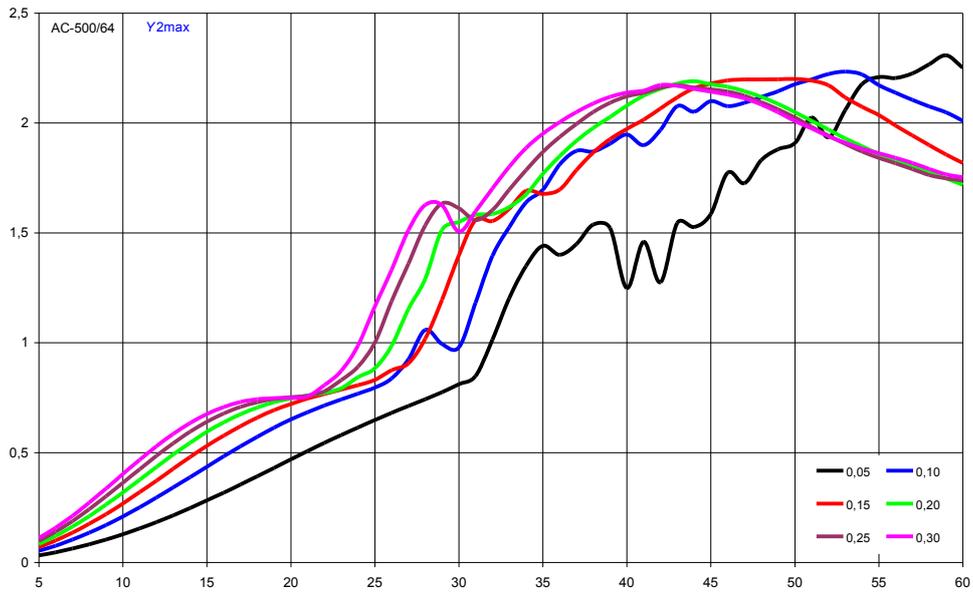


Рисунок 3. Зависимости  $Y_{2max} = f(I_{кз})$  при различной продолжительности КЗ для AC-500/64

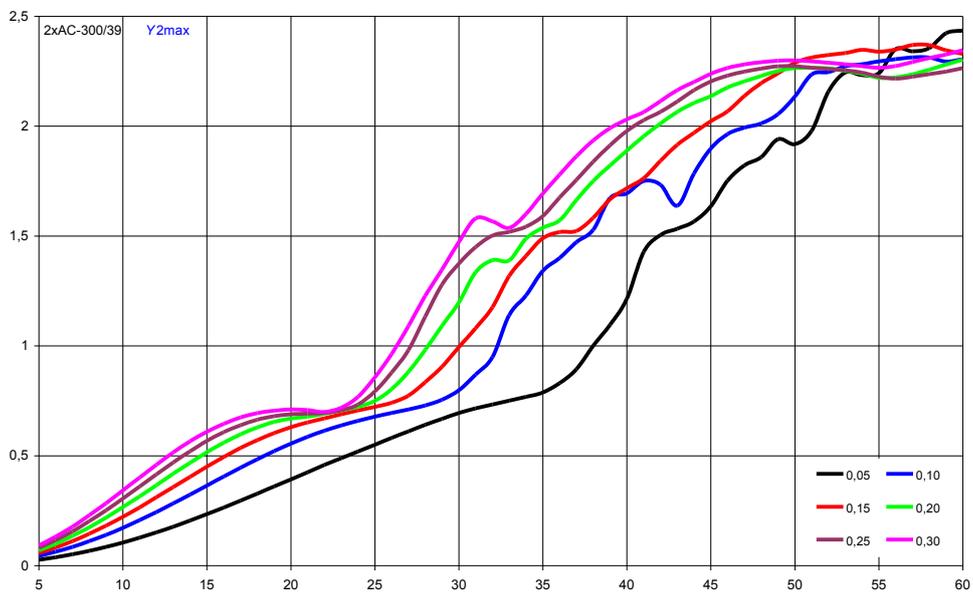


Рисунок 4. Зависимости  $Y_{2max} = f(I_{кз})$  при различной продолжительности КЗ для 2xAC-300/39

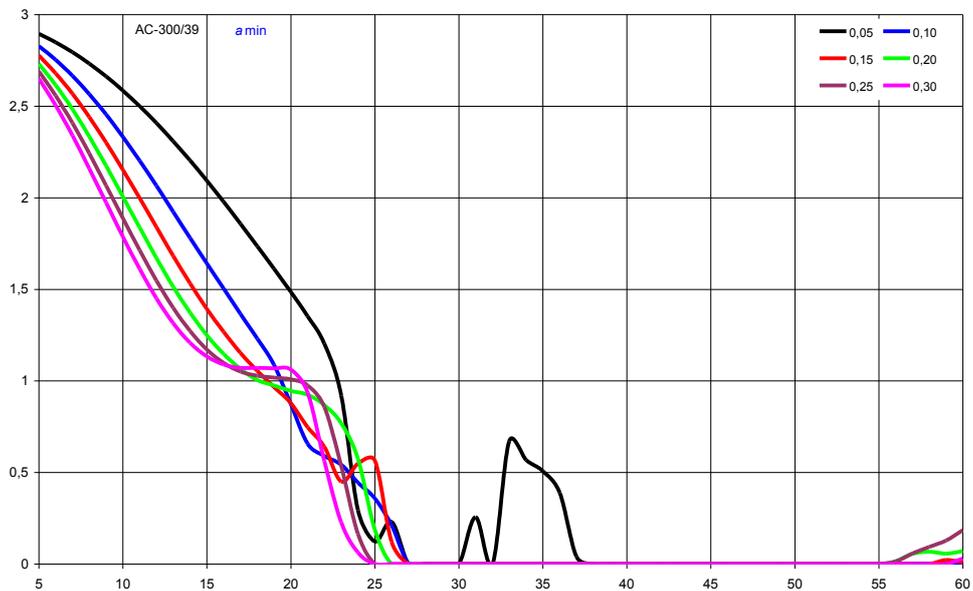


Рисунок 5. Зависимости  $a_{min} = f(I_{кз})$  при различной продолжительности КЗ для AC-300/39

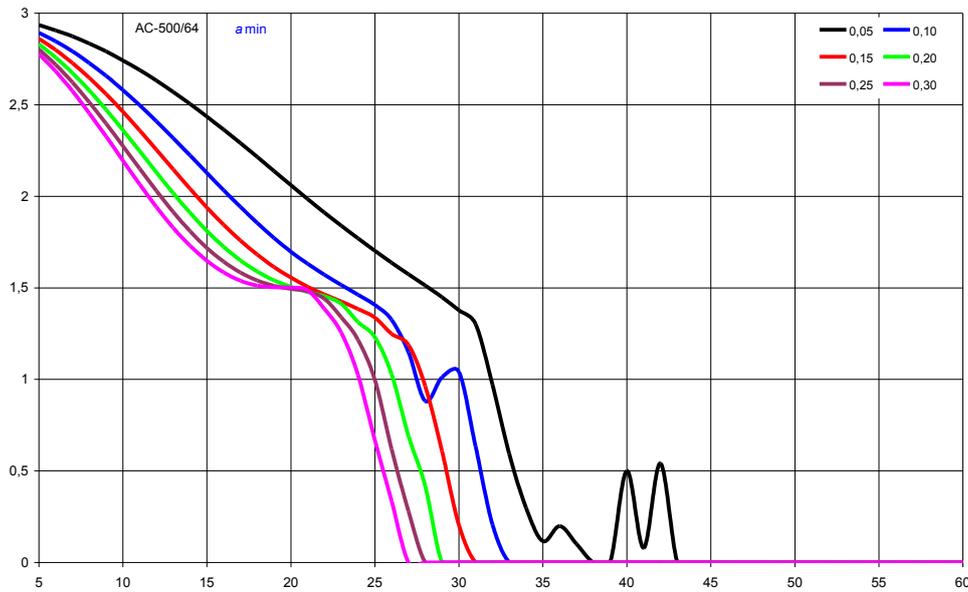


Рисунок 6. Зависимости  $a_{\min} = f(I_{K3})$  при различной продолжительности КЗ для АС-500/64

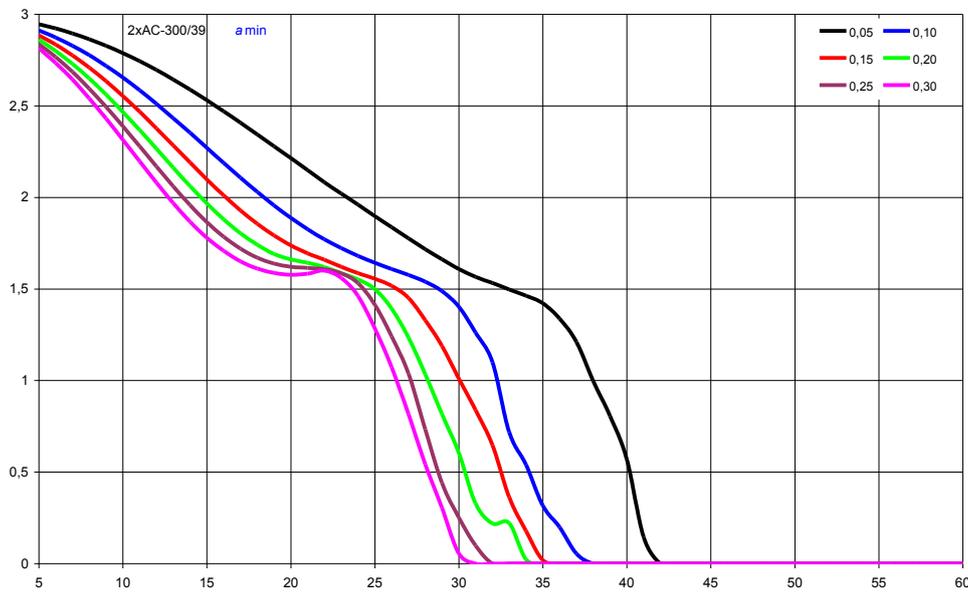


Рисунок 7. Зависимости  $a_{\min} = f(I_{K3})$  при различной продолжительности КЗ для 2xAC-300/39

Построенные зависимости позволяют определить ток электродинамической стойкости данного шинного пролета распределительного устройства 110 кВ в зависимости от продолжительности воздействия тока КЗ по условию максимально допустимого сближения фаз, которое, согласно [1], для напряжения 110 кВ составляет 0,4 м.

### Литература

1. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.

УДК 621.316

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ГИБКОЙ ОШИНОВКИ ШИННЫХ ПРОЛЕТОВ ТИПОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 110 кВ

Баран А.Г., Васильева А.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Пономаренко Е.Г.

В электроустановках высокого напряжения широко применяются токоведущие конструкции с гибкими проводами [1–4]. Особенностью их динамики является недопустимое сближение и даже схлестывание соседних фаз в результате электродинамического действия токов короткого замыкания (КЗ) [2–4]. Электродинамические воздействия токов КЗ – ключевые факторы, влияющие на выбор геометрических размеров и механической прочности токоведущих конструкций с гибкими проводами.

С помощью компьютерной программы (КП) FleBus проведен вычислительный эксперимент по оценке электродинамической стойкости шинных пролетов типовых конструкций распределительного устройства (РУ) 110 кВ длиной 27 м с различным количеством и сочетанием отпаек к конструктивным элементам РУ (рисунок 1). Количество отпаек в исследуемых пролетах (не более трех) ограничивается техническими особенностями используемого инструмента исследования – КП FleBus [4]. Исследования выполнены для пролетов с одним проводом в фазе АС-150/19, АС-185/25, АС-240/32, АС-300/39, АС-400/51, АС-500/27, АС-500/64 и с расщепленной фазой с проводами 2×АС-300/39, 2×АС-400/51, 2×АС-500/27, 2×АС-500/64. Параметры конструктивных элементов РУ приняты по типовому проекту 407-03-539.90 «Открытые распределительные устройства 110 кВ на унифицированных конструкциях». Расчеты выполнены для климатического режима: температура воздуха 25 °С, отсутствие ветра и гололедного отложения.

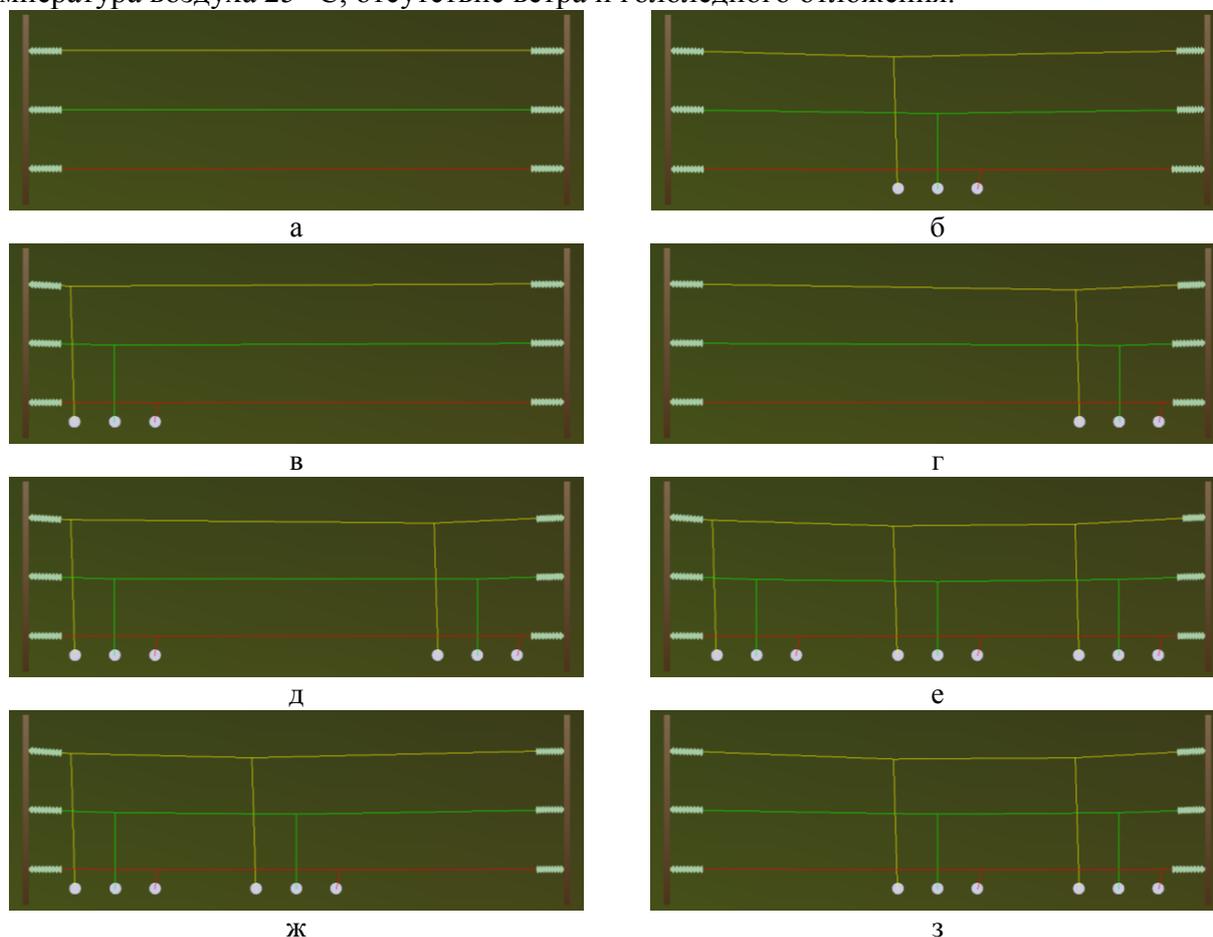


Рисунок 1. Геометрия шинных пролетов длиной 27 м типовой конструкции ОРУ 110 кВ

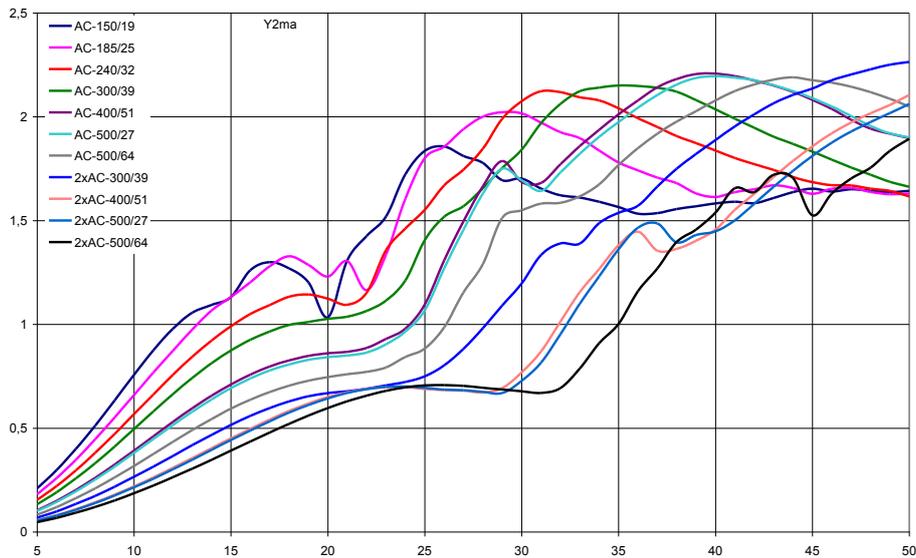


Рисунок 2. Зависимости  $Y_{2\max} = f(I_{K3})$  для проводов различных сечений (пролет рисунок 1а) при продолжительности КЗ 0,2 с

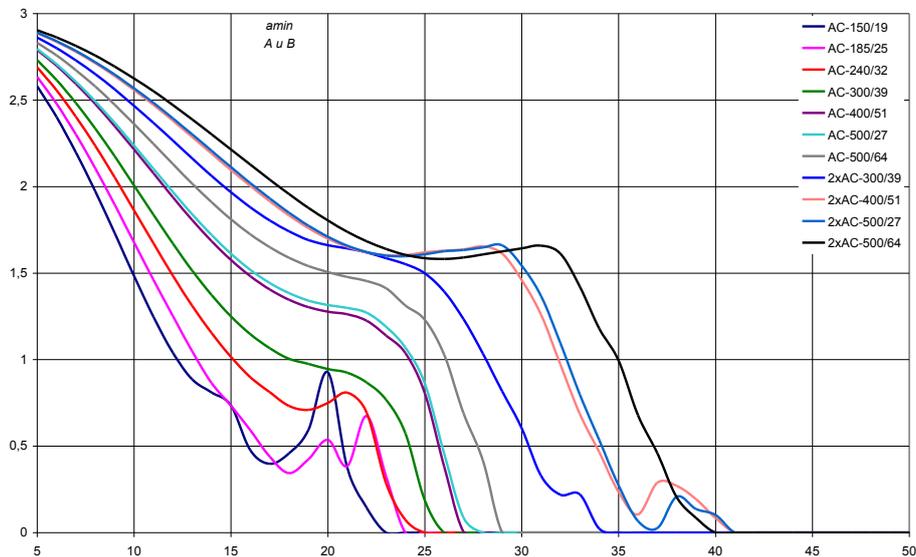


Рисунок 3. Зависимости  $a_{\min} = f(I_{K3})$  между фазами A и B для проводов различных сечений (пролет рисунок 1а) при продолжительности КЗ 0,2 с

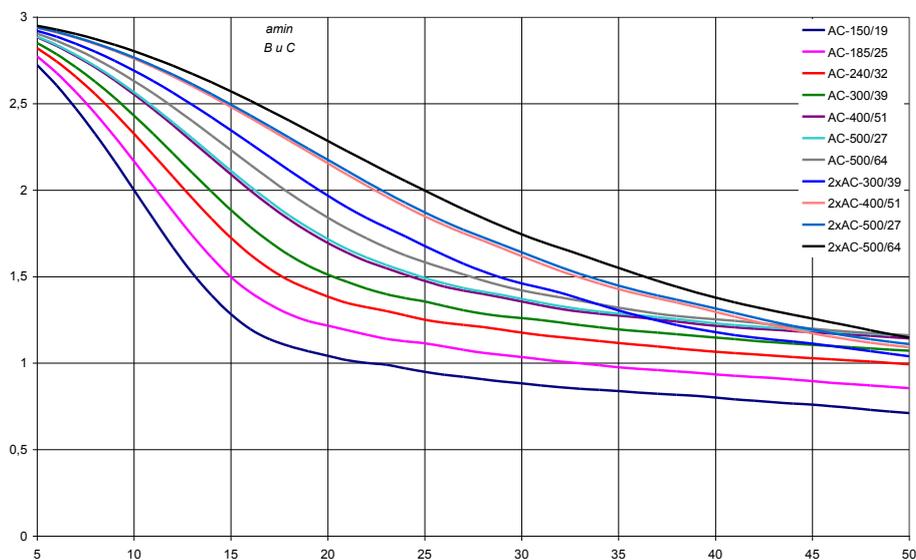


Рисунок 4. Зависимости  $a_{\min} = f(I_{K3})$  между фазами B и C для проводов различных сечений (пролет рисунок 1а) при продолжительности КЗ 0,2 с

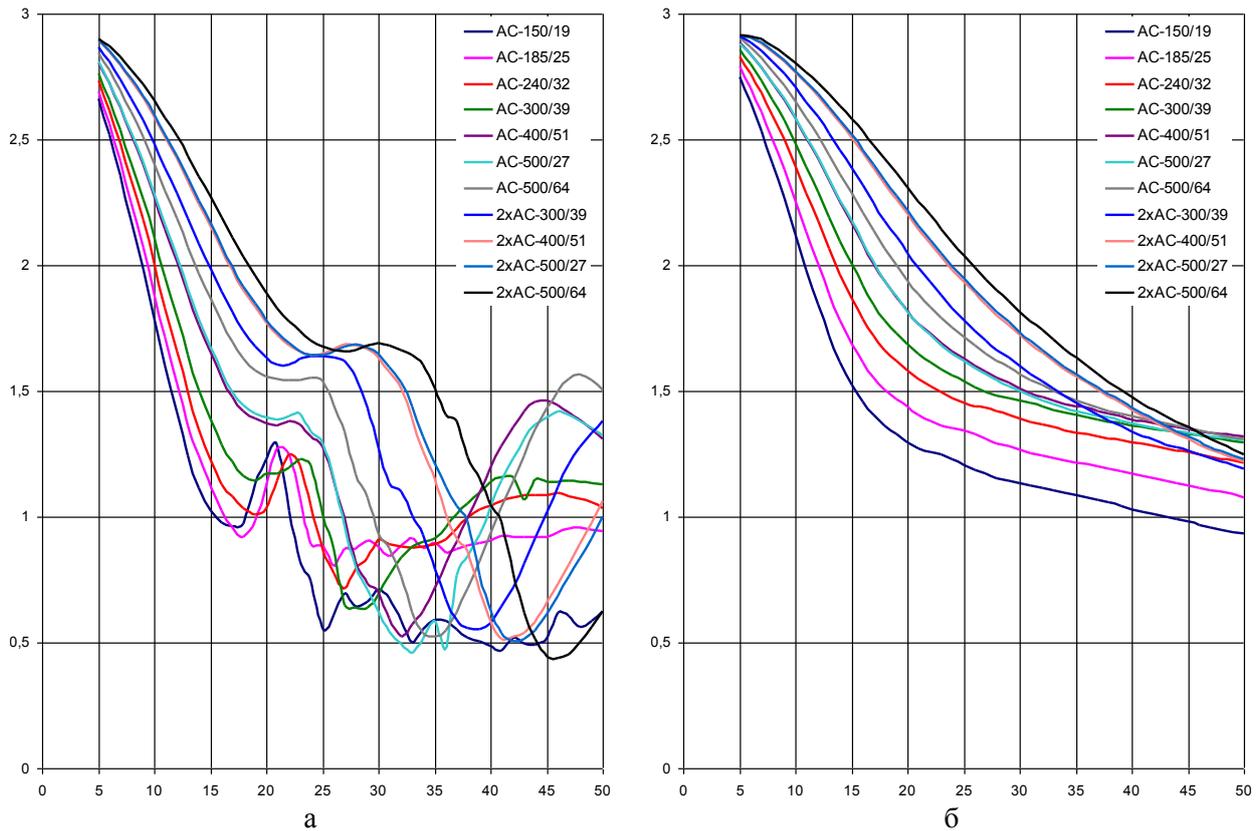


Рисунок 5. Зависимости  $a_{\min} = f(I_{K3})$  между фазами А и В для проводов различных сечений (пролет рисунок 1в) при продолжительности КЗ 0,2 с: а – КЗ между фазами А и В; б – КЗ между фазами В и С

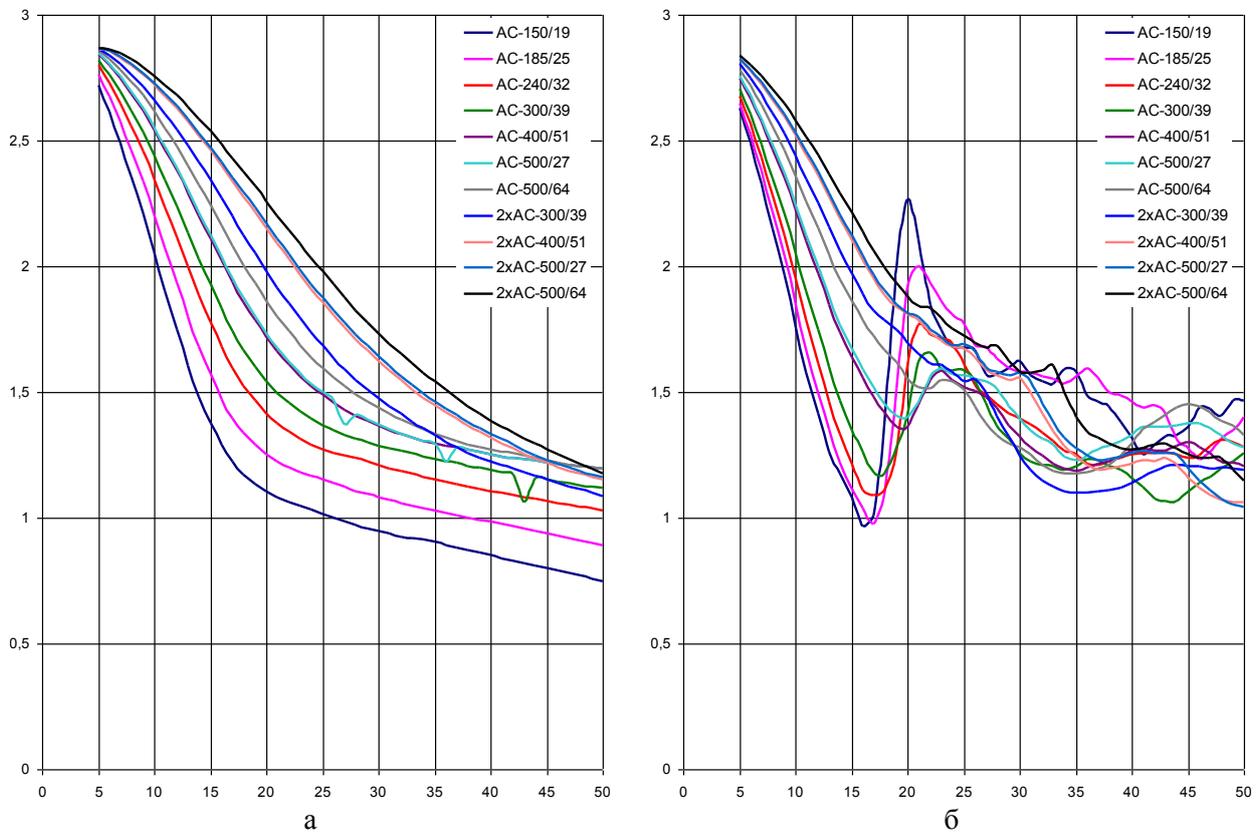


Рисунок 6. Зависимости  $a_{\min} = f(I_{K3})$  между фазами В и С для проводов различных сечений (пролет рисунок 1в) при продолжительности КЗ 0,2 с: а – КЗ между фазами А и В; б – КЗ между фазами В и С

При оценке электродинамической стойкости токоведущих конструкций необходимо выполнить серию расчетов с подбором наиболее тяжелых условий КЗ, изменяя величину тока, продолжительность, вид и место КЗ, климатические условия и другие параметры [4]. Исходя из изложенного, вычислительный эксперимент выполнен путем проведения серийных расчетов для токов двухфазного КЗ от 0 кА до 50 кА с шагом 0,5 кА.

При проведении вычислительного эксперимента для проводов различного сечения построены зависимости максимального отклонения проводов в момент их сближения ( $Y_{2\max}$ ) и минимального расстояния между фазными проводниками ( $a_{\min}$ ) от величины тока двухфазного КЗ между фазами А и В, В и С, А и С. Расчеты выполнялись для продолжительности КЗ от 0,05 с до 0,30 с с шагом 0,05 с.

В качестве примера на рисунках 2–4 приведены результаты вычислительного эксперимента для пролета без отпайек к аппаратам, представленного на рисунке 1а, и на рисунках 5 и 6 приведены зависимости для пролета с одной отпайкой (рисунок 1в).

Согласно [3] максимально допустимого сближения фаз для напряжения 110 кВ составляет 0,4 м. Как видно из представленных зависимостей наличие отпайки существенно увеличивает ток электродинамической стойкости. Если для пролета без отпайек с проводом любого сечения существует минимальный ток электродинамической стойкости (например, для провода АС-150/19 он составляет около 16 кА, а для 2×АС-500/64 – около 37 кА), то при наличии отпайки в пролете (рисунок 1в) по критерию сближения фазных проводников рассматриваемый пролет, вне зависимости от сечения провода, электродинамически устойчив (рисунок 5а и 6б). Даже для самого тяжелого случая при КЗ между фазами А и В (рисунок 5а) минимальное расстояние между фазами составляет не менее 0,45 м.

В ходе вычислительного эксперимента установлено, что наличие отпайек в пролетах ограничивает свободные движения гибких шин, увеличивая ток электродинамической стойкости исследуемого пролета по критерию схлестывания проводов фаз. Однако, наличие отпайек также может привести к снижению тока электродинамической стойкости связанным со схлестыванием спусков отпайек с проводами шин.

#### Литература

1. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. В.Г. Герасимова и др. – 9-е изд., стер. – М. : Издательство МЭИ, 2004. – 964 с.
2. Токоведущие части электростанций и подстанций: методическое пособие для студентов специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 03 «Электроснабжение» и 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» / И.И. Сергей [и др.]. – Минск : БНТУ, 2011. – 82 с.
3. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 648 с.
4. Сергей, И.И. Проверка на схлестывание гибкой ошиновки распределительных устройств электростанций: методические указания для студентов специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроснабжение» и 1-43 01 03 «Электрические системы и сети» / И.И. Сергей, Е.Г. Пономаренко. – Минск : БНТУ, 2008. – 44 с.