

АННОТАЦИЯ  
к учебному пособию

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
И АЛГОРИТМОВ РЗ И А В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ PSCAD**

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

Авторы: **Куликов Александр Леонидович, Лоскутов Антон Алексеевич**

В учебном пособии содержится описание основных принципов работы с прикладным программным комплексом PSCAD и библиотеки Master Library, предназначенной для моделирования электротехнических устройств и систем. Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника», по всем профилям подготовки.

В книге изложены теоретические сведения, методы, примеры расчета и прикладные задачи по имитационному моделированию электротехнических систем, а также алгоритмов логической части устройств релейной защиты и автоматизации электроэнергетических систем.

Каждая из представленных практических работ последовательно описывает новые возможности работы с программным комплексом PSCAD от простого к сложному.

Использование программного комплекса PSCAD способствует развитию у студентов способностей и умений решения практических задач с использованием имитационных моделей, позволяющих воспроизводить процессы, близкие к реальным.

Книга содержит 15 разделов, 489 рисунков, 62 таблицы, 50 библиографических источников.

Название основных разделов:

1. Основные понятия о моделировании.
2. Основы работы с PSCAD.
3. Исследование электромагнитных переходных процессов на примере простейшей системы электроснабжения.
4. Моделирование алгоритма трехступенчатой токовой защиты воздушной линии электропередачи и автоматического повторного включения.
5. Моделирование алгоритма направленной токовой защиты воздушной линии электропередачи.
6. Моделирование алгоритма дифференциальной защиты трансформатора 110/10кВ.
7. Моделирование алгоритма дифференциальной защиты линии электропередачи 110 кВ.
8. Моделирование алгоритма дистанционной защиты линии электропередачи 220 кВ.
9. Моделирование насыщения трансформаторов тока.
10. Моделирование алгоритма автоматического ввода резерва.
11. Моделирование алгоритма автоматической частотной разгрузки.
12. Моделирование регулятора напряжения типа РПН.
13. Моделирование динамического компенсатора реактивной мощности.
14. Определение места повреждения в сети с заземленной нейтралью с использованием PSCAD и программы FASTVIEW.
15. Реализация множества экспериментов с получением статистических данных.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	10
ВВЕДЕНИЕ .....	13
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О МОДЕЛИРОВАНИИ .....	16
1.1. Назначение моделирования в электроэнергетике .....	16
1.2. Цели и задачи моделирования.....	17
1.3. Классификация моделей .....	18
1.4. Имитационное моделирование .....	19
1.5. Требования к математическим моделям .....	21
1.6. Вычислительные методы моделирования.....	23
1.7. Оценка правильности модели .....	25
2. ОСНОВЫ РАБОТЫ С <i>PSCAD</i> .....	27
2.1. Знакомство с программным интерфейсом <i>PSCAD</i> .....	27
2.2. Начало работы с <i>PSCAD</i> .....	32
2.3. Обзор основной библиотеки <i>Master Library</i> в <i>PSCAD</i> .....	33
2.4. Принципы создания модели .....	46
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ ПРОСТЕЙШЕЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	47
3.1. Исходные данные для базовой модели .....	47
3.2. Руководство к созданию модели в лаборатории .....	51
3.2.1. Трехфазный источник напряжения (Three-Phase Voltage Source) .....	51
3.2.2. Выключатель (Three-Phase Breaker) .....	54
3.2.3. Измерители (Multimeter) .....	55
3.2.4. Шины (Bus).....	56
3.2.5. Воздушная ЛЭП (Overhead Line) .....	56
3.2.6. Нагрузка (Fixed Load).....	61
3.2.7. Трансформатор (3-Phase 2-Winding Transformer) .....	62
3.2.8. Кабельная линия (Cable) .....	64
3.2.9. Асинхронная машина (Wound Rotor Machine) .....	70
3.2.10. Короткозамыкатель (Three-Phase Fault) .....	72
3.2.11. Осциллографирование (Curve).....	74
3.2.12. Создание компоненты .....	80
3.2.13. COMTRADE регистратор (COMTRADE Recorder) .....	82
3.3. Экспериментальная часть .....	83
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ТРЕХСТУПЕНЧАТОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ.....	86

4.1. Краткие теоретические сведения .....	86
4.1.1. Схемы соединения трансформаторов тока и реле .....	86
4.1.2. Трехступенчатые токовые защиты .....	88
4.1.3. Автоматическое повторное включение.....	92
4.1.4. Защита от однофазных замыканий на землю .....	93
4.2. Пример расчета .....	95
4.2.1. Параметры системы электроснабжения.....	96
4.2.2. Выбор защит и расчет уставок .....	97
4.3. Руководство к созданию модели (по примеру п. 4.2).....	102
4.3.1. Параметры моделируемого первичного оборудования.....	102
4.3.2. Короткозамыкатель (Three-Phase Fault) .....	103
4.3.3. Переключатель точек короткого замыкания .....	104
4.3.4. Моделирование измерений, преобразования, сбора и обработки аналоговой и дискретной информации по присоединению .....	106
4.3.5. Универсальный измеритель тока .....	107
4.3.6. Измерительные органы релейной защиты.....	110
4.3.7. Моделирование алгоритма релейной защиты 1 .....	112
4.3.8. Моделирование алгоритма релейной защиты 2 .....	119
4.3.9. Моделирование алгоритма релейной защиты 3 .....	120
4.3.10. Моделирование алгоритма релейной защиты 4 .....	121
4.3.11. Алгоритм выявления однофазных замыканий на землю .....	121
4.4. Экспериментальная часть .....	124
5. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА НАПРАВЛЕННОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.....	127
5.1. Краткие теоретические сведения .....	127
5.1.1. Принцип действия ТНЗ .....	127
5.1.2. Схемы включения реле направления мощности .....	129
5.1.3. Выбор уставок срабатывания .....	131
5.1.4. Мертвая зона .....	132
5.2. Пример расчета .....	132
5.2.1. Параметры системы электроснабжения.....	133
5.2.2. Выбор защит и расчет уставок .....	135
5.2.3. Итоги расчета .....	140
5.2.4. Расчет мертвой зоны.....	141
5.3. Руководство к созданию модели (по примеру п. 5.2).....	141
5.3.1. Параметры моделируемого первичного оборудования.....	142
5.3.2. Переключатель точек короткого замыкания .....	142
5.3.3. Измерение угла сдвига между токами и напряжениями .....	144
5.3.4. Фазометр.....	145
5.3.5. Моделирование алгоритма релейной защиты 1 .....	149
5.3.6. Моделирование алгоритма релейной защиты 2 .....	154

5.3.7. Моделирование алгоритма релейной защиты 3 .....	155
5.4. Экспериментальная часть .....	156
6. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА 110/10 КВ .....	158
6.1. Краткие теоретические сведения .....	158
6.1.1. Релейная защита трансформатора.....	158
6.1.2. Назначение дифференциальной защиты трансформатора.....	159
6.1.3. Особенности дифференциальной защиты трансформатора ....	161
6.1.4. Токи небаланса.....	162
6.1.5. Виды и характеристика ДЗТ .....	164
6.2. Выбор уставок ДЗТ.....	165
6.2.1. Расчет общих уставок.....	166
6.2.2. Расчет уставок дифференциальной токовой отсечки (ДЗТ-1).	168
6.2.3. Расчет уставок чувствительной дифференциальной защиты с торможением (ДЗТ-2) .....	169
6.2.4. Сигнализация небаланса в плечах дифференциальной защиты (ДЗТ-3).....	172
6.3. Пример расчета дифференциальной защиты двухобмоточного трансформатора.....	172
6.3.1. Исходные данные для расчета.....	172
6.3.2. Выбор общих параметров дифференциальной защиты .....	172
6.3.3. Выбор уставок дифференциальной отсечки (ДЗТ-1).....	173
6.3.4. Выбор уставок чувствительной дифференциальной защиты (ДЗТ-2).....	175
6.3.5. Проверка чувствительности дифференциальной защиты.....	175
6.3.6. Построение комбинированной тормозной характеристики дифференциальной защиты трансформатора .....	176
6.4. Исходные данные для моделирования .....	176
6.5. Руководство к созданию модели 1 .....	178
6.5.1. Параметры моделируемого первичного оборудования.....	178
6.5.2. Переключатель места короткого замыкания .....	179
6.5.3. Моделирование измерителя тока .....	180
6.5.4. Моделирование алгоритма дифференциальной токовой отсечки (ДЗТ-1).....	182
6.5.5. Вывод осциллограмм.....	183
6.6. Руководство к созданию модели 2.....	186
6.6.1. Параметры модели 2.....	186
6.6.2. Моделирование измерителя тока .....	186
6.6.3. Моделирование алгоритма дифференциальной токовой защиты.....	187
6.6.4. Вывод осциллограмм.....	191

6.7. Экспериментальная часть .....	193
7. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 110 КВ .....	194
7.1. Краткие теоретические сведения .....	194
7.1.1. Принцип работы дифференциальной защиты линии .....	194
7.1.2. Дифференциальное реле с торможением.....	197
7.1.3. Расчет уставок ДЗЛ .....	199
7.2. Исходные данные для моделирования .....	200
7.3. Руководство к созданию модели.....	201
7.3.1. Параметры моделируемого первичного оборудования.....	202
7.3.2. Выбор вида и места короткого замыкания .....	202
7.3.3. Моделирование измерителя тока .....	203
7.3.4. Отображение первичных и вторичных токов.....	204
7.3.5. Моделирование алгоритма дифференциальной защиты линии .....	205
7.3.6. Вывод результирующих осциллограмм.....	209
7.4. Экспериментальная часть .....	210
8. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 220 КВ .....	211
8.1. Краткие теоретические сведения .....	211
8.1.1. Основное понятие о дистанционной защите .....	211
8.1.2. Теория ступенчатых защит.....	212
8.1.3. Теория пусковых защит .....	216
8.2. Исходные данные для моделирования .....	220
8.3. Расчет уставок дистанционной защиты .....	221
8.3.1. Расчет первой ступени дистанционной защиты.....	221
8.3.2. Расчет второй ступени дистанционной защиты.....	222
8.4. Руководство к созданию модели.....	223
8.4.1. Параметры моделируемого первичного оборудования.....	223
8.4.2. Создание элементов для реализации работы ДЗ .....	224
8.4.3. Создание компоненты обработки сигналов.....	226
8.4.4. Создание компоненты «схема защиты» .....	229
8.4.5. Отображение результатов замера сопротивления.....	236
8.4.6. Создание компоненты «Дистанционная защита» .....	238
8.5. Экспериментальная часть. Анализ результатов моделирования ...	238
9. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА.....	243
9.1. Краткие теоретические сведения .....	244
9.1.1. Общие положения.....	244
9.1.2. Принцип работы трансформатора тока .....	245
9.1.3. Причина погрешности ТТ .....	247

9.1.4. Работа ТТ в режиме глубокого насыщения .....	250
9.2. Исходные данные для базовой модели .....	250
9.3. Руководство к созданию модели.....	252
9.4. Моделирование первого случая: влияние смещения постоянной составляющей первичного тока .....	263
9.5. Моделирование второго случая: повторное включение (АПВ) линии при наличии повреждения .....	265
9.6. Моделирование третьего случая: влияние вторичного полного сопротивления.....	267
10. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ВВОДА РЕЗЕРВА .....	269
10.1. Краткие теоретические сведения.....	269
10.1.1. Требования к устройствам АВР .....	269
10.1.2. Классификация устройств АВР.....	270
10.1.3. Пусковые органы и выбор параметров УАВР.....	271
10.2. Расчет параметров АВР .....	275
10.3. Руководство к созданию модели.....	275
10.3.1. Параметры моделируемого первичного оборудования.....	275
10.3.2. Моделирование измерителя тока .....	276
10.3.3. Моделирование простого алгоритма релейной защиты.....	278
10.3.4. Моделирование измерителя напряжения.....	279
10.3.5. Моделирование алгоритма АВР одностороннего действия ..	280
10.3.6. Моделирование алгоритма АВР двухстороннего действия...	283
10.4. Экспериментальная часть .....	284
10.5. Расширение работы алгоритма .....	285
11. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ РАЗГРУЗКИ .....	286
11.1. Краткие теоретические сведения.....	286
11.1.1. Общие положения автоматической частотной разгрузки .....	286
11.1.2. Основные требования к АЧР .....	287
11.1.3. Принципы построения АЧР .....	288
11.1.4. Уставки АЧР.....	289
11.1.5. Частотное АПВ .....	291
11.2. Руководство к созданию модели.....	292
11.2.1. Параметры моделируемого первичного оборудования.....	292
11.2.2. Моделирование дефицита мощности .....	297
11.2.3. Панель управления выключателями.....	298
11.2.4. Функциональная зависимость частоты от активной мощности .....	298
11.2.5. Измерение и оценка частоты.....	299
11.2.6. Мониторинг изменения частоты.....	300

11.2.7. Моделирование алгоритма работы АЧР1 .....	302
11.2.8. Моделирование алгоритма работы АЧР2 .....	304
11.2.9. Проверка срабатывания очередей АЧР1 и АЧР2 .....	305
11.3. Экспериментальная часть .....	306
12. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ТИПА РПН ..	308
12.1. Краткие теоретические сведения .....	308
12.2. Руководство к созданию модели .....	313
12.2.1. Принцип моделирования регулирования напряжения на понижающей подстанции .....	313
12.2.2. Моделирование алгоритма работы РПН .....	317
12.2.3. Создание компоненты логики работы РПН .....	321
12.3. Экспериментальная часть .....	322
13. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ .....	323
13.1. Краткие теоретические сведения .....	323
13.1.1. Назначение компенсации реактивной мощности .....	323
13.1.2. Общие положения автоматики компенсации реактивной мощности .....	324
13.1.3. Места установки и типы источников реактивной мощности .....	325
13.1.4. Автоматическое регулирование мощности конденсаторных батарей .....	327
13.2. Расчет необходимой мощности конденсаторной установки .....	332
13.3. Руководство к созданию модели 1 .....	335
13.3.1. Параметры моделируемого первичного оборудования .....	335
13.3.2. Моделирование алгоритма регулировки емкости конденсаторной установки .....	338
13.3.3. Описание алгоритмов вычисления .....	339
13.3.4. Экспериментальная часть .....	341
13.3.5. Возможность расширения работы алгоритма .....	343
13.4. Руководство к созданию модели 2 .....	343
13.4.1. Параметры моделируемого первичного оборудования .....	343
13.4.2. Моделирование алгоритма и логики работы автоматики регулирования компенсации реактивной мощности .....	345
13.4.3. Экспериментальная часть .....	347
14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ В СЕТИ С ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ <i>PSCAD</i> И ПРОГРАММЫ <i>FASTVIEW</i> .....	350
14.1. Краткие теоретические сведения .....	350
14.1.1. Классификация методов ОМП .....	350
14.1.2. Основы определения места короткого замыкания по параметрам аварийного режима .....	354

14.1.3. Принцип действия рассматриваемого алгоритма ОМП по ПАР .....	358
14.2. Исходные данные для моделирования .....	363
14.3. Формирование модели в среде <i>PSCAD</i> .....	364
14.4. Определение места повреждения (ОМП) .....	381
14.4.1. ОМП сетей с заземлённой нейтралью (односторонний замер).....	382
14.4.2. ОМП с помощью двухстороннего замера.....	385
14.4.3. Выбор расчетных параметров R1, X1, R0, X0 из <i>PSCAD</i> .....	386
14.4.4. Выбор расчетных параметров Rm и Xm из <i>PSCAD</i> .....	388
14.4.5. Отображение результата ОМП.....	390
14.5. Ручной расчет параметров линии электропередачи .....	390
14.6. Экспериментальная часть. Расчет ОМП в программе <i>FastView</i> ..	392
14.6.1. Односторонний метод ОМП (опыт 1, КЗ ф.А на землю) .....	392
14.6.2. Двусторонний метод ОМП (опыт 2, КЗ ф.А на землю).....	393
14.6.3. Результаты расчета ОМП.....	395
15. РЕАЛИЗАЦИЯ МНОЖЕСТВА ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ.....	397
15.1. Модель 1 – радиальная электрическая сеть 220/10 кВ.....	398
15.1.1. Исходные данные для моделирования.....	398
15.1.2. Руководство к созданию основных элементов модели 1 .....	400
15.1.3. Инструменты для формирования статистических выборок в <i>PSCAD</i> .....	416
15.1.4. Формирование статистических выборок для выбранной схемы .....	422
15.1.5. Экспериментальная часть .....	428
15.2. Модель 2 – радиальная электрическая сеть 110 кВ с отпаячными подстанциями .....	432
15.2.1. Исходные данные для моделирования.....	432
15.2.2. Руководство к созданию основных элементов модели 2 .....	433
15.2.3. Формирования логики управления процессом расчета и записи данных .....	443
15.2.4. Настройки процесса моделирования .....	455
15.2.5. Экспериментальная часть .....	456
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	460
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	464