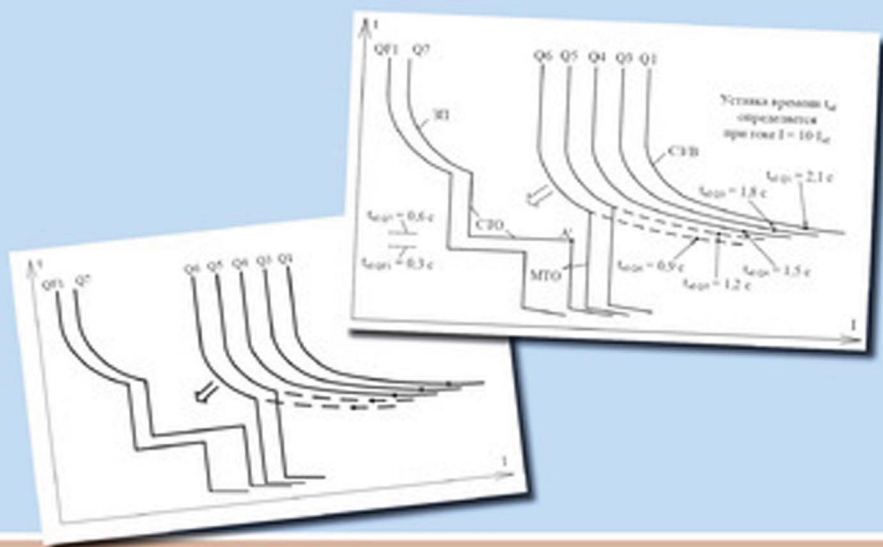


А. М. Ершов

**РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НАПЯЖЕНИЕМ
0,38–110 КВ**

2-е издание, переработанное



«Инфра-Инженерия»

УДК 621.316.925.1
ББК 31.27-05
Е80

Ершов, А. М.

Е80 Релейная защита в системах электроснабжения напряжением 0,38–110 кВ : учебное пособие для практических расчётов / А. М. Ершов. – 2-е изд., перераб. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 608 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-0511-9

Рассмотрены назначение релейной защиты систем электроснабжения, её элементы, функциональные части. Приведены примеры расчёта токов короткого замыкания в электрических сетях напряжением 0,38–6–10–110 кВ, а также принципы построения электрических сетей и режимы нейтрали.

Для специалистов проектных организаций, инженерно-технических работников электросетевых предприятий, преподавателей и студентов высших учебных заведений электроэнергетического профиля. Может служить практическим пособием при выполнении расчётов параметров защит при проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства.

УДК 621.316.925.1
ББК 31.27-05

ISBN 978-5-9729-0511-9

© Ершов А. М., 2020
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2020
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	12
1. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	14
1.1. Назначение релейной защиты	14
1.2. Элементы, функциональные части и органы устройств релейной защиты	19
2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И РЕЖИМЫ НЕЙТРАЛИ	23
2.1. Принципы построения электрических сетей	23
2.2. Режимы нейтрали электрических сетей	29
2.2.1. Пять способов заземления нейтрали	29
2.2.2. Критерии выбора режима нейтрали	30
2.2.3. Электрическая сеть с изолированной нейтралью	32
2.2.4. Электрическая сеть с резистивным заземлением нейтрали	34
2.2.5. Электрическая сеть с компенсированной нейтралью	36
2.2.6. Электрическая сеть с глухо заземленной нейтралью	37
2.2.7. Электрическая сеть с эффективно заземленной нейтралью	39
2.2.8. Заключение	39
3. ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ	41
3.1. Виды коротких замыканий	41
3.2. Короткие замыкания на выводах низшего напряжения понижающего трансформатора	45
4. РАСЧЁТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 0,38–6–10–110 кВ	56
4.1. Особенности расчётов токов короткого замыкания для релейной защиты в электрических сетях напряжением выше 1 кВ	56
4.1.1. Схемы замещения трансформаторов	57
4.1.2. Особенности определения сопротивления трансформатора с РПН	59
4.1.3. Расчёты токов трёхфазного короткого замыкания	60
4.2. Пример расчёта токов КЗ в электрических сетях напряжением выше 1 кВ	61
4.2.1. Исходные данные	62
4.2.2. Расчёт сопротивлений элементов схемы замещения	64
4.2.3. Расчёт токов КЗ в максимальном режиме	67
4.2.4. Расчёт токов КЗ в минимальном режиме	68
4.3. Расчёт токов короткого замыкания в электрических сетях напряжением до 1 кВ	70

4.3.1. Особенности расчётов трёхфазного и однофазного КЗ за трансформатором 6–10/0,4 кВ	70
4.3.2. Основные положения расчёта токов трёхфазного КЗ методом симметричных составляющих	71
4.3.3. Расчёт сопротивлений различных элементов системы электроснабжения	74
4.3.4. Пример расчёта токов трёхфазного КЗ в электрической сети напряжением до 1 кВ	78
4.3.5. Расчёт токов однофазного КЗ в сетях до 1 кВ методом симметричных составляющих	84
4.3.6. Пример расчёта токов однофазного КЗ	86
4.3.7. Расчёт токов однофазного КЗ методом «петли фаза – нуль»	89
5. ИСТОЧНИКИ ОПЕРАТИВНОГО ТОКА	91
5.1. Источники оперативного тока на распределительных подстанциях	91
5.2. Постоянный оперативный ток	91
5.3. Переменный оперативный ток	93
5.3.1. Схемы с дешунтированием электромагнитов управления	93
5.3.2. Предварительно заряженные конденсаторы и зарядные устройства	95
5.3.3. Схемы питания оперативных цепей на выпрямленном токе	97
6. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА	100
6.1. Общие сведения	100
6.2. Схемы соединения трансформаторов тока и цепей тока измерительных органов	103
6.2.1. Общие положения	103
6.2.2. Схема соединения трансформаторов тока и измерительных органов в полную звезду	105
6.2.3. Схема соединения трансформаторов тока и измерительных органов в неполную звезду	108
6.2.4. Схема соединения трансформаторов тока в полный треугольник, измерительных органов – в полную звезду	110
6.2.5. Схема с двумя трансформаторами тока и одним измерительным органом, включенным на разность токов двух фаз	112
6.2.6. Трёхтрансформаторный фильтр токов нулевой последовательности	113
6.2.7. Однотрансформаторный первичный фильтр токов нулевой последовательности	114

6.2.8. Последовательное и параллельное соединение трансформаторов тока	115
6.2.9. Датчики фазного тока	115
6.3. Оценка чувствительности устройства защиты	118
6.3.1. Коэффициент чувствительности защиты	118
6.3.2. Оценка чувствительности защиты линии электропередачи	121
6.3.3. Оценка чувствительности защиты силовых трансформаторов напряжением 35–110–220/6–10 кВ	124
6.3.4. Оценка чувствительности защиты силовых трансформаторов напряжением 6–10/0,4 кВ	126
6.3.5. Области применения разных схем соединения ТТ и ИО	132
6.4. Выбор трансформаторов тока и определение их допустимой нагрузки в схемах релейной защиты	132
7. ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ	138
8. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯМИ	144
8.1. Общие положения	144
8.2. Концепция построения защиты электрических сетей	145
8.2.1. Токовые нагрузки	145
8.2.2. Принцип защиты от токовых перегрузок	149
8.2.3. Согласование параметров СЭС и релейной защиты	151
8.3. Виды повреждений электрических сетей напряжением до 1 кВ и требования ПУЭ к релейной защите этих сетей	153
8.4. Характеристики плавких предохранителей	154
8.5. Условия выбора плавких вставок	157
8.6. Проверка селективности	160
8.7. Токоограничивающая способность плавких предохранителей	163
8.8. Параметры предохранителей	165
8.8.1. Предохранители напряжением 380 В	165
8.8.2. Предохранители напряжением 6–10 кВ	166
8.9. Достоинства и недостатки плавких предохранителей	167
9. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В АВТОМАТИЧЕСКИМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ	170
9.1. Защитные характеристики автоматических выключателей	170
9.2. Трёхступенчатая токовая защита автоматического выключателя	171
9.3. Выбор выключателя	173
9.4. Расчёт уставок защиты линии	173
9.5. Расчёт уставок защиты электродвигателей	180
9.6. Защита распределительного устройства напряжением 0,4 кВ трансформаторной подстанции 6–10/0,4 кВ	182

9.6.1. Характеристики трансформаторной подстанции	182
9.6.2. Расчёт уставок защиты вводных и секционного выключателей 0,4 кВ трансформаторной подстанции 6–10/0,4 кВ	185
9.6.3. Особенности работы ТП с двумя вводными и двумя секционными автоматическими выключателями на стороне низшего напряжения	188
9.7. Защита от однофазных замыканий на землю в электрической сети напряжением до 1 кВ	191
9.7.1. Защита, использующая измерение разностного тока	192
9.7.2. Защита, использующая возврат тока по заземлителю	193
9.7.3. Защита, использующая ток нулевой последовательности	194
9.7.4. Устройство защитного отключения	195
9.7.5. Применение устройств защиты от однофазных замыканий на землю в электрических сетях напряжением 380 В	199
9.8. Токоограничение автоматических выключателей	201
10. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ ...	205
10.1. Структура системы электроснабжения напряжением до 1 кВ	205
10.2. Автоматические выключатели компании Schneider Electric	207
10.2.1. Автоматические выключатели серии Masterpact	207
10.2.2. Автоматические выключатели серии Compact	210
10.2.3. Автоматические выключатели серии Acti 9	213
10.3. Устройства защиты, устанавливаемые в автоматические выключатели	216
10.3.1. Магнитотермические расцепители выключателей серии Acti 9	216
10.3.2. Расцепители выключателей серии Compact NS	218
10.3.3. Электронные расцепители Micrologic, устанавливаемые в выключатели серий Compact NS, Masterpact NT и NW	226
10.3.4. Расцепители выключателей серии Compact NSX	234
10.4. Автоматические выключатели отечественного производства	236
10.5. Дифференциальные выключатели	243
10.6. Селективность защит автоматических выключателей	246
10.6.1. Виды селективности	246
10.6.2. Принцип каскадного отключения	249
10.6.3. Правила селективности для выключателей от 1 до 6300 А компании Schneider Electric	250
11. ОРГАНИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ	253
11.1. Общие положения	253

11.2. Понятие «Организация защиты»	254
11.3. Расчёты защиты электрической сети напряжением 380 В с помощью плавких предохранителей	254
11.3.1. Расчёт защиты одиночного электродвигателя	254
11.3.2. Расчёт защиты радиально-ступенчатой схемы электропитания	257
11.4. Расчёты защиты электрической сети напряжением 380 В с помощью автоматических выключателей	265
11.4.1. Методика определения параметров характерных точек каталожной ВТХ отечественных автоматических выключателей	265
11.4.2. Расчёт защиты одиночного электродвигателя	266
11.4.3. Характерные точки каталожных ВТХ электронных расцепителей автоматических выключателей компании Schneider Electric	270
11.4.4. Расчёт защиты радиально-ступенчатой схемы электропитания с помощью автоматических выключателей	272
11.5. Расчёт защиты трансформаторной подстанции напряжением 6–10/0,4 кВ с помощью автоматических выключателей	283
11.5.1. Общие положения	283
11.5.2. Расчёт защиты отходящих от ТП линий	284
11.5.3. Расчёт защиты секционного автоматического выключателя ТП	287
11.5.4. Расчёт защиты вводных автоматических выключателей ТП	292
11.5.5. Расчёт защиты ТП с двумя вводными и двумя секционными автоматическими выключателями	301
11.5.6. Расчёт защиты схемы электропитания усадьбы	305
12. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1 кВ	310
12.1. Общие положения	310
12.2. Функции защит	311
12.3. Селективность	314
12.3.1. Временная селективность	314
12.3.2. Токовая селективность	317
12.3.3. Логическая селективность	319
12.3.4. Селективность с помощью направленной защиты	320
12.3.5. Селективность с помощью дифференциальной защиты	321
12.3.6. Комбинированная селективность	323
13. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА НА ОСНОВЕ УСТРОЙСТВ КОМПАНИИ SCHNEIDER ELECTRIC	330

13.1. Защита трансформаторов напряжением 6–10/0,4 кВ выключателями нагрузки с плавкими предохранителями	330
13.2. Микропроцессорные устройства защиты компании Schneider Electric	331
13.2.1. Реле защиты типа VIP30 и VIP35	331
13.2.2. Реле защиты типа VIP300	336
13.2.3. Общая информация об устройствах защиты Sepam	335
13.2.4. Устройства защиты Sepam серии 10	338
13.2.5. Устройства защиты Sepam серии 20 и 40	339
13.2.6. Устройства защиты Sepam серии 80	345
13.3. Подключение базового блока	348
13.4. Ввод в эксплуатацию	354
13.5. Расчёт обратно зависимых время-токовых характеристик с помощью устройств Sepam	360
13.5.1. Общие положения	360
13.5.2. Типы обратно зависимых время-токовых характеристик устройств Sepam	361
13.5.3. Аналитический метод расчёта обратно зависимых время-токовых характеристик	363
13.5.4. Графическое построение обратно зависимых время-токовых характеристик	366
14. ЗАЩИТА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10–20/0,4 кВ	369
14.1. Виды повреждений силовых трансформаторов	369
14.2. Общая характеристика релейной защиты силовых трансформаторов напряжением 6–10–20/0,4 кВ	371
14.3. Расчёт защиты трансформаторов напряжений 6–10–20/0,4 кВ	374
14.4. Особенности расчётов и согласования обратно зависимых время-токовых характеристик устройств защиты Sepam	386
14.5. Примеры расчёта защиты трансформатора напряжением 10/0,4 кВ ...	390
15. ОРГАНИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10 кВ	407
15.1. Формирование диаграммы селективности времени срабатывания защиты	407
15.2. Расчёт защит электрической сети напряжением 6–10 кВ	410
15.2.1. Защита радиальной линии, питающей одну ТП	410
15.2.2. Защита магистральной линии, питающей несколько ТП	416
15.2.3. Защита радиальной линии, питающей РП	418
15.2.4. Защита РП	421

15.3. Пример расчёта обратно-зависимых время-токовых характеристик защит электрической сети напряжением 10 кВ	423
15.4. Оптимизация параметров микропроцессорной релейной защиты электрических сетей напряжением 10 кВ	440
16. ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ	
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10–20–35 кВ ...	449
16.1. Распределение токов в контуре нулевой последовательности электрической сети	449
16.2. Расчёт токов ОЗЗ для электрической сети с изолированной нейтралью	453
16.3. Требования к защитам от однофазных замыканий на землю в электрических сетях напряжением 6–10–20–35 кВ	456
16.4. Устройство контроля изоляции сети напряжением 6–10–20–35 кВ ...	457
16.5. Устройства селективной защиты от ОЗЗ	459
16.5.1. Трансформаторы тока нулевой последовательности	459
16.5.2. Ненаправленная токовая защита нулевой последовательности с независимой время-токовой характеристикой	462
16.5.3. Направленные защиты	465
16.5.4. Защиты от ОЗЗ, реагирующие на высшие гармонические составляющие	467
16.5.5. Защиты от ОЗЗ, основанные на использовании наложенного тока	469
16.5.6. Защиты от ОЗЗ, основанные на использовании электрических величин переходного процесса	469
16.5.7. Современные устройства защиты от ОЗЗ	469
16.6. Основные действия оперативного персонала при определении присоединения с ОЗЗ	474
17. ЗАЩИТА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ 35–110–220/6–10 кВ	475
17.1. Виды повреждений и ненормальные режимы работы трансформаторов	475
17.2. Организация защиты силовых трансформаторов	479
17.3. Дифференциальная защита трансформаторов	480
17.3.1. Принцип действия продольной дифференциальной токовой защиты	480
17.3.2. Особенности выполнения дифференциальной защиты трансформаторов	482
17.3.3. Расчётный ток небаланса	483

17.3.4. Принципы построения дифференциальной защиты трансформатора	484
17.4. Газовая защита	489
17.5. Защита от перегрузок	493
17.6. Селективная токовая защита	493
17.7. Мгновенная токовая отсечка	495
17.8. Защита сборных шин подстанции 110–220 кВ	497
17.9. Защита трансформаторов с помощью устройств Seram	500
17.10. Методика расчёта уставок дифференциальной защиты трансформаторов Seram Т87	501
17.10.1. Описание дифференциальной защиты Seram Т87	501
17.10.2. Методика выбора уставок срабатывания дифференциальной защиты трансформатора	505
17.10.3. Пример выбора параметров срабатывания дифференциальной защиты	513
18. ЗАЩИТА КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК И СИЛОВЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ФИЛЬТРОВ	519
18.1. Повреждения конденсаторов	519
18.2. Защита конденсаторных установок	522
18.3. Защита силовых резонансных фильтров высших гармоник напряжением 6–10–35 кВ	525
19. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	531
19.1. Ненормальные режимы работы и виды повреждений электродвигателей	531
19.2. Требования к защитах электродвигателей	532
19.3. Методика расчёта защиты электродвигателей напряжением выше 1 кВ	534
19.4. Описание схем релейной защиты асинхронного электродвигателя напряжением выше 1 кВ	542
20. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ЭЛЕКТРОПЕЧНЫХ УСТАНОВОК. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И УПРАВЛЕНИЕ АВАРИЙНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ	547
21. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И УПРАВЛЕНИЕ АВАРИЙНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ	554
21.1. Организация работы аварийных источников питания	554
21.2. Выбор уставок аварийного ввода резерва дизель-генераторов	557
21.3. Выбор уставок релейной защиты генераторов 0,4 кВ	559

21.4. Пример применения электроснабжения потребителей особой	
группы 1-й категории надёжности	562
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	565
ПРИЛОЖЕНИЯ	571
П1. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЁТА ТОКОВ	
КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ	571
П.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА	592

1. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

1.1. Назначение релейной защиты

Релейная защита (РЗ) относится к автоматическим устройствам, предназначенным для отключения ненормальных режимов работы элементов системы электроснабжения (СЭС) [8, 50, 59]:

- при перегрузках элементов СЭС (кабельных и воздушных линий, трансформаторов, электродвигателей и пр.);
- при коротких замыканиях (КЗ), возникающих в СЭС;
- при ухудшении состояния электрооборудования (например, для трансформаторов – это уход масла из бака, снижение уровня изоляции и пр.).

Сегодня добавляются системы диагностики электрооборудования, которые контролируют состояние электрооборудования и в случае отклонения его параметров от нормативных могут формировать информацию на сигнал или отключение.

Функциями релейной защиты являются [8, 74]:

- срабатывание при повреждении защищаемого элемента системы электроснабжения (внутренние повреждения);
- несрабатывание при коротких замыканиях за пределами этого элемента (внешние КЗ), а также в нормальных режимах при отсутствии повреждения на защищаемом объекте.

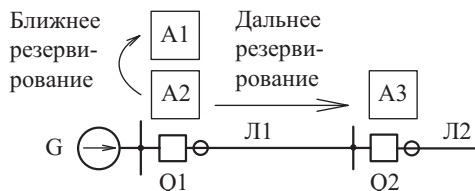


Рис. 1.1. Понятие резервирования

На большинстве элементов системы электроснабжения обычно устанавливают основную и резервную защиты (иногда говорят о ступенях одной защиты). **Основная защита** (A1, рис. 1.1) предназначена для действия при КЗ в пределах всего защищаемого элемента с временем, меньшим, чем у других защит, а **резервная защита** (A2) работает вместо основной в случае ее отказа или вывода из работы. Такое резервирование называется **ближним**. К резервной защите обычно предъявляется требование срабатывать и при повреждениях на смежных (нижераспологаемых) элементах в случае отказа их собственных защит или выключателей (например, защиты A3). При этом резервная защита выполняет **функцию дальнего резервирования** [8].

В условиях эксплуатации в силу ряда причин защита может не справиться с заданными ей функциями:

- не сработать при повреждении в пределах защищаемого элемента (*отказ срабатывания*);
- сработать при внешних КЗ (*излишнее срабатывание*);
- сработать при отсутствии повреждений в системе электроснабжения (*ложное срабатывание*).

Все эти неправильные действия называют *отказом функционирования защиты*.

С целью ограничения отказов функционирования защите придаются определенные свойства. Основные из них – селективность, быстродействие защиты, устойчивость функционирования, надежность функционирования [74]. Рассмотрим каждое из этих понятий.

Под *селективностью* понимают высшее свойство релейной защиты, действующей на отключение, определять поврежденный элемент и отключать только его. Для релейной защиты, действующей на сигнал, селективность – это способность однозначно указывать место возникновения ненормального режима и конкретно элемент системы электроснабжения, требующего вмешательства персонала.

На каждом элементе системы электроснабжения (генератор, трансформатор, линия и др.) устанавливается один или несколько комплектов, или видов релейной защиты, которые должны отключать защищаемый элемент при повреждениях в нём или подавать сигнал о ненормальном режиме защищаемого элемента. Если по принципу своего действия защита срабатывает только при КЗ на защищаемом элементе, то её относят к защитам, обладающим *абсолютной селективностью*. Защиты, которые могут срабатывать как резервные при повреждении на смежном элементе, если это повреждение не отключается, называются *относительно селективными*.

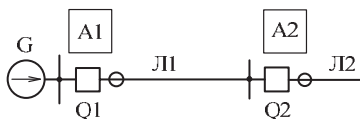


Рис. 1.2. Схема электрической сети

На рис. 1.2 представлена сеть с односторонним питанием, состоящая из двух линий Л1 и Л2 с защитами А1 и А2. Пусть, по принципу действия защита А1 действует на отключение выключателя Q1 только при КЗ на линии Л1, а защита А2 действует на отключение выключателя Q2 при КЗ на линии Л2. В этом случае защиты А1 и А2 обладают абсолютной селективностью.

Если по принципу действия защита А1 может отключить КЗ и на линии Л2 при отказе функционирования защиты А2, то значит защита А1 обладает относительной селективностью. Таким образом, защита, обеспечивающая дальнейшее резервирование отказа защиты смежного элемента обладает относительной селективностью.

Быстродействие защиты при коротких замыканиях обеспечивает:

- уменьшение разрушений изоляции и токоведущих частей токами КЗ;

- снижение вероятности несчастных случаев;
- снижение торможения асинхронных электродвигателей и нарушений технологических процессов;
- снижение продолжительности работы электроприёмников при пониженном напряжении.

Время отключения повреждённого элемента складывается из времени действия защиты и времени действия выключателя

$$t_0 = t_{P3} + t_B. \quad (1.1)$$

Время отключения наиболее распространенных выключателей составляет 0,06–0,15 сек. С точки зрения уменьшения разрушений токами КЗ, уменьшения вероятности нарушения работы электродвигателей релейная защита должна иметь минимальное время отключения или совсем не иметь выдержки времени. Однако, практически невозможно установить на всех защитах минимальное время из-за невозможности их неселективного действия. Поэтому реальные значения времени отключения РЗ зависят от многих факторов и могут достигать 3–4 секунд. При этом защита с временем отключения не более 0,2 сек считается быстродействующей.

Устойчивость функционирования – это свойство релейной защиты отключать любые повреждения на защищаемом элементе СЭС, в том числе и минимальный ток КЗ в конце зоны защиты. Устойчивость функционирования РЗ принято характеризовать **коэффициентом чувствительности** [8; 50, п. 3.2.20]

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{Р.МИН}}}{I_{\text{С.Р}}} = \frac{K_{\text{СХ}}^{(m)} \cdot I_{\text{К.МИН}}^{(m)}}{K_{\text{СХ}}^{(3)} \cdot I_{\text{С.З}}}, \quad (1.2)$$

где $I_{\text{Р.МИН}}$ – ток, протекающий по реле (устройству защиты) при минимально возможном токе КЗ $I_{\text{К.МИН}}^{(m)}$ в конце защищаемой зоны;

m – вид КЗ (однофазное, двухфазное, трёхфазное);

$I_{\text{С.Р}}$ – расчётное значение тока срабатывания реле (устройства защиты);

$I_{\text{С.З}}$ – расчётное значение тока срабатывания защиты, определённое для первичных параметров сети;

$K_{\text{СХ}}^{(m)}, K_{\text{СХ}}^{(3)}$ – коэффициенты схемы соединения трансформаторов тока и реле (измерительных органов устройства защиты) соответственно при несимметричных и симметричном режимах.

Более подробно перечисленные параметры будут рассмотрены в 3-м и 6-м разделах данного пособия.

Проиллюстрируем определение коэффициента чувствительности на следующем примере. На рис. 1.3 приведен фрагмент СЭС. Для защиты линии КЛ-10 кВ установлена токовая защита А.

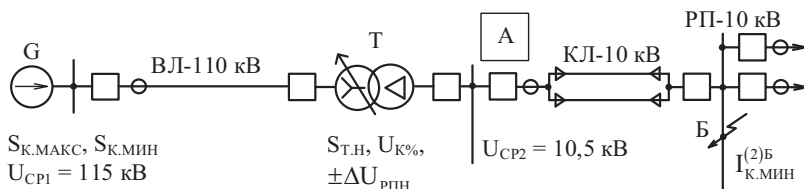


Рис. 1.3. Схема электрической сети

На величину токов КЗ влияют разные факторы, рассмотрим из них основные:

1. Энергосистема может работать в максимальном и минимальном режиме, которым соответствуют мощности $S_{К, \text{МАКС}}$ и $S_{К, \text{МИН}}$.

2. Трансформатор Т с регулированием напряжения под нагрузкой РПН имеет диапазоном регулирования напряжения $\pm \Delta U_{\text{РПН}}$, и, следовательно, различные сопротивления при минимальном и максимальном коэффициентах трансформации.

3. Электрическая сеть во время эксплуатации может изменять свою конфигурацию и, следовательно, отдельные участки сети могут иметь минимальное или максимальное сопротивления. Например, кабельная линия КЛ-10 кВ, состоящая из двух параллельно включенных кабелей, может работать с двумя или одним кабелем.

Нам нужно определить минимальный ток КЗ в конце зоны защиты в точке Б – на шинах распределительного пункта РП-10 кВ. Для этого мы должны рассмотреть схему электрической сети, работающую в минимальном режиме работы, но с максимальными сопротивлениями её элементов.

Составим схему замещения для расчёта тока КЗ без учета активных сопротивлений (рис. 1.4). При этом учтём:

1. Энергосистема работает с минимальной мощностью КЗ $S_{К, \text{МИН}}$.

2. Трансформатор Т работает с максимальным коэффициентом трансформации.

3. В КЛ из-за повреждения отключен один из параллельных кабелей.

При данных условиях мы будем иметь максимальное сопротивление системы $X_{С, \text{МИН}}$, максимальное сопротивление трансформатора $X_{Т, \text{МАКС}}$ и максимальное сопротивление КЛ $X_{КЛ, \text{МАКС}}$.

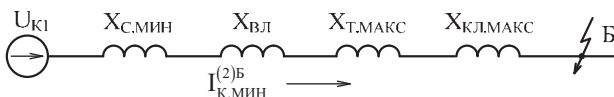


Рис. 1.4. Схема замещения электрической сети

Параметры сопротивлений определим по известным выражениям с учётом базисной мощности $S_{Б}$ и напряжения $U_{СР2} = 10,5 \text{ кВ}$ ступени СЭС, где установлена релейная защита.

$$X_{C.МИН} = \frac{S_B}{S_{K.МИН}}; \quad X_{ВЛ} = X_{O.ВЛ} \cdot L \cdot \frac{S_B}{U_{CP.1}^2}; \quad (1.3)$$

$$X_{T.МАКС} = \frac{U_{K\%}}{100} \frac{(1 + \Delta U_{РПН})^2 \cdot S_B}{S_{T.H}}; \quad X_{КЛ} = X_{O.КЛ} \cdot L \cdot \frac{S_B}{U_{CP.2}^2 \cdot (n-1)}. \quad (1.4)$$

Минимальный ток трехфазного КЗ $I_{K.МИН}^{(3)Б}$ в точке Б

$$I_{K.МИН}^{(3)Б} = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_{CP2} \cdot (X_{C.МИН} + X_{ВЛ} + X_{T.МАКС} + X_{КЛ.МАКС})}. \quad (1.5)$$

Минимальный ток двухфазного КЗ

$$I_{K.МИН}^{(2)Б} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{K.МИН}^{(3)Б}. \quad (1.6)$$

Тогда коэффициент чувствительности релейной защиты А при известном токе срабатывания $I_{C.3}$ будет определён по следующей формуле

$$K_{\text{ч}} = \frac{K_{CX}^{(m)} \cdot I_{K.МИН}^{(2)Б}}{K_{CX}^{(3)} \cdot I_{C.3}} \geq K_{\text{ч.ДОП}}. \quad (1.7)$$

Минимальные допустимые значения коэффициентов чувствительности для различных видов защиты регламентированы «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ) [50].

Надёжность функционирования. В устройствах релейной защиты и автоматики сигналы в процессе преобразования и передачи могут искажаться и ослабляться из-за помех и неисправностей отдельных функциональных элементов, что приводит к отказам функционирования, поэтому устройства защиты и автоматики должны выполняться с определенной степенью надёжности. Под надёжностью систем энергетики понимают свойство объекта выполнять заданные функции в заданном объёме при определенных условиях эксплуатации.

Существенное значение для надёжности имеют правильная эксплуатация устройства, систематический профилактический контроль его технического состояния и послеаварийные проверки, целью которых являются поиск, обнаружение и устранение неисправностей. Для этого до последнего времени широко применялись так называемые внешние *средства диагностирования*. Они требуют высокой квалификации обслуживающего персонала и больших затрат времени. Новое направление в теории и практике релейной защиты – *автоматизация диагностирования*. Это особенно необходимо в связи с использованием в устройствах релейной защиты и автоматики в качестве элементной базы интегральных микросхем и средств микропроцессорной техники. Такие устройства снабжаются встроенными средствами тестового и функционального контроля. Они позволяют выявлять неисправности, приводящие к отказам функционирования релейной защиты.

При *тестовом диагностировании* искусственно создается ситуация, при которой устройство защиты должно сработать. Для этого на его вход подаются соответствующие диагностические сигналы. По реакции элементов релейной

защиты на эти сигналы судят о её состоянии. Реакция оценивается характером и совокупностью сигналов, зафиксированных в контрольных точках устройства. Эти сигналы при помощи специальной таблицы неисправностей позволяют судить о состоянии защиты и в случае её неисправности определить повреждённый элемент.

При **функциональном контроле** неисправности обнаруживаются в результате обработки информации о реакции устройства релейной защиты на сигналы, поступающие непосредственно от защищаемого элемента системы электроснабжения. Распространены устройства функционального контроля, которые выявляют ложные срабатывания отдельных органов защиты по факту их длительного пребывания в состоянии срабатывания. Устройства функционального контроля, предупреждающие возможные отказы срабатывания и излишние срабатывания, основаны на сравнении поведения отдельных органов защиты, реагирующих на изменения одной и той же входной воздействующей величины при КЗ в системе электроснабжения. Свидетельством неисправности является несоответствие в их поведении.

1.2. Элементы, функциональные части и органы устройств релейной защиты

Немного истории развития устройств релейной защиты и автоматики.

Первые устройства релейной защиты и автоматики выполнялись на основе **электромеханических реле**. Они широко используются и сейчас. Основными недостатками таких реле являются: значительные габариты; большие мощности, потребляемые от первичных измерительных преобразователей тока и напряжения; наличие подвижных элементов и контактов.

Более совершенными стали устройства релейной защиты и автоматики, выполненные на полупроводниковых приборах (диодах и транзисторах). Их отличительной особенностью является отсутствие подвижных элементов и контактов и они получили название «**статические реле**». Удалось также снизить потребление мощности от трансформаторов тока и напряжения и повысить быстродействие. Вместе с тем, наличие большого числа полупроводниковых элементов и соединений между ними приводит к усложнению устройства и снижению надёжности функционирования.

Дальнейшее развитие и совершенствование полупроводниковой технологии привело к созданию интегральных микросхем. Здесь в небольшом объеме полупроводникового материала уже электрически соединены соответствующим образом диоды, транзисторы, резисторы и конденсаторы.

Имеются интегральные микросхемы с разной степенью интеграции. Например, сверхбольшие интегральные микросхемы (СБИС). К ним относятся микропроцессоры, однокристалльные микроЭВМ, аналого-цифровые преобразователи и другие. **Микропроцессоры и микроЭВМ** стали основой четвёртого поколения автоматических устройств.

Устройства релейной защиты и автоматики и их функциональные части в зависимости от элементной базы можно разделить на аппаратные и программные.

Аппаратные устройства состоят из отдельно взаимодействующих конструктивно различных функциональных элементов (органов). Они выполняются на основе электромеханических реле или полупроводниковых элементов в разных исполнениях и с разной степенью их интеграции.

Программные устройства основаны на использовании микроЭВМ и микропроцессорных систем. Они не содержат в явном виде функциональные элементы.

Исходя из сказанного, можно говорить об **электромеханической, полупроводниковой и микропроцессорной (цифровой) элементных базах** функциональных элементов и всего устройства релейной защиты и автоматики. В зависимости от элементной базы они выполняются по-разному. Однако основы релейной защиты и автоматики остаются практически неизменными, сохраняется и последовательность преобразования и передачи сигналов.

В соответствии с этой последовательностью условно в устройствах релейной защиты и автоматики можно выделить **измерительную, логическую, исполнительную и передающую части**, состоящие из аналоговых и дискретных элементов [8, 74].

Измерительная часть. Элементы измерительной части контролируют тот или иной параметр системы электроснабжения, например, амплитуду (абсолютное значение) тока, напряжения, угол сдвига фаз между ними, значение частоты. Указанные параметры вторичных напряжений и токов, получаемых от первичных измерительных преобразователей (трансформаторов) напряжения и тока электрических установок, являются **информационными параметрами**. Вторичные напряжения и ток измерительных трансформаторов являются **основными входными электрическими сигналами** автоматических устройств, их воздействующими величинами. Воздействующей величиной, согласно ГОСТ 16022–83, называется электрическая величина, которая одна или в сочетании с другими электрическими величинами должна быть приложена к электрическому реле или устройству РЗ в заданных условиях **для достижения ожидаемого функционирования**. В ряде случаев используются и неэлектрические величины, которые соответствующими измерительными элементами (датчиками) преобразуются в электрический входной сигнал устройства.

Основные входные электрические сигналы являются **аналоговыми**. Они поступают на выходы измерительной части устройств релейной защиты и автоматики. Измерительная часть может содержать несколько измерительных органов непрерывного или релейного действия. Измерительный орган непрерывного действия имеет непрерывную проходную характеристику (зависимость выходного сигнала Y от входного X), а релейного действия – релейную проходную характеристику. Релейный измерительный орган преобразует аналоговый сигнал в дискретный с двумя значениями информационного параметра. Простейшие измерительные органы релейного действия – измерительные реле тока, напряжения, мощности, сопротивления.

Электрическим реле, согласно ГОСТ 16022–83, называется аппарат, предназначенный производить скачкообразные изменения в выходных цепях при заданных значениях электрических воздействующих величин. При этом считают, что реле срабатывает, т. е. выполняет заданные функции. Различают **мак-**

симальные и минимальные измерительные реле. *Максимальные реле срабатывают при значениях воздействующей величины, больших заданного значения, минимальные – при значениях воздействующей величины, меньших заданного значения.* Пример – реле максимального тока и реле минимального напряжения. В зависимости от способа включения в защищаемую цепь реле делятся на первичные и вторичные.

Первичные реле включаются непосредственно в главную электрическую цепь, а *вторичные* – через первичные измерительные преобразователи. В зависимости от способа воздействия на коммутационный аппарат (например, выключатель) защищаемого объекта различают реле прямого и реле косвенного действия. В *реле прямого действия* подвижная система механически связана с отключающим устройством коммутационного аппарата (это электромеханические реле). *Реле косвенного действия* управляет цепью электромагнита отключения выключателя через исполнительный элемент.

Устройства релейной защиты и автоматики выполняются так, что сигнал на выходе измерительного органа появляется лишь в том случае, если входные сигналы удовлетворяют некоторым условиям, например, при достижении амплитудой тока определенного значения. Из этого следует, что измерительный орган сравнивает сигналы. Различают два основных принципа сравнения электрических величин: по амплитуде (абсолютному значению) и по фазе.

В зависимости от числа воздействующих величин различают измерительные органы с одной, двумя электрическими величинами и более. Применяются в основном измерительные органы с одной и двумя входными электрическими величинами.

Логическая часть. На вход логической части поступают выходные сигналы измерительной части. Обычно это различная комбинация дискретных, в том числе и *цифровых сигналов*. Логическая часть определяет условия срабатывания устройств РЗ и содержит обычно несколько логических дискретных элементов. Поэтому появление дискретного сигнала на выходе в общем случае зависит от комбинации входных сигналов. Таких основных комбинаций три – это *логические операции ИЛИ, И, НЕ*.

Кроме того, имеются элементы времени различного назначения с разными пределами установленного времени замедления сигнала. Их разделяют условно на элементы задержки ($t_z < 1$ с) и элементы выдержки времени ($t_v > 1$ с).

Логическая часть формирует выходной дискретный сигнал устройства в целом, который является входным сигналом исполнительной части.

Исполнительная часть. Выходные воздействия релейной защиты, устройств автоматики релейного действия и телеуправления обычно являются дискретными воздействиями на отключение и включение выключателей синхронных генераторов, трансформаторов, линий электропередачи и других электрических установок. Они формируются соответствующими исполнительными элементами в виде относительно мощных электромеханических реле и контакторов, включающих электромагниты отключения и включения приводов выключателей. Исполнительные элементы устройств автоматики непрерывного действия (автоматических регуляторов) представляют собой мощные тири-