

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

Кафедра электромеханики, электрических и электронных аппаратов
(ЭМЭЭА)

О. Н. Молоканов, Е. А. Кузнецова

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Учебное пособие
по дисциплине «Электрические и электронные аппараты»
для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

2-е издание, исправленное и дополненное

ISBN 978-5-7046-3349-5

© О. Н. Молоканов, Е. А. Кузнецова, 2026

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2026

УДК 621.316
ББК 31.279
М 75

*Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ»
в качестве учебного издания*

Подготовлено на кафедре электромеханики, электрических и электронных аппаратов

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. А. В. Михайлов;
канд. техн. наук, проф. А. Г. Годжелло

Молоканов, О.Н.

М 75 Применение электрических аппаратов в системах электроснабжения низкого напряжения [Электронный ресурс]: учеб. пособие / О. Н. Молоканов, Е. А. Кузнецова. 2-е изд., исправленное и дополненное. — Электрон. дан. — М.: Издательство МЭИ, 2026. — 1 электрон. опт. диск DVD-R.

Учебное пособие предназначено для студентов, выполняющих курсовой проект по дисциплине «Электрические и электронные аппараты». В пособии представлена методика расчёта параметров системы электроснабжения, которые необходимы для подбора аппаратуры. Приведены основные критерии выбора электрических аппаратов для систем электроснабжения низкого напряжения. Даны рекомендации по конструкторской проработке низковольтного комплектного устройства. Пособие помогает обучающимся более полно освоить основные положения дисциплины при помощи типовых практических примеров использования электрических аппаратов.

Для подготовки бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Минимальные системные требования:

Тип ЭВМ: ПК на базе Pentium IV и выше.

ОС: Windows XP и выше. Дополнительное программное обеспечение: средство отображения документов в формате PDF.

Веб-браузер: Google Chrome, Internet Explorer, Яндекс Браузер, Edge.

ISBN 978-5-7046-3349-5

© О. Н. Молоканов, Е. А. Кузнецова, 2026

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму изданию	8
ВВЕДЕНИЕ.	10
РАЗДЕЛ 1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЁТЫ	16
1.1. Расчётные токи	17
1.2. Сечения кабелей	19
1.3. Сопротивления	20
1.4. Падения напряжений	21
Пример 1.4. Расчёт номинальных токов и выбор кабелей	25
1.5. Токи коротких замыканий	31
Пример 1.5. Расчёт токов короткого замыкания.	36
1.6. Предельные токи КЗ в аппаратах	44
Пример 1.6. Предельные токи КЗ в аппаратах	47
Контрольные вопросы	49
РАЗДЕЛ 2. ВЫБОР АППАРАТОВ.	51
2.1. Модульные АВ	52
Пример 2.1. Выбор $QF2$	57
2.2. Модульные АВДТ	58
Пример 2.2. Выбор $FD1$	61
2.3. АВ защиты двигателя.	63
Пример 2.3. Выбор $QF1$	67
2.4. Контактор.	69
Пример 2.4. Выбор $KM1$	72
2.5. Тепловое реле	75
Пример 2.5. Выбор $KK1$	78

2.6. Плавкий предохранитель	80
Пример 2.6. Выбор <i>FU1</i>	82
2.7. Кнопочные выключатели	84
Пример 2.7. Выбор <i>SB1</i>	85
2.8. Выключатель-разъединитель	86
Пример 2.8. Выбор <i>QS1</i>	88
2.9. Автоматический выключатель в литом корпусе	89
Пример 2.9. Выбор <i>QF11</i>	103
2.10. Воздушный автоматический выключатель <i>QF10</i>	106
Пример 2.10. Выбор <i>QF10</i>	115
2.11. Карта селективности	117
Контрольные вопросы	121
РАЗДЕЛ 3. КОНСТРУИРОВАНИЕ НКУ	123
3.1. Чертежи аппаратов	123
3.2. Компонировка оборудования	125
Пример 3.2. Оценка габаритов оболочки.	126
3.3. Оболочка НКУ	128
Пример 3.3. Выбор оболочки	128
3.4. Электрические соединения	128
3.5. Сборка НКУ	130
3.6. Рекомендации по оформлению чертежа	148
3.7. Схема электрическая принципиальная	149
Контрольные вопросы	151
Приложение А. Требования к РПЗ	153
Приложение Б. Справочные данные	155
Приложение В. Листы проверки	157
Список литературы	164

Аббревиатуры

IP — степень защиты от англ. *Ingress Protection*

АВ — автоматический выключатель

АВДТ — автоматический выключатель, управляемый дифференциальным током со встроенной защитой от сверхтока

ВТХ — время-токовая характеристика

КЗ — короткое замыкание

КТП — комплектная трансформаторная подстанция

НКИ — наконечник кольцевой изолированный

НКУ — низковольтное комплектное устройство

ВН — высшее напряжение

НН — низшее напряжение

НШВИ — наконечник штыревой втулочный изолированный

НШВИ2 — наконечник штыревой втулочный изолированный двойной

ПВХ — поливинилхлорид

РПЗ — расчётно-пояснительная записка

СИ — система единиц

УЗДП — устройство защиты от дугового пробоя

Условные буквенные обозначения

A1, A2 — выводы катушки управления контактора

EL — светильник

FD — устройство управляемое дифференциальным током

FU — предохранитель

KK — реле электротепловое

KM — контактор электромагнитный

L — фазный проводник

M — двигатель
 N — нейтральный проводник
 PE — защитный проводник
 QF — автоматический выключатель
 QS — выключатель-разъединитель
 SB — кнопочный выключатель
 T — трансформатор
 XS — штепсельная розетка или клеммная колодка
 КБ — кабель

Переменные

b — коэффициент, учитывающий число фаз кабеля при расчёте падения напряжения
 D — диаметр, м
 I — ток, А
 J — момент инерции, кг·м²
 l — длина, м
 P — активная мощность/потери, Вт
 q — площадь поперечного сечения токопроводящей жилы, мм²
 r — активное сопротивление, Ом
 S — полная мощность, В·А
 k — кратность
 U — напряжение, В
 u — падение напряжения, В
 X — кратность тока, соответствующая временной уставке расцепителя с обратнозависимой выдержкой времени
 x — индуктивное сопротивление, Ом
 t — время, с
 z — полное сопротивление, Ом
 δ — допустимое относительное отклонение уставки расцепителя
 Δu — падение напряжения, %
 η — КПД
 ω — угловая частота, об/мин

Верхние индексы

+ — верхнее допустимое отклонение
 — — нижнее допустимое отклонение
 (1) — однофазное КЗ
 (3) — трёхфазное КЗ
 ' — до пуска двигателя
 * — вторая итерация расчёта

max — максимальное значение

min — минимальное значение

Нижние индексы

0 — нулевая последовательность

1 — прямая последовательность

B — рабочее значение

c — значение относится к катушке управления контактора

cn — номинальная наибольшая отключающая способность

cs — номинальная рабочая наибольшая отключающая способность

cu — номинальная предельная наибольшая отключающая способность

cw — кратковременно допустимое значение

Δn — номинальный наибольший отключающий дифференциальный ток

e — рабочее значение

I — токовая уставка

i — уставка расцепителя мгновенного действия

io — уставка сверхмгновенного расцепителя

t — временная уставка

n — номинальное значение

p — ударный (пиковый)

q — условное значение

r — уставка расцепителя с длительной обратно зависимой выдержкой времени

sd — уставка расцепителя с кратковременной выдержкой

s — пуск

Z — длительно допустимое значение

a — аппарат

ki — короткое замыкание в j -ой расчётной точке $j = 0, 1...3$

$кбj$ — j -ый кабель $j = 1, 2...8$

k — короткое замыкание

n — нулевой проводник

c — сеть

y — удельный

Σi — сумма от источника до i -ой расчётной точки $i = 0, 1...4$

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Во втором издании исправлены опечатки и неточности, найденные за пять лет использования пособия в учебном процессе. Важную роль в этом сыграла обратная связь от студентов, активно использовавших пособие при выполнении курсовых проектов. Авторы благодарят их за помощь. Переработки подверглись разделы, вызывающие наибольшие трудности при освоении. Это касается, в первую очередь, построения время-токовых характеристик для карты селективности и конструирования НКУ.

Основные изменения:

Общие

1. Тип заземления системы в рассматриваемом примере изменён на $TN-S$.
2. Стилистически унифицированы буквенные обозначения величин и индексов переменных.
3. Расширен перечень контрольных вопросов для большего соответствия задаваемым на защитах проекта.
4. Для розеток задаётся не мощность подключаемой нагрузки, а номинальный ток розетки.

Раздел 1

5. Выбор кабелей проводится по ГОСТ с учётом способа монтажа.
6. При расчёте падения напряжения в линии учитывается коэффициент мощности для уменьшения погрешности при сложении в скалярной форме изначально векторных величин.
7. Приведён порядок действий при отклонении падения напряжения от установленных стандартами значений.

8. Для удобства дальнейшего подбора оборудования, расчёт токов КЗ дополнен определением максимального и минимального токов, которые могут протекать через каждый из аппаратов в системе.

Раздел 2

9. Все примеры выбора аппаратов переработаны с использованием оборудования отечественных производителей.

10. В связи с отсутствием у ряда производителей таблиц энергетической селективности рассмотрен пример выбора в качестве *QF10* воздушного автоматического выключателя. Приведена краткая теоретическая справка и ключевые отличия от выключателя в литом корпусе.

11. Пошагово рассмотрен процесс построения карты селективности и выносимых на неё время-токовых характеристик. Подробно рассмотрен вопрос учёта допусков срабатывания аппаратов.

Раздел 3

12. Изменена рекомендуемая конструкция НКУ, добавлены часто встречающиеся на практике нулевые шины и шины заземления.

13. Пошагово и с иллюстрациями рассмотрен процесс сборки НКУ.

ВВЕДЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены вопросы применения электрических аппаратов низкого напряжения в рамках курсового проектирования по дисциплине «Электрические и электронные аппараты». Оно структурно подразделено на три основные части, соответствующие ключевым этапам выполнения проекта.

В первой части изложена методика расчёта электрических параметров электрооборудования, выбора поперечного сечения кабелей, а также определения токов коротких замыканий (КЗ) и падений напряжений в характерных точках системы электроснабжения.

Вторая часть посвящена вопросам выбора **коммутационной аппаратуры и аппаратуры управления**. Приведены основные критерии выбора электрических аппаратов различных типов. Обоснована необходимость каждого из критериев. Особое внимание уделено выбору и особенностям настройки электронных расцепителей автоматических выключателей (АВ), а также методике построения карты селективности.

В третьей части учебного пособия детально рассматривается процесс конструирования **низковольтного комплектного устройства** (НКУ). Сформулированы основные требования к конструкции НКУ, пошагово описан процесс его сборки и приведён алгоритм создания чертежа общего вида, а также требования по его оформлению.

Отличительной чертой учебного пособия является подробное рассмотрение вопросов, вызывающих наибольшие сложности у студентов при выполнении проекта. Теоретический материал сопровождается конкретными практическими примерами расчётов, выбора электрических аппаратов и конструкторских решений. Для этого в пособии используется обобщённый вариант системы электроснабжения, приведённый на рис. В1.

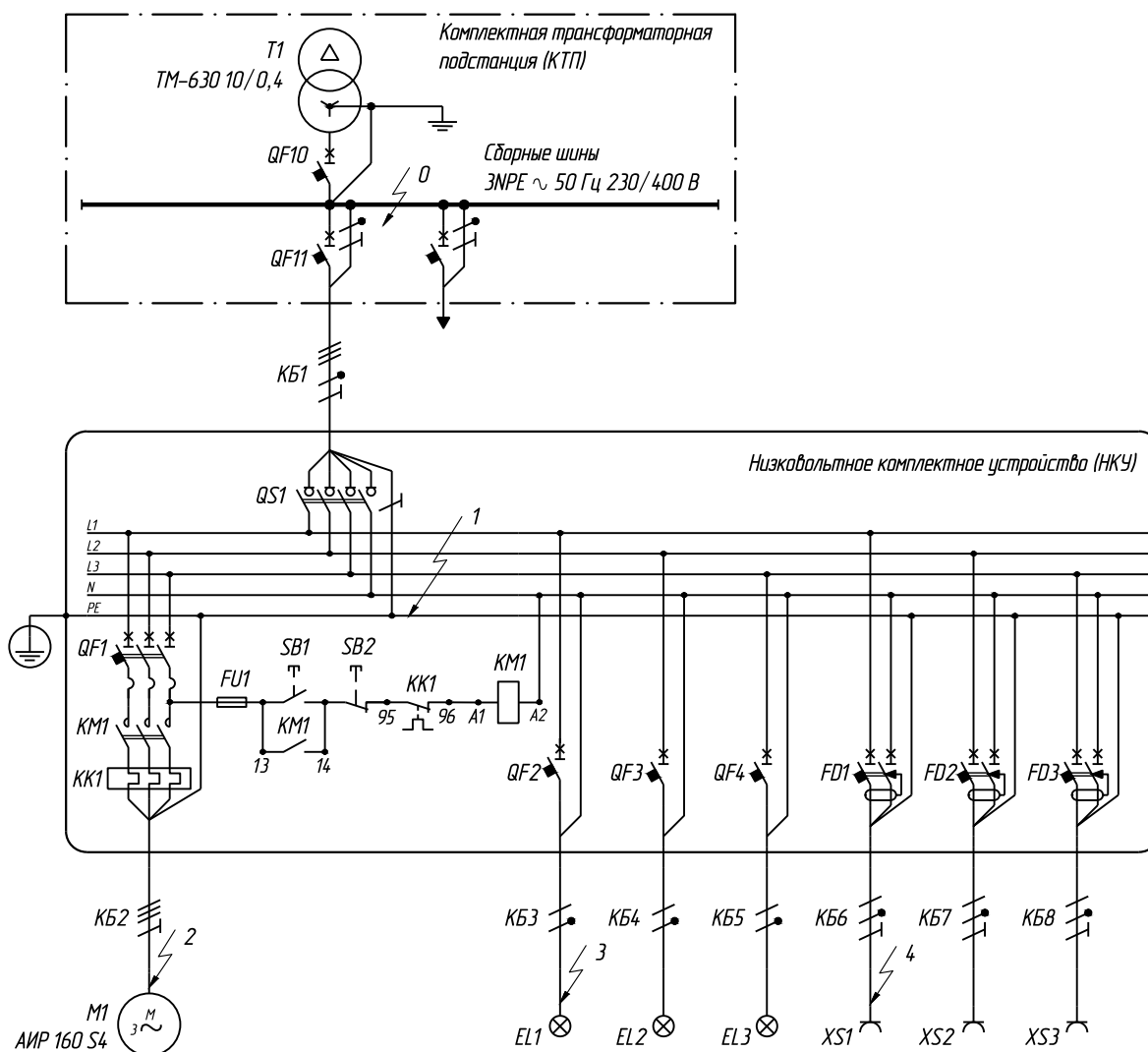


Рис. В1. Принципиальная схема системы электроснабжения:

$T1$ — трансформатор; $QF10$, $QF11$, $QF1...QF4$ — АВ; $QS1$ — выключатель-разъединитель; $FD1$, $FD2$, $FD3$ — АВДТ; $KM1$ — контактор; $KK1$ — тепловое реле; $FU1$ — предохранитель; $SB1$, $SB2$ — кнопочный выключатель; $M1$ — двигатель; $EL1...EL3$ — светильники; $XS1...XS3$ — розетки; $KB1...KB8$ — кабели; 0...4 — расчётные точки

В дальнейшем в учебном пособии используются буквенно-цифровые обозначения аппаратов, характерных точек и кабелей согласно этой схеме.

Перед рассмотрением системы электроснабжения важно отметить, что основная цель учебного пособия заключается в обеспечении обучающихся методическими материалами по выполнению курсового проекта по дисциплине «Электрические и электронные аппараты». При этом подразумевается, что, обращаясь к разделам пособия, читатель уже знаком с соответствующими положениями основной теоретической части курса. В связи с этим многие теоретические вопросы, касающиеся

устройства и принципа действия электрических аппаратов, а также специальные термины, в пособии поясняются не в полном объёме. При возникновении трудностей с освоением материала пособия рекомендуется обращаться к соответствующим разделам основного учебника по дисциплине «Электрические и электронные аппараты», приведённого в списке литературы под позицией [1].

Система электроснабжения на рис. В1 представлена в виде **принципиальной схемы** трёхфазной цепи с частичным применением **однолинейного представления**¹. **Тип заземления системы** электроснабжения — ***TN-S***². В качестве источника питания выступает **силовой трансформатор** *T1*, преобразующий высокое напряжение сети 10 кВ в низкое 400 В. **Обмотка высшего напряжения** (ВН) трансформатора соединена по схеме треугольник (Δ), а обмотка **низшего напряжения** (НН) — в звезду (Y) с **глухо заземлённой нейтралью**. От трансформатора *T1* через **четырёхполюсный автоматический выключатель** *QF10* питание поступает на **сборные шины** 230/400 В **комплектной трансформаторной подстанции** (КТП), на которых находится расчётная точка 0. При этом согласно схеме к автоматическому выключателю *QF10* подключены только фазные проводники *L1*, *L2*, *L3* и нейтральный проводник *N*, в то время как защитный проводник *PE* подключается к шине *PE* от трансформатора *T1* напрямую в обход *QF10*³. К сборным шинам подключены две отходящие кабельные линии, однако в дальнейшем рассматривается только первая из них. Рассматриваемая отходящая линия защищена установленным в её начале трёхполюсным АВ *QF11*, который коммутирует

¹При однолинейном представлении в целях удобства визуального восприятия схемы привычное из курса ТОЭ отображение каждой из фаз и нейтрали отдельными линиями, заменяется изображением одной линии. Для сохранения информации о числе проводников на линию наносятся штрихи: **линейный (фазный) проводник** — , **нейтральный (нулевой рабочий) проводник** $\text{—}\bullet$, **защитный проводник** $\text{—}|$.

²Первая буква *T* означает, что одна из частей источника питания, находящихся под напряжением, заземлена. В нашем случае источником питания служит трансформатор, а именно его вторичная обмотка. Она находится под напряжением, и согласно схеме соединена в звезду, общая точка которой имеет соединение с землёй, что отображено соответствующим символом.

Вторая буква *N* говорит о том, что открытые проводящие части электроустановки имеют непосредственное соединение с заземлённой частью источника питания. В нашем случае в роли открытых проводящих частей могут выступать корпус электродвигателя *M1*. Он непосредственно соединен проводником с заземленной частью источника питания или в нашем случае с общей точкой звезды вторичной обмотки трансформатора.

Последующая буква *S* говорит о том, каким именно образом организовано соединение открытых проводящих частей с землёй. В данном случае для этого прокладывается отдельный (*S* от англ. *separate*) защитный проводник, обозначаемый *PE* (англ. *protective earthing*).

³Согласно пп. 543.3.3 ГОСТ Р 50571.5.54-2013 в цепях защитных проводников не следует устанавливать отключающие устройства.

линейные (фазные) проводники $L1$, $L2$, $L3$ нейтральный (нулевой рабочий) проводник N , при этом защитный проводник PE и нейтральный (нулевой рабочий) проводник N не разрываются $QF11$ ⁴. К выводам $QF11$ со стороны нагрузки (нижние выводы) подключены три фазные жилы пятижильного кабеля КБ1. Две оставшиеся жилы КБ1 — N - и PE -жила — подключаются напрямую к сборным шинам КТП в обход $QF11$. Конец КБ1 подключается непосредственно ко вводу НКУ.

На вводе НКУ установлен четырёхполюсный выключатель-разъединитель $QS1$, после которого питание распределяется на несколько параллельных линий, питающихся по кабелям КБ2...КБ8. На выводах $QS1$ со стороны нагрузки (нижние выводы) расположена расчётная точка 1.

Четырёхжильный кабель КБ2 (три фазных жилы и одна PE -жила) питает трёхфазную нагрузку в виде асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором $M1$, на клеммах которого расположена расчётная точка 2. Для защиты кабеля КБ2 и электродвигателя $M1$ от сверхтоков предусмотрены трёхполюсный автоматический выключатель (АВ) $QF1$, в данном примере оснащённый только расцепителем мгновенного действия, и тепловое реле $KK1$. Для пуска и остановки двигателя используется электромагнитный контактор $KM1$, для коммутации которого предусмотрена слаботочная цепь управления, состоящая из кнопочных выключателей для пуска $SB1$ и остановки $SB2$, катушки электромагнита управления $KM1$, вспомогательного замыкающего контакта контактора $KM1$, а также размыкающего контакта теплового реле $KK1$. Цепь управления защищена от сверхтоков плавким предохранителем $FU1$.

Двухжильный кабель КБ3 (жилы $L1$ и N) питает однофазную осветительную нагрузку $EL1$ и защищён от сверхтоков при помощи однополюсного АВ $QF2$. Линии КБ4 и КБ5 аналогичны КБ3, за исключением того, что подключены к другим фазам сети. Трёхжильный кабель КБ6 (жилы $L1$, N и PE) питает однофазную нагрузку, подключаемую к сети при помощи штепсельных розеток $XS1$. Кабель КБ6 защищён от сверхтоков при помощи автоматического выключателя, управляемого дифференциальным током, со встроенной защитой от сверхтока (АВДТ) $FD1$. За счёт функции дифференциальной защиты

⁴В трёхфазных системах в нейтрали протекают токи нулевой последовательности из-за несимметрии нагрузки и гармоник, кратные трём, из-за её нелинейности. Если эти явления выражены сильно, ток в нейтрали может превышать фазный. В таких случаях нейтральному проводнику нужна отдельная защита, поэтому используются четырёхполюсные выключатели. Для нагрузки, питаемой по КБ1 предполагается низкий уровень несимметрии и нелинейности, поэтому отдельная защита нейтральному проводнику не требуется и применяется трёхполюсный $QF11$.

FD1 срабатывает при превышении **тока утечки на землю** или **тока замыкания на землю** заданного значения и тем самым обеспечивает защиту от пожара, вызванного повреждением изоляции, а также защиту человека от поражения электрическим током. Линии КБ7 и КБ8 аналогичны линии КБ6, за исключением того, что подключены к другим фазам сети. Расчётные точки 3 и 4 расположены в конце кабельных линий КБ3 и КБ6 соответственно.

Короткие замыкания (КЗ) возникают при соединении точек системы, обладающих разными потенциалами напрямую без нагрузки т. е. «накоротко». Расположение характерных точек в начале и конце кабельных линий или в местах присоединения кабелей к аппаратам даёт возможность в будущем оценить как максимально, так и минимально возможные сверхтоки, протекающие через аппараты.

В целях обеспечения требований защиты от поражения электрическим током провод *РЕ* присоединяется к токопроводящей оболочке НКУ, что отражено соответствующим символом защитного заземления.

Теоретический материал пособия сопровождается числовыми примерами расчётов на основе следующих исходных данных:

Трансформатор

Номинальная мощность $S_{n.T1}$	630 кВ·А
Номинальное напряжение обмотки НН $U_{n.T1}$	400 В
Потери короткого замыкания $P_{к.T1}$	8,1 кВт
Напряжение короткого замыкания $u_{к.T1}$	5,5 %

Кабельные линии

Длина КБ1 $l_{кб1}$ и способ монтажа ⁵	100 м, D1
Длина КБ2 $l_{кб2}$ и способ монтажа	10 м, C
Длины КБ3...КБ8 $l_{кб3}...l_{кб8}$ и способ монтажа	20 м, A2

Двигатель

Тип	АИР 160 S4
Номинальное напряжение $U_{n.M1}$	380 В
Номинальная мощность $P_{n.M1}$	15 кВт
Номинальный КПД , $\eta_{n.M1}$	89 %
Коэффициент мощности $\cos \varphi_{n.M1}$	0,87
Кратность пускового тока , $k_{s.M1}$	7
Время пуска $t_{s.M1}$	1,5 с

Светильники

Мощность $P_{n.EL1}$, $P_{n.EL2}$, $P_{n.EL3}$	0,4 кВт
Коэффициент мощности $\cos \varphi_{n.EL1}$, $\cos \varphi_{n.EL2}$, $\cos \varphi_{n.EL3}$	0,95

⁵ГОСТ Р 50571.5.52—2011. Электроустановки низковольтные. Ч. 5-52. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки. М., 2006, IV, 66 с.

Номинальное напряжение $U_{n.EL1}, U_{n.EL2}, U_{n.EL3}$	220 В
Розетки	
Номинальный ток ⁶ $I_{n.XS1}, I_{n.XS2}, I_{n.XS3}$	16 А
Оболочка НКУ	
Степень защиты	не менее IP65

⁶В отличие от линий со светильниками, где известны их электрические параметры, к розеткам могут быть подключены электроприёмники, характеристики которых заранее неизвестны. Однако, какая бы ни была нагрузка, её ток не должен превышать номинальный ток розетки. Поэтому в дальнейшем при расчётах, исходя из наихудшего случая, расчётные токи в линиях КБ6...КБ8 принимаются равными номинальному току розетки.

РАЗДЕЛ 1

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЁТЫ

На начальном этапе проекта необходимо выполнить расчёты токов в линиях, выбрать сечения питающих кабелей и найти сопротивления всех входящих в цепь элементов, на основании чего рассчитать токи коротких замыканий (КЗ) в расчётных точках системы¹.

При выполнении предварительных расчётов рекомендуется соблюдать следующие правила.

1. Во избежание путаницы с размерностями выполнять все расчёты исключительно в СИ без использования кратных единиц (приставки кило-, милли- и т. д.), применяя кратные единицы только при представлении конечного результата вычислений, а также соблюдать следующие правила округления:

а) все токи, за исключением токов КЗ, выражать в амперах и округлять до десятых;

б) токи КЗ выражать в килоамперах и округлять до сотых;

в) активные, индуктивные и полные сопротивления выражать в миллиомах и округлять до десятых.

2. Промежуточные результаты проекта необходимо предоставлять во время консультаций, заполняя лист проверки **приложения В**.

3. Итоговые результаты работы над первым разделом предоставляются в виде расчётно-пояснительной записки (РПЗ), оформленной в соответствии с требованиями **приложения А**.

¹Исходные данные для расчёта содержатся в задании на проект.

1.1. Расчётные токи

Линия трансформатора

Номинальный ток силового трёхфазного трансформатора на стороне НН рассчитывается по формуле

$$I_{n.T1} = \frac{S_{n.T1}}{\sqrt{3} \cdot U_{n.T1}}, \quad (1.1)$$

где $S_{n.T1}$ — номинальная мощность трансформатора, В·А; $U_{n.T1}$ — номинальное напряжение обмотки НН трансформатора, В.

Линия КБ2

По схеме электроснабжения (рис. В1) к кабельной линии КБ1 подключена трёхфазная нагрузка, в качестве которой выступает асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Любой двигатель преобразует подводимую к нему электрическую энергию в механическую, поэтому под его номинальной мощностью подразумевается выдаваемая им механическая мощность. Активная электрическая мощность, потребляемая двигателем из сети, будет несколько больше механической за счёт потерь энергии при электромеханическом преобразовании, что учитывается при помощи КПД. В двигателе создаётся магнитное поле, необходимое для электромеханического преобразования энергии, поэтому из сети потребляется не только активная, но и реактивная мощность. Полный ток будет больше активного, что учитывается коэффициентом мощности. По схеме электроснабжения кабель КБ2 питает только двигатель, поэтому номинальный ток двигателя, и расчётный ток фазной жилы кабеля КБ2 равны

$$I_{B.кб2} = I_{n.M1} = \frac{P_{n.M1}}{\sqrt{3} \cdot U_{n.M1} \cdot \eta_{n.M1} \cdot \cos \varphi_{n.M1}}, \quad (1.2)$$

где $P_{n.M1}$ — номинальная мощность двигателя, Вт; $U_{n.M1}$ — номинальное напряжение двигателя, В; $\eta_{n.M1}$ — КПД двигателя (в долях); $\cos \varphi_{n.M1}$ — номинальный коэффициент мощности двигателя.

При подаче напряжения на обмотку статора асинхронного двигателя его ротор начинает ускоряться и постепенно достигает установившейся частоты вращения. На интервале ускорения помимо преодоления момента сопротивления нагрузки на валу двигатель должен развить значительный динамический момент, равный произведению момента инерции ротора и нагрузки на угловое ускорение $J_{M1} d\omega_{M1}/dt$. В связи

с этим во время пуска ток, потребляемый двигателем из сети, в несколько раз превышает номинальное значение. Установившееся действующее значение этого тока называется **пусковым током** и определяется по формуле

$$I_{s.M1} = k_{s.M1} \cdot I_{s.M1}, \quad (1.3)$$

где $k_{s.M1}$ — кратность пускового тока по отношению к номинальному току в соответствии с паспортными данными двигателя.

Обмотка двигателя обладает активно-индуктивным сопротивлением, поэтому в первый момент времени после подачи напряжения возникает переходный процесс, аналогичный включению активно-индуктивной нагрузки на синусоидальное напряжение. За счёт этого возникает **переходящий ток, апериодическая составляющая** которого обуславливает появление значительного броска тока в начале пуска. Время, за которое после подачи напряжения ток в одной из фаз достигает своего максимального значения, составляет в среднем 10 мс при частоте сети 50 Гц. Максимальное мгновенное значение этого тока называется *ударным пусковым током* двигателя. В общем случае он определяется электрическими параметрами питающей сети и двигателя, а также мгновенным значением фазного напряжения сети в момент включения (фазой коммутации). В связи с тем, что фаза коммутации — величина случайная, а также из-за того, что в каждой из трёх фаз она различная, максимальное значение ударного пускового тока можно рассчитать только приближённо из наихудшего случая

$$I_{p.M1} \approx 1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{s.M1}. \quad (1.4)$$

Линии КБ3, КБ4 и КБ5

Каждая из кабельных линий КБ3...КБ5 питает однофазный светильник $EL1...EL3$ одинаковой мощности. Для таких нагрузок обычно указывается активная электрическая мощность, поэтому в отличие от (1.2), в формулу для определения тока КПД не входит

$$I_{B.кб3} = I_{B.кб4} = I_{B.кб5} = \frac{P_{n.EL1}}{U_{n.EL1} \cdot \cos \varphi_{n.EL1}}, \quad (1.5)$$

где $P_{n.EL1}$ — номинальная мощность осветительной нагрузки в каждой линии, Вт; $U_{n.EL1}$ — номинальное напряжение светильников, В; $\cos \varphi_{n.EL1}$ — номинальный коэффициент мощности светильников.

Линии КБ6, КБ7 и КБ8

Линии КБ6...КБ8 питают нагрузку, подключенную через штепсельные розетки $XS1...XS3$ с одинаковым номинальным током. Считаем, что полная мощность нагрузки этих линий неизвестна, но ограничена заданным номинальным током розеток

$$I_{B.к66} = I_{B.к67} = I_{B.к68} = I_{n.XS1} = 16 \text{ А.} \quad (1.6)$$

Линия КБ1

Линия КБ1 общая — через неё проходят токи от всех нагрузок. Согласно схеме электроснабжения, кабель КБ1 трёхфазный. Ток кабеля — это ток в каждой из его фазных жил. Для определённости рассмотрим жилу $L1$. По ней протекает рабочий ток фазной жилы кабеля КБ2 $I_{B.к62}$, рассчитанный по (1.2), а также рабочие токи однофазных нагрузок, подключенных к фазе $L1$ — $I_{B.к63}$ и $I_{B.к66}$, рассчитанные по (1.5) и (1.6). В общем случае фазовый угол этих токов разный, поэтому их нужно складывать векторно, однако в проекте делается допущение 1.1.

Допущение 1.1

При сложении токов в параллельных ветвях не учитывается их фазовый сдвиг.

Введение допущения 1.1 даёт возможность выполнять арифметическое сложение величин, результатом которого является несколько завышенное значение тока по сравнению с действительным, что обеспечивает расчётный запас.

Учитывая допущение, расчётный ток кабеля КБ1 составит

$$I_{B.к61} = I_{B.к62} + I_{B.к63} + I_{B.к66}. \quad (1.7)$$

1.2. Сечения кабелей

Подключение нагрузки к источнику питания $T1$ осуществляется при помощи **электрических кабелей** КБ1...КБ8, представляющих собой несколько изолированных **токопроводящих жил (проводников)**, которые заключены в общую оболочку. Протекающий по жилам кабеля электрический ток по закону Джоуля—Ленца вызывает потери мощности, которые выделяются в виде тепловой энергии. Это приводит к нагреванию жилы кабеля, соприкасающейся с изоляцией. При

продолжительном воздействии повышенной температуры изоляция постепенно теряет электрическую прочность, что со временем может стать причиной КЗ, так как именно изоляция разделяет проводники с разными потенциалами. При одинаковой длине кабеля чем больше площадь поперечного сечения жилы, тем ниже её электрическое сопротивление, и тем меньше тепловой энергии выделяется при протекании тока. Во избежание нагрева свыше допустимой температуры сечения кабелей должны соответствовать протекающим по ним токам. Важно отметить, что температура зависит не только от протекающего тока и сечения жил, но и от материала жил, а также от условий теплоотдачи с поверхности кабеля, которые на практике определяются **способом монтажа** кабельных линий. Действующее значение тока, при котором достигается допустимая температура изоляции при заданном способе монтажа, называется **длительно допустимый ток I_Z** или **допустимая токовая нагрузка** кабеля. В рамках проекта рекомендуется выбирать кабели с медными токопроводящим жилами с поливинилхлоридной (ПВХ) изоляцией (англ. *PVC*). Способ монтажа кабеля определяется заданием на проект. Выбор площади поперечных сечений жил кабелей проводится по расчётному току и способу монтажа из дискретного ряда значений в соответствии с **ГОСТ Р 50571.5.52—2011**. В системе электроснабжения (рис. **В1**) используются кабели двух типов.

1. Кабели, питающие однофазную нагрузку КБЗ...КБ8, имеют две нагруженные током жилы — фазную L и нейтральную N . В защитном проводнике PE в нормальном режиме ток не протекает. Площади поперечных сечений их жил выбираются в соответствии с табл. *В.52.2* из ГОСТ Р 50571.5.52.

2. Кабели, питающие трёхфазную нагрузку КБ1...КБ2 имеют три² нагруженные током жилы — фазные $L1$, $L2$, $L3$. Площадь поперечного сечения этих жил выбирается в соответствии с табл. *В.52.4* того же ГОСТ.

1.3. Сопротивления

Трансформатор

Полное, активное и индуктивное сопротивления силового трансформатора, приведённые к обмотке НН, рассчитываются по формулам:

²В первом приближении в проекте считается, что нагрузка симметричная, поэтому в нейтральном проводнике N ток не протекает. В рамках проекта рекомендуется выбирать площади поперечных сечений N -, PE -жил такими же, как и для L -жил.

$$z_{T1} = \frac{U_{n.T1}^2}{S_{n.T1}} \cdot \frac{u_{к.T1}}{100}, \quad (1.8)$$

$$r_{T1} = \frac{P_{к.T1}}{3 \cdot I_{n.T1}^2}, \quad (1.9)$$

$$x_{T1} = \sqrt{z_{T1}^2 - r_{T1}^2}, \quad (1.10)$$

где $u_{к.T1}$ — напряжение короткого замыкания трансформатора, %;
 $P_{к.T1}$ — потери короткого замыкания трансформатора, Вт.

Кабели

На основании выбранного поперечного сечения жил кабеля, его длины и данных по удельным сопротивлениям из [приложения Б](#) проводится расчёт активного и индуктивного сопротивлений кабеля

$$r_{кбj} = r_{у.кбj} \cdot l_{кбj}, \quad (1.11)$$

$$x_{кбj} = x_{у.кбj} \cdot l_{кбj}, \quad (1.12)$$

где $r_{у.кбj}$ и $x_{у.кбj}$ — удельное активное и индуктивное сопротивления j -го кабеля соответственно, Ом/м (см. [приложение Б](#)); $l_{кбj}$ — длина j -го кабеля, м.

1.4. Падения напряжений

Номинальный режим

Выбранные кабели необходимо проверить по условию допустимого падения напряжения. Чем больше длина кабеля, тем выше его сопротивление и тем сильнее напряжение на нагрузке отличается от напряжения источника питания. [Падения напряжений](#) между источником питания и нагрузкой для освещения должно быть не более 3 %, для других пользователей — 5 % от номинального напряжения сети между фазой и нейтралью.

При условии симметричной трёхфазной нагрузки в нейтральном проводнике N ток отсутствует, и падения напряжения в нём нет. При питании однофазной нагрузки через нейтральный проводник N

протекает расчётный ток и, при условии равенства сопротивлений фазного L - и нейтрального N - проводников в них возникают одинаковые падения напряжений. В связи с этим принимаем, что в нейтральной жиле трёхфазных кабелей падения напряжения нет, а в однофазных — есть, причём такое же как и в фазной жиле. Таким образом, в общем случае для j -го кабеля падения напряжения в номинальном режиме определяются по формуле

$$u_{кбj} = b_{кбj} (r_{кбj} \cdot \cos \varphi_{кбj} + x_{кбj} \cdot \sin \varphi_{кбj}) I_{B.кбj}, \quad (1.13)$$

где $b_{кбj}$ — коэффициент, равный 1 для трёхфазных кабелей (КБ1, КБ2) и 2 для однофазных (КБ3...КБ8); $\cos \varphi_{кбj}$ — коэффициент мощности, для кабелей КБ2...КБ5 принять в соответствии с заданным коэффициентом мощности питаемой нагрузки, для остальных кабелей — 0,8; $\sin \varphi_{кбj}$ — определяется через основное тригонометрическое тождество как $\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{кбj}}$; $I_{B.кбj}$ — расчётное значение тока в соответствии с (1.2), (1.5)...(1.7).

По отношению к номинальному напряжению между фазой и нейтралью полученное значение составит (%)

$$\Delta u_{кбj} = \frac{100\sqrt{3} \cdot u_{кбj}}{U_{n.T1}}. \quad (1.14)$$

Обращаясь к схеме электроснабжения на рис. В1, на основании рассчитанных падений напряжений в каждом из кабелей $\Delta u_{кб1}$, $\Delta u_{кб2}$, $\Delta u_{кб3}$, $\Delta u_{кб6}$ определяются итоговые падения напряжений (%) на зажимах потребителей в расчётных точках 2, 3 и 4

$$\Delta u_2 = \Delta u_{кб1} + \Delta u_{кб2}, \quad (1.15)$$

$$\Delta u_3 = \Delta u_{кб1} + \Delta u_{кб3}, \quad (1.16)$$

$$\Delta u_4 = \Delta u_{кб1} + \Delta u_{кб6}. \quad (1.17)$$

Принимая во внимание тип нагрузок на рис. В1, при корректном выборе сечений кабелей должны выполняться условия $\Delta u_2 \leq 5$, $\Delta u_3 \leq 3$, $\Delta u_4 \leq 5$. В случае невыполнения этих неравенств необходимо увеличить сечения жил кабелей, начиная с кабеля с наибольшим падением напряжения.

Режим пуска двигателя

Во время разгона ротора двигателя до номинальной частоты вращения из сети потребляется большой пусковой ток (1.3). Этот ток протекает через кабели КБ1 и КБ2, оказывая на них, прежде всего, термическое воздействие. Так как в нормальных условиях пуск двигателя и выход его на номинальный режим происходит за несколько секунд, то этот ток не вызывает превышения температуры кабелей выше допустимых значений. Однако кроме повышенного выделения тепловой энергии, пусковой ток также вызывает значительные падения напряжения в кабелях КБ1 и КБ2. Электромагнитный момент, развиваемый асинхронным двигателем, пропорционален квадрату подводимого напряжения. В связи с этим уменьшение напряжения на выводах двигателя может приводить к увеличению времени пуска или вовсе к полной невозможности пуска.

Необходимо также отметить, что большое падение напряжения в момент пуска двигателя может привести к тому, что ток в катушке электромагнита контактора КМ1 окажется недостаточным для создания электромагнитной силы, необходимой для удержания якоря в замкнутом положении. В этом случае главные контакты контактора разомкнутся, что приведёт к временному обесточиванию двигателя. Отсутствие тока в линии с двигателем уменьшит падение напряжения в питающем кабеле КБ1, что приведёт к увеличению напряжения, подаваемого на катушку контактора, и его главные контакты вновь замкнутся. После замыкания контактов снова начнёт протекать пусковой ток двигателя, который опять уменьшит напряжение на катушке электромагнита контактора, и весь процесс повторится сначала. Такие кратковременные замыкания и размыкания контактов (вибрация) сопровождаются образованием между ними коротких дуг, что вызывает преждевременный износ контактов и может привести к их свариванию. В дополнение к этому, магнитная цепь электромагнита при разомкнутом якоре обладает малой магнитной проводимостью, за счёт чего индуктивность катушки электромагнита уменьшается. В случае электромагнита переменного тока это приводит к уменьшению полного сопротивления катушки, что влечёт за собой увеличение среднего тока в катушке по сравнению с нормальным режимом работы и может привести к перегреву изоляции катушки и выходу из строя контактора.

Согласно действующим стандартам, падение напряжения во время пуска двигателей и другого оборудования с большим пусковым током может превышать допустимые пределы в 5 %. В рамках проекта необходимо обеспечить падение напряжения во время пуска двигателя не более 15 %.

До запуска двигателя ток в кабеле КБ2 отсутствовал, поэтому ток КБ1 до пуска в соответствии с (1.7) определяется как

$$I'_{B.кб1} = I_{B.кб3} + I_{B.кб6}. \quad (1.18)$$

Падение напряжения в кабеле КБ1 до пуска двигателя составит

$$u'_{кб1} = b_{кб1} (r_{кб1} \cdot \cos \varphi_{кб1} + x_{кб1} \cdot \sin \varphi_{кб1}) I'_{B.кб1}. \quad (1.19)$$

Во время пуска двигателя в кабеле КБ1 к $u'_{кб1}$ добавится дополнительное падение напряжения от пускового тока $I_{s.M1}$. Суммарное падение напряжения в кабеле КБ1 при пуске составит

$$u_{s.кб1} = u'_{кб1} + b_{кб1} (r_{кб1} \cos \varphi_{s.M1} + x_{кб1} \sin \varphi_{s.M1}) I_{s.M1}, \quad (1.20)$$

где $\cos \varphi_{s.M1}$ — коэффициент мощности двигателя при пуске. В отсутствии данных [принимается](#) [раным 0,3](#) ($\sin \varphi_{s.M1} = \sqrt{1 - 0,3^2} = 0,95$).

По отношению к номинальному напряжению между фазой и нейтральным проводником это составит

$$\Delta u_{s.кб1} = \frac{100\sqrt{3} \cdot u_{s.кб1}}{U_{n.T1}}. \quad (1.21)$$

Во время пуска двигателя по кабелю КБ2 протекает ток $I_{s.M1}$, падение напряжения в нём составит

$$u_{s.кб2} = b_{кб2} (r_{кб2} \cdot \cos \varphi_{s.M1} + x_{кб2} \cdot \sin \varphi_{s.M1}) I_{s.M1}, \quad (1.22)$$

что в относительных единицах (%)

$$\Delta u_{s.кб2} = \frac{100\sqrt{3} \cdot u_{s.кб2}}{U_{n.T1}}. \quad (1.23)$$

Относительное падение напряжения на выводах двигателя во время пуска (%), определяется по формуле

$$\Delta u_{s.2} = \Delta u_{s.кб1} + \Delta u_{s.кб2}. \quad (1.24)$$

При корректном выборе сечений кабелей должно выполняться условие $\Delta u_{s.2} \leq 15$. Если требования по допустимому падению напряжения не выполняются, необходимо увеличить площадь поперечного сечения жил кабелей, начиная с кабелей, у которых падение напряжения самое большое. Затем повторите расчеты.

Пример 1.4

Расчёт номинальных токов и выбор кабелей

Далее проводятся расчёты, в которых используются исходные данные, приведённые на стр. 14.

Расчётные токи

Номинальный ток трансформатора $T1$ по (1.1)

$$I_{n.T1} = \frac{S_{n.T1}}{\sqrt{3} \cdot U_{n.T1}} = \frac{630 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 909,3 \text{ А.}$$

Линия КБ2 питает только двигатель, потому действующее значение расчётного тока, протекающего по ней в установившемся режиме в соответствии с (1.2)

$$\begin{aligned} I_{B.к62} = I_{n.M1} &= \frac{P_{n.M1}}{\sqrt{3} \cdot U_{n.M1} \cdot \eta_{n.M1} \cdot \cos \varphi_{n.M1}} = \\ &= \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,89 \cdot 0,87} = 29,4 \text{ А.} \end{aligned}$$

Действующее значение тока в линии КБ2 во время пуска двигателя по (1.3)

$$I_{s.M1} = k_{s.M1} \cdot I_{n.M1} = 7 \cdot 29,4 = 205,8 \text{ А.}$$

Максимальное мгновенное значение тока в линии КБ2 при пуске двигателя по формуле (1.4)

$$I_{p.M1} \approx 1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{s.M1} = 1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 205,8 = 349,3 \text{ А.}$$

Линии КБ3, КБ4 и КБ5 питают светильники, с известной активной электрической мощностью и коэффициентом мощности. В соответствии с (1.5) расчётное значение тока этих линий

$$I_{B.к63} = I_{B.к64} = I_{B.к65} = \frac{P_{n.EL1}}{U_{n.EL1} \cdot \cos \varphi_{n.EL1}} = \frac{0,4 \cdot 10^3}{220 \cdot 0,95} = 1,9 \text{ А.}$$

Линии КБ6, КБ7, КБ8 питают неизвестную нагрузку, подключенную через розетки. Считаем, что нагрузка этих линий ограничена заданным номинальным током розетки. В соответствии с (1.6) ток составит

$$I_{B.к66} = I_{B.к67} = I_{B.к68} = I_{n.XS1} = 16 \text{ А.}$$

Линия КБ1 общая, питающая как трёхфазные, так и однофазные нагрузки. Поэтому по схеме электроснабжения ток в ней определяется суммой токов в одной из фаз трёхфазного кабеля и однофазных кабелей, подключенных к одноимённой фазе (1.7).

$$I_{B.кб1} = I_{B.кб2} + I_{B.кб3} + I_{B.кб6} = 29,4 + 1,9 + 16 = 47,3 \text{ А.}$$

Сечения кабелей

Кабель КБ1 смонтирован способом D1, расчётный ток составил $I_{B.кб1} = 47,3 \text{ А}$. Кабель трёхфазный, поэтому в нём три нагруженные током жилы. По табл. В.52.4 ГОСТ 50571.5.52—2011, округляем расчётный ток до ближайшего большего значения допустимой токовой нагрузки $I_{Z.кб1} = 50 \text{ А}$. Этот ток соответствует поперечному сечению жилы кабеля $q_{кб1} = 10 \text{ мм}^2$.

Кабель КБ2 смонтирован способом С, расчётный ток составил 29,4 А, в кабеле три нагруженные жилы. Округляя до ближайшего большего значения по табл. В.52.4 ГОСТ 50571.5.52—2011, поперечное сечение жилы кабеля составит $q_{кб2} = 4 \text{ мм}^2$, обладающее допустимой токовой нагрузкой $I_{Z.кб2} = 32 \text{ А}$.

Кабель КБ3 смонтированы способом А2, расчётный ток составил 2,4 А, в кабеле две нагруженные жилы. Округляя до ближайшего большего значения по табл. В.52.2 ГОСТ 50571.5.52—2011, поперечное сечение жилы кабеля составит $q_{кб3} = 1,5 \text{ мм}^2$ с допустимой токовой нагрузкой $I_{Z.кб3} = 14 \text{ А}$. Кабели КБ4, КБ5 аналогичные.

Кабель КБ6 смонтирован способом А2, расчётный ток составил 16 А, в кабеле две нагруженные жилы. Округляя до ближайшего большего значения по табл. В.52.2 ГОСТ 50571.5.52—2011, поперечное сечение жилы кабеля составит $q_{кб6} = 2,5 \text{ мм}^2$ с допустимой токовой нагрузкой $I_{Z6.кб6} = 18,5 \text{ А}$. Кабели КБ7, КБ8 аналогичные.

Сопротивления

Полное, активное и индуктивное сопротивления трансформатора в соответствии с (1.8)...(1.10)

$$z_{T1} = \frac{U_{n.T1}^2}{S_{n.T1}} \cdot \frac{u_{к.T1}}{100} = \frac{400^2}{630 \cdot 10^3} \cdot \frac{5,5}{100} = 14,0 \text{ мОм,}$$

$$r_{T1} = \frac{P_{к.T1}}{3 \cdot I_{n.T1}^2} = \frac{8,1 \cdot 10^3}{3 \cdot 909,3^2} = 3,3 \text{ мОм,}$$

$$x_{T1} = \sqrt{z_{T1}^2 - r_{T1}^2} = \sqrt{(14,0 \cdot 10^{-3})^2 - (3,3 \cdot 10^{-3})^2} = 13,6 \text{ мОм.}$$

Кабель КБ1 имеет сечение жилы $q_{к61} = 10 \text{ мм}^2$, по данным **приложения Б**, его удельное активное сопротивление $r_{у.к61} = 2,27 \text{ мОм/м}$, индуктивное — $x_{у.к61} = 86,1 \text{ мкОм/м}$. Учитывая заданную длину кабеля $l_{к61}$, его активное и индуктивное сопротивления в соответствии с (1.11) и (1.12) составят

$$r_{к61} = r_{у.к61} \cdot l_{к61} = 2,27 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 227,0 \text{ мОм,}$$

$$x_{к61} = x_{у.к61} \cdot l_{к61} = 86,1 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 8,6 \text{ мОм.}$$

Кабель КБ2 имеет сечение жилы $q_{к62} = 4 \text{ мм}^2$, по данным **приложения Б**, его удельное активное сопротивление $r_{у.к62} = 5,68 \text{ мОм/м}$, индуктивное — $x_{у.к62} = 101 \text{ мкОм/м}$. Учитывая заданную длину кабеля $l_{к62}$, его активное и индуктивное сопротивления составят

$$r_{к62} = r_{у.к62} \cdot l_{к62} = 5,68 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 56,8 \text{ мОм,}$$

$$x_{к2} = x_{у.к62} \cdot l_{к62} = 101 \cdot 10^{-6} \cdot 10 = 1,0 \text{ мОм.}$$

Кабель КБ3 имеет сечение жилы $q_{к63} = 1,5 \text{ мм}^2$, по данным **приложения Б**, его удельное активное сопротивление $r_{у.к63} = 15,1 \text{ мОм/м}$, индуктивное — $x_{у.к63} = 118 \text{ мкОм/м}$. Учитывая заданную длину кабеля $l_{к63}$, его активное и индуктивное сопротивления составят

$$r_{к63} = r_{у.к63} \cdot l_{к63} = 15,1 \cdot 10^{-3} \cdot 20 = 302,0 \text{ мОм,}$$

$$x_{к63} = x_{у.к63} \cdot l_{к63} = 118 \cdot 10^{-6} \cdot 20 = 2,4 \text{ мОм.}$$

Кабели КБ3, КБ4 и КБ5 имеют равные длины и сечения, поэтому их сопротивления равны.

Кабель КБ6 имеет сечение жилы $q_{к66} = 2,5 \text{ мм}^2$, по данным **приложения Б**, его удельное активное сопротивление $r_{у.к66} = 9,08 \text{ мОм/м}$, индуктивное — $x_{у.к66} = 109 \text{ мкОм/м}$. Учитывая заданную длину кабеля $l_{к66}$, его активное и индуктивное сопротивления составят

$$r_{к66} = r_{у.к66} \cdot l_{к66} = 9,08 \cdot 10^{-3} \cdot 20 = 181,6 \text{ мОм,}$$

$$x_{к66} = x_{у.к66} \cdot l_{к66} = 109 \cdot 10^{-6} \cdot 20 = 2,2 \text{ мОм.}$$

Кабели КБ6, КБ7 и КБ8 имеют равные длины и сечения, поэтому их сопротивления равны.

Падения напряжений в номинальном режиме

Кабель КБ1 имеет расчётный ток $I_{B.кб1}$. Кабель трёхфазный и питает нагрузки как с заданными коэффициентами мощности — двигатель и светильники, так и с заранее неизвестным — розетки. В связи с этим общий коэффициент мощности считаем неизвестным и принимаем $\cos \varphi_{кб1} = 0,8$ ($\sin \varphi_{кб1} = 0,6$) в соответствии с рекомендациями [ГОСТ Р 50571.5.52—2011](#). По формуле (1.13) падение напряжения в КБ1 составит

$$\begin{aligned} u_{кб1} &= b_{кб1} (r_{кб1} \cdot \cos \varphi_{кб1} + x_{кб1} \cdot \sin \varphi_{кб1}) I_{B.кб1} = \\ &= 1 \cdot (227,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 + 8,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6) \cdot 47,3 = 8,8 \text{ В}, \end{aligned}$$

что составляет $\Delta u_{кб1} = \sqrt{3} \cdot 8,8 \cdot 100/400 = 3,8\%$ от номинального напряжения сети между фазным и нейтральным проводником.

Кабель КБ2 имеет расчётный ток $I_{B.кб2}$. Кабель трёхфазный и питает двигатель с известным коэффициентом мощности $\cos \varphi_{n.M1} = 0,87$ ($\sin \varphi_{n.M1} = \sqrt{1 - 0,87^2} = 0,49$). Падение напряжения в КБ2 по формуле (1.13) составит

$$\begin{aligned} u_{кб2} &= b_{кб2} (r_{кб2} \cdot \cos \varphi_{n.M1} + x_{кб2} \cdot \sin \varphi_{n.M1}) I_{B.кб2} = \\ &= 1 \cdot (56,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,87 + 1,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,49) \cdot 29,4 = 1,5 \text{ В}, \end{aligned}$$

что составляет $\Delta u_{кб2} = \sqrt{3} \cdot 1,5 \cdot 100/400 = 0,6\%$ от номинального напряжения сети между фазным и нейтральным проводником.

Кабель КБ3 имеет расчётный ток $I_{B.кб3}$, кабель однофазный и питает светильники с известным коэффициентом мощности $\cos \varphi_{n.EL1} = 0,95$ ($\sin \varphi_{n.EL1} = \sqrt{1 - 0,95^2} = 0,31$). Падение напряжения в КБ3 по формуле (1.13) составит

$$\begin{aligned} u_{кб3} &= b_{кб3} (r_{кб3} \cdot \cos \varphi_{кб3} + x_{кб3} \cdot \sin \varphi_{кб3}) I_{B.кб3} = \\ &= 2 \cdot (302,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 + 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,31) \cdot 1,9 = 1,1 \text{ В}, \end{aligned}$$

что составляет $\Delta u_{кб3} = \sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 100/400 = 0,5\%$ от номинального напряжения сети между фазным и нейтральным проводником.

Кабель КБ6 имеет расчётный ток $I_{B.кб6}$, кабель однофазный и питает нагрузку, с заранее неизвестным коэффициентом мощности, подключенную через розетку XS1. В связи с этим принимаем $\cos \varphi_{кб6} = 0,8$ ($\sin \varphi_{кб6} = 0,6$) в соответствии с рекомендациями [ГОСТ Р 50571.5.52—](#)

2011. Падение напряжения в КБ6 по формуле (1.13) составит

$$\begin{aligned} u_{\text{кб6}} &= b_{\text{кб6}} (r_{\text{кб6}} \cdot \cos \varphi_{\text{кб6}} + x_{\text{кб6}} \cdot \sin \varphi_{\text{кб6}}) I_{\text{В.кб6}} = \\ &= 2 \cdot (181,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 + 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6) \cdot 16 = 4,7 \text{ В}, \end{aligned}$$

что составляет $\Delta u_{\text{кб6}} = \sqrt{3} \cdot 4,7 \cdot 100/400 = 2,0\%$ от номинального напряжения сети между фазным и нейтральным проводником.

По формулам (1.15)–(1.17) относительные падения напряжения в точках подключения потребителей (расчётные точки 2, 3 и 4) в нормальном режиме составят

$$\Delta u_2 = \Delta u_{\text{кб1}} + \Delta u_{\text{кб2}} = 3,8 + 0,6 = 4,4\%,$$

что меньше допустимых для двигателя 5 %,

$$\Delta u_3 = \Delta u_{\text{кб1}} + \Delta u_{\text{кб3}} = 3,8 + 0,5 = 4,3\%,$$

что больше допустимых для светильников 3 %,

$$\Delta u_4 = \Delta u_{\text{кб1}} + \Delta u_{\text{кб6}} = 3,8 + 2,0 = 5,8\%,$$

что больше допустимых для розеток 5 %.

Падение напряжения во время пуска двигателя

До запуска двигателя по формуле (1.18) в кабеле КБ1 протекает ток

$$I'_{\text{В.кб1}} = I_{\text{В.кб3}} + I_{\text{В.кб6}} = 1,9 + 16 = 17,9 \text{ А.}$$

Падение напряжения в кабеле КБ1 до пуска двигателя по (1.19) составит

$$\begin{aligned} u'_{\text{кб1}} &= b_{\text{кб1}} (r_{\text{кб1}} \cdot \cos \varphi_{\text{кб1}} + x_{\text{кб1}} \cdot \sin \varphi_{\text{кб1}}) I'_{\text{В.кб1}} = \\ &= 1 \cdot (227,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 + 8,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6) \cdot 17,9 = 3,3 \text{ В.} \end{aligned}$$

Во время пуска двигателя в кабеле КБ2 к $u'_{\text{кб1}}$ добавится дополнительное падение напряжения от пускового тока двигателя $I_{\text{s.M1}}$. По (1.20) суммарное падение напряжения в кабеле КБ2 при пуске

$$\begin{aligned} u_{\text{s.кб1}} &= u'_{\text{кб1}} + b_{\text{кб1}} (r_{\text{кб1}} \cdot \cos \varphi_{\text{s.M1}} + x_{\text{кб1}} \cdot \sin \varphi_{\text{s.M1}}) I_{\text{s.M1}} = \\ &= 3,3 + 1 \cdot (227,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 + 8,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95) \cdot 205,8 = 19,0 \text{ В}, \end{aligned}$$

что составляет $\Delta u_{s.кб1} = \sqrt{3} \cdot 19,0 \cdot 100/400 = 8,2\%$ от номинального напряжения сети между фазным и нейтральным проводником.

Во время пуска двигателя по кабелю КБ2 протекает ток $I_{s.M1}$, по (1.22) падение напряжения от него составит

$$\begin{aligned} u_{s.кб2} &= b_{кб2} (r_{кб2} \cdot \cos \varphi_{кб2} + x_{кб2} \cdot \sin \varphi_{кб2}) I_{s.M1} = \\ &= 1 \cdot (56,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 + 1,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95) \cdot 205,8 = 3,7 \text{ В}, \end{aligned}$$

что составляет $\Delta u_{s.кб2} = \sqrt{3} \cdot 3,7 \cdot 100/400 = 1,6\%$ от номинального напряжения сети между фазным и нейтральным проводником.

В соответствии с (1.24) итоговое падение напряжения в точке 2 во время пуска двигателя составит

$$\Delta u_{s.2} = \Delta u_{s.кб1} + \Delta u_{s.кб2} = 8,2 + 1,6 = 9,8\%,$$

что меньше допустимых для двигателя во время пуска 10%.

Анализируя полученные данные, видно, что значения падений напряжений в точках 2, 3 и 4 больше допустимых даже в номинальном режиме работы. При этом падение напряжения в кабеле КБ1 уже составляет $\Delta u_{кб1} = 3,8\%$, что не даёт выполнить условие по допустимому падению напряжения в 3% для осветительной нагрузки. Учитывая это обстоятельство, увеличим сечение кабеля КБ1 с $q_{кб1} = 10 \text{ мм}^2$ до $q_{кб1}^* = 16 \text{ мм}^2$ и повторим расчёт зависимых от $q_{кб1}$ величин

$$\begin{aligned} r_{кб1}^* &= r_{y.кб1}^* \cdot l_{кб1} = 1,43 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 143,0 \text{ мОм}, \\ x_{кб1}^* &= x_{y.кб1}^* \cdot l_{кб1} = 81,7 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 8,2 \text{ мОм}, \\ u_{кб1}^* &= b_{кб1} (r_{кб1}^* \cdot \cos \varphi_{кб1} + x_{кб1}^* \cdot \sin \varphi_{кб1}) I_{B.кб1} = \\ &= 1 \cdot (143,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 + 8,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6) \cdot 47,3 = 5,6 \text{ В или } 2,4\%, \\ u'_{кб1}^* &= b_{кб1} (r_{кб1}^* \cdot \cos \varphi_{кб1} + x_{кб1}^* \cdot \sin \varphi_{кб1}) I'_{B.кб1} = \\ &= 1 \cdot (143,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 + 8,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6) \cdot 17,9 = 2,1 \text{ В}, \\ u_{s.кб1}^* &= u_{кб1}^* + b_{кб1} (r_{кб1} \cdot \cos \varphi_{s.M1} + x_{кб1} \cdot \sin \varphi_{s.M1}) I_{s.M1} = \\ &= 2,1 + 1 \cdot (143,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 + 8,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6) \cdot 205,8 = \\ &= 12,5 \text{ В или } 5,4\%. \end{aligned}$$

Падения напряжения в точках системы при скорректированном сечении кабеля КБ1 $q_{кб1}^* = 16 \text{ мм}^2$ составят

$$\begin{aligned}\Delta u_2^* &= \Delta u_{кб1}^* + \Delta u_{кб2} = 2,4 + 0,6 = 3,0 \%, \text{ что меньше допустимых } 5 \%, \\ \Delta u_3^* &= \Delta u_{кб1}^* + \Delta u_{кб3} = 2,4 + 0,5 = 2,9 \%, \text{ что меньше допустимых } 3 \%, \\ \Delta u_4^* &= \Delta u_{кб1}^* + \Delta u_{кб6} = 2,4 + 2,0 = 4,4 \%, \text{ что меньше допустимых } 5 \%, \\ \Delta u_{s.2}^* &= \Delta u_{s.кб1}^* + \Delta u_{s.кб2} = 5,4 + 1,6 = 7,0 \%, \text{ что меньше доп. } 15 \%.\end{aligned}$$

Таким образом, условия по допустимому падению напряжений выполняются.

От сечения КБ1 также зависит его длительно допустимый ток. По табл. В.52.4 ГОСТ 50571.5.52, для сечения жилы $q_{кб1}^* = 16 \text{ мм}^2$ и способа прокладки D1 значение допустимой токовой нагрузки $I_{Z.кб1}^* = 64 \text{ А}$.

Полученные параметры кабелей сведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Параметры кабелей

Кабель	q мм ²	I_B А	I_Z А	r мОм	x мОм
КБ1	16	47,3	64	143,0	8,2
КБ2	4	29,4	32	56,8	1,0
КБ3	1,5	1,9	14	302,0	2,4
КБ4	2,5	16	18,5	181,6	2,2

1.5. Токи коротких замыканий

Короткое замыкание (КЗ) — это случайное или преднамеренное соединение двух или нескольких токопроводящих частей между собой, приводящее к тому, что разность потенциалов этих частей становится близкой к нулю.

В качестве примера рассмотрим однофазную нагрузку. В нормальном режиме между фазным L и нейтральным проводником N подключена нагрузка, обладающая значительным сопротивлением, которое в основном и определяет потребляемый по линии ток. При соединении L - и N -проводников напрямую ток определяется лишь сопротивлениями линий от источника питания до точки КЗ, а они значительно меньше

сопротивления нагрузки. Вследствие этого токи КЗ могут на один-два порядка превышать токи в нормальном режиме работы. Тепловая энергия, выделяемая в кабелях, а также усилия между токоведущими частями пропорциональны квадрату тока, что определяет серьёзные термические и электродинамические (механические) воздействия, которые могут приводить к повреждению оборудования, пожарам и опасности для персонала. В связи с этим используются [устройства защиты от сверхтока](#), обеспечивающие автоматическое отключение участка цепи при возникновении высоких токов. Для корректного выбора этих устройств необходимо знать значения токов КЗ, которые могут через них протекать в точке их установки в системе электроснабжения. Как правило для этого достаточно рассчитать два вида КЗ:

1. Трёхфазное КЗ, возникающее при соединении между собой сразу трёх фаз $L1$, $L2$ и $L3$.

2. Однофазное КЗ, возникающее при соединении между собой одной из фаз, например $L1$ с нейтральным N или защитным проводником PE .

Расчётные точки 0 и 1 находятся на трёхфазных кабелях, поэтому в них возможны как трёхфазные, так и однофазные КЗ.

Точка 2 также находится на трёхфазном кабеле и там возможно как трёхфазное, так и однофазное КЗ. Однако эта точка расположена в конце линии, где необходимо знать минимальный³ ток КЗ. В дальнейшем будет видно, что на удалении от трансформатора ток однофазного КЗ значительно меньше трёхфазного, по этой причине в точке 2 рассчитывается только ток однофазного КЗ.

Точки 3 и 4 находятся в конце однофазных кабелей, поэтому трёхфазное КЗ в них невозможно и рассчитывается только ток однофазного КЗ.

Полное электрическое сопротивление цепи до точки КЗ обычно носит активно-индуктивный характер. Поэтому при возникновении КЗ, по сути представляющего собой коммутацию цепи, возникает переходный процесс. Переходный ток при этом можно представить в виде суммы установившейся⁴ и преходящей⁵ составляющих. Однако на практике в целях выбора аппаратов защиты зачастую достаточно

³Понятие о максимальных и минимальных токах КЗ подробнее рассматривается в разделе 1.6.

⁴В технической литературе также используется термин «периодическая» составляющая, так как на переменном токе установившаяся составляющая синусоидальная.

⁵В технической литературе также используются термин «апериодическая составляющая», так как преходящая составляющая при КЗ обычно носит апериодический характер.

рассчитать только действующее значение установившегося тока КЗ, что и рассматривается далее.

Расчёт токов КЗ проводится в соответствии с упрощённой методикой⁶, в которую в учебных целях введён ряд допущений 1.2.

Допущение 1.2

При расчёте токов КЗ не учитываются: 1) насыщение магнитных систем оборудования; 2) ток намагничивания силового трансформатора; 3) активные сопротивления контактных соединений; 4) индуктивные сопротивления автоматических выключателей; 5) влияние асинхронного двигателя и комплексной нагрузки на ток КЗ; 6) сопротивление электрической дуги в месте КЗ; 7) изменение активного сопротивления проводников вследствие их нагрева током КЗ; 8) токи в параллельных неповреждённых линиях.

Трёхфазное короткое замыкание

При замыкании между собой одновременно трёх фаз $L1$, $L2$, $L3$ ток КЗ определяется напряжением обмотки НН трансформатора $U_{n.T1}$, а также сопротивлениями фазных проводников. Фазные жилы кабелей при трёхфазном КЗ оказываются соединёнными в звезду, образуя собой симметричную нагрузку. К ней приложена симметричная система напряжений от трансформатора, что вызывает протекание симметричной системы токов. По этой причине трёхфазное КЗ называют *симметричным*.

Из-за симметричности цепи действующие значения токов во всех фазах равны, в связи с чем расчёт тока проводят только для одной фазы. Действующее значение установившейся составляющей линейного тока трёхфазного КЗ в i -ой точке схемы, определяется по формуле

$$I_{ki}^{(3)} = \frac{U_{n.T1}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\Sigma i}^2 + x_{\Sigma i}^2}}, \quad (1.25)$$

где i — номер расчётной точки КЗ; $U_{n.T1}$ — номинальное напряжение обмотки НН трансформатора, В; $r_{\Sigma i}$, $x_{\Sigma i}$ — суммы активных и индуктивных сопротивлений одной из фаз от источника до точки i , Ом, рассчитываемые как

$$r_{\Sigma i} = r_{T1} + r_{к6\Sigma i} + r_{a\Sigma i}, \quad (1.26)$$

⁶ГОСТ 28249–93 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. Москва: Стандартинформ, 2006.

$$x_{\Sigma i} = x_c + x_{T1} + x_{к6\Sigma i}, \quad (1.27)$$

где $r_{к6\Sigma i}$ — сумма активных сопротивлений кабелей от трансформатора до точки i , Ом; $r_{a\Sigma i}$ — сумма активных сопротивлений аппаратов от трансформатора до точки i , Ом (см. **приложение Б**); x_c — индуктивное сопротивление энергосистемы, приведённое к ступени НН, принимается равным 0,8 мОм; $x_{к6\Sigma i}$ — сумма индуктивных сопротивлений кабелей от трансформатора до точки i , Ом.

Однофазное короткое замыкание

В общем случае режим однофазного КЗ возникает при соединении между собой одной из фаз с нейтральным проводником N или с защитным проводником PE . При этом оставшиеся две фазы остаются неповреждёнными, вследствие чего сопротивления фаз различны, и трёхфазная цепь работает в несимметричном режиме. Несимметричные режимы работы трёхфазных цепей рассчитываются по методу симметричных составляющих⁷, согласно которому возникающую при однофазном КЗ несимметричную систему токов можно представить в виде суммы трёх симметричных систем токов — прямой, обратной и нулевой последовательностей. Для расчёта по методу симметричных составляющих вводятся эквивалентные схемы для каждой из последовательностей, а соответствующие активные и индуктивные сопротивления этих схем называют сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностей. Установившееся действующее значение тока при возникновении однофазного КЗ в i -ой точке схемы в общем случае, определяется по формуле

$$I_{ki}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{n.T1}}{\sqrt{(2r_{1\Sigma i} + r_{0\Sigma i})^2 + (2x_{1\Sigma i} + x_{0\Sigma i})^2}}, \quad (1.28)$$

где i — номер расчётной точки; $r_{1\Sigma i}$, $x_{1\Sigma i}$ — суммарные активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности от источника до точки i , Ом; $r_{0\Sigma i}$, $x_{0\Sigma i}$ — суммарные активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности от источника до точки i .

Суммарные сопротивления прямой последовательности от источника до точки i принимаются равным рассчитанным ранее по формулам

⁷Основы теории цепей : учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. 5-е изд., перераб. М. : Энергоатомиздат, 1989. Глава 11.

(1.26), (1.27) сопротивлениям фазы цепи КЗ от источника до точки i

$$r_{1\Sigma i} = r_{\Sigma i}, \quad (1.29)$$

$$x_{1\Sigma i} = x_{\Sigma i}. \quad (1.30)$$

Активное сопротивление нулевой последовательности цепи от источника до точки i , рассчитывается по формуле

$$r_{0\Sigma i} = r_{0T1} + r_{к6\Sigma i} + r_{а\Sigma i} + 3r_{н\Sigma i}, \quad (1.31)$$

где i — номер расчётной точки; r_{0T1} — активное сопротивление нулевой последовательности трансформатора, Ом; $r_{к6\Sigma i}$ — сумма активных сопротивлений фазных жил кабелей от трансформатора до точки i , Ом; $r_{а\Sigma i}$ — сумма активных сопротивлений коммутационных аппаратов от трансформатора до точки i , Ом (см. приложения Б); $r_{н\Sigma i}$ — сумма активных сопротивлений нулевых проводников⁸ от трансформатора до точки i , Ом.

За счёт того, что обмотка ВН трансформатора соединена в треугольник, то в системе на стороне ВН не могут протекать токи нулевой последовательности, поэтому при расчёте суммарного индуктивного сопротивления нулевой последовательности не учитывается индуктивное сопротивление энергосистемы x_c

$$x_{0\Sigma i} = x_{0T1} + x_{к6\Sigma i} + 3x_{н\Sigma i}, \quad (1.32)$$

где i — номер расчётной точки; x_{0T1} — индуктивное сопротивление нулевой последовательности трансформатора, Ом; $x_{к6\Sigma i}$ — сумма индуктивных сопротивлений кабелей от трансформатора до точки i , Ом; $x_{н\Sigma i}$ — сумма индуктивных сопротивлений нулевых проводников от трансформатора до точки i , Ом.

При соединении обмоток трансформатора по схеме Δ/Y можно принять, что

$$r_{0T1} = r_{T1}, \quad (1.33)$$

$$x_{0T1} = x_{T1}. \quad (1.34)$$

Суммарные активные $r_{н\Sigma i}$ и индуктивные $x_{н\Sigma i}$ сопротивления нулевых проводников до расчётной точки i принимаются равными сумме сопротивлений соответствующих кабелей и тех коммутационных аппаратов, которые разрывают своей контактной системой нулевые

⁸В качестве нулевого проводника в данном случае принимается N -проводник. Если его нет в расчётной точке, то PE -проводник.

проводники. Если площади поперечных сечений фазных и нулевых проводников для всех кабелей выбраны одинаковыми, то сопротивления фазных и нулевых жил равны. В этом случае выполняются следующие соотношения

$$r_{\Sigma i} = r_{\text{кб}\Sigma i} + r_{\text{а.н}\Sigma i}, \quad (1.35)$$

$$x_{\Sigma i} = x_{\text{кб}\Sigma i}, \quad (1.36)$$

где $r_{\text{а.н}\Sigma i}$ — сумма активных сопротивлений коммутационных аппаратов, разрывающих нулевой провод, Ом.

С учётом допущений (1.29)...(1.36) формула (1.28) принимает следующий расчётный вид

$$I_{\text{к}i}^{(1)} = \frac{U_{\text{n.T1}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(r_{\Sigma i} + r_{\text{кб}\Sigma i} + r_{\text{а.н}\Sigma i})^2 + (x_{\Sigma i} + x_{\text{кб}\Sigma i} - x_c)^2}}. \quad (1.37)$$

Пример 1.5 Расчёт токов короткого замыкания

Далее проводятся расчёты в соответствии с исходными данными из введения и значениями сопротивлений кабелей из табл. 1.1.

Короткое замыкание в точке 0

Трёхфазное КЗ. Трансформатор $T1$ получает питание от энергосистемы, которую относительно обмотки НН трансформатора условно можно представить источником синусоидальной ЭДС с действующим значением $U_{\text{n.T1}}$ и внутренним индуктивным сопротивлением энергосистемы x_c , приведённым к ступени низшего напряжения сети. Значение этого сопротивления определяется свойствами энергосистемы и в рамках проекта принимается равным 0,8 мОм. Делая обход схемы от источника питания к точке 0, в цепь КЗ (рис. 1.1), помимо сопротивления энергосистемы x_c , будут входить активное r_{T1} и индуктивное x_{T1} сопротивления трансформатора, а также активное сопротивление АВ r_{QF10} , определяемое из стандартного ряда значений по табл. Б.2 приложения Б. При определении сопротивления $QF10$ необходимо руководствоваться тем, что на верхнем уровне электроснабжения применяются АВ с регулируемыми расцепителями (см. раздел 2.10). Для защиты трансформатора расцепитель АВ должен быть настроен на его номинальный

ток $I_{n.T1}$. Однако настройка АВ возможна только в меньшую сторону относительно его номинального тока. Поэтому значение $I_{n.QF10}$ по табл. Б.2 определяется округлением $I_{n.T1}$ в большую сторону до ближайшего значения из дискретного ряда токов. Это в дальнейшем обеспечит возможность настройки расцепителя $QF10$ на $I_{n.T1}$.

В рассматриваемом примере $I_{n.T1} = 909,3$ А, ближайшее значение номинального тока по табл. Б.2 составляет $I_{n.QF10} = 1000$ А, что соответствует сопротивлению $r_{QF10} = 0,05$ мОм.

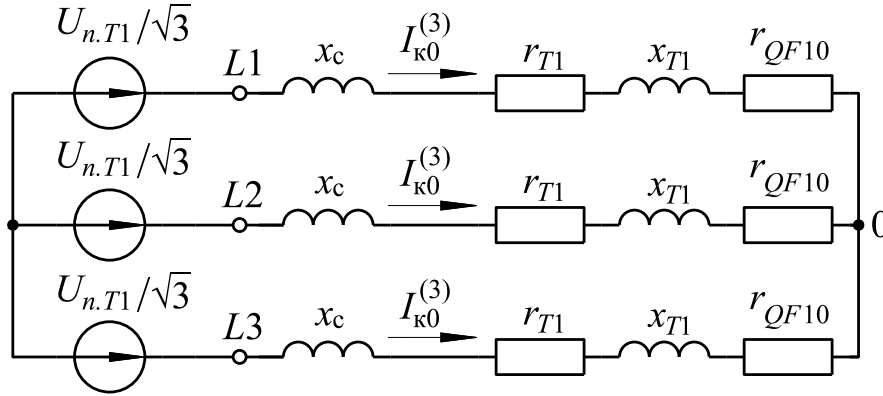


Рис. 1.1. Схема замещения при трёхфазном КЗ в точке 0

Для случая КЗ в точке 0 формула (1.25) принимает следующий вид

$$I_{к0}^{(3)} = \frac{U_{n.T1}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\Sigma 0}^2 + x_{\Sigma 0}^2}}, \quad (1.38)$$

где $r_{\Sigma 0}$, $x_{\Sigma 0}$ — соответственно суммы активных и индуктивных сопротивлений фазы цепи КЗ от источника до точки 0, Ом, рассчитываемые как

$$r_{\Sigma 0} = r_{T1} + r_{QF10} = 3,3 \cdot 10^{-3} + 0,05 \cdot 10^{-3} = 3,4 \text{ мОм},$$

$$x_{\Sigma 0} = x_{T1} + x_c = 13,6 \cdot 10^{-3} + 0,8 \cdot 10^{-3} = 14,4 \text{ мОм}.$$

Подставляя числовые данные в (1.38), определяется установившееся действующее значение тока трёхфазного КЗ в точке 0

$$I_{к0}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(3,4 \cdot 10^{-3})^2 + (14,4 \cdot 10^{-3})^2}} = 15,61 \text{ кА}.$$

Однофазное КЗ. Возникает при замыкании фазного L - и нейтрального N -проводников в точке 0. При этом ток однофазного КЗ протекает по петле «фаза–нуль», состоящей из L - и N -проводников,

что отражено в схеме замещения цепи КЗ на рис. 1.2. Вычитание индуктивного сопротивления энергосистемы выполнено согласно соображениям, приведённым ранее на стр. 35. N -проводник подключается к нейтральной точке системы, поэтому в его сопротивление не входят сопротивления обмотки трансформатора. По схеме электроснабжения, N -проводник разрывается нейтральным полюсом $QF10$. Учитывая, что между $T1$ и точкой 0 нет кабеля, а сопротивлением шин мы пренебрегаем, то сопротивление проводника N определяется лишь r_{QF10} .

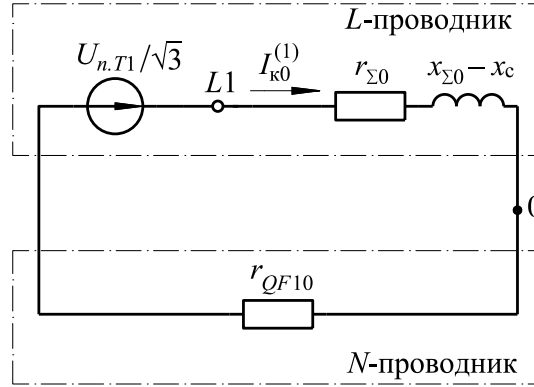


Рис. 1.2. Схема замещения при однофазном КЗ в точке 0

Таким образом, формула (1.37) для случая однофазного КЗ в точке 0 принимает следующий расчётный вид

$$\begin{aligned}
 I_{к0}^{(1)} &= \frac{U_{n.T1}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(r_{\Sigma 0} + r_{QF10})^2 + (x_{\Sigma 0} - x_c)^2}} = \\
 &= \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(3,4 \cdot 10^{-3} + 0,05 \cdot 10^{-3})^2 + (14,4 \cdot 10^{-3} - 0,8 \cdot 10^{-3})^2}} = \\
 &= 16,46 \text{ кА}.
 \end{aligned}$$

Короткое замыкание в точке 1

Трёхфазное КЗ. Возникает при одновременном замыкании между собой фаз $L1$, $L2$ и $L3$ в точке 1 системы, находящейся на вводе НКУ. При обходе цепи от трансформатора до точки 1 видно, что в каждую фазу, помимо сопротивлений энергосистемы x_c , трансформатора r_{T1} и x_{T1} и АВ r_{QF10} дополнительно входят сопротивления АВ r_{QF11} , кабеля $r_{кб1}$, $x_{кб1}$ и выключателя-разъединителя r_{QS1} .

Другими словами, схема замещения цепи при КЗ в точке 1 может быть представлена с использованием рассчитанных ранее суммарных

сопротивлений фазы от источника до точки 0 $r_{\Sigma 0}$, $x_{\Sigma 0}$ и сопротивлений элементов схемы, находящихся между точками 0 и 1 (рис. 1.3).

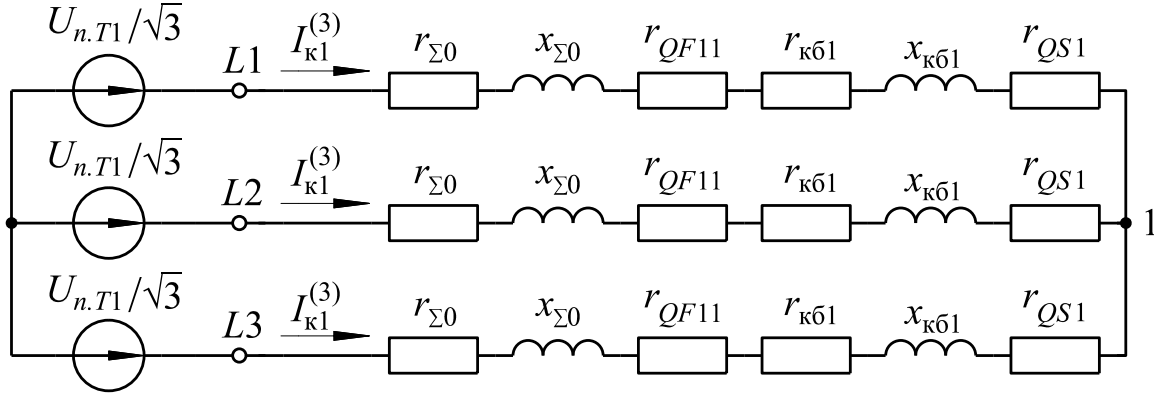


Рис. 1.3. Схема замещения при трёхфазном КЗ в точке 1

Аппарат $QF11$, как и рассмотренный ранее $QF10$, находится на уровне КТП и поэтому также снабжается расцепителем с регулируемыми уставками срабатывания (см. раздел 2.9). Однако в отличие от $QF10$, защищающего трансформатор, $QF11$ защищает отходящий от него кабель КБ1 и, как следствие, должен иметь возможность настройки на его длительно допустимый ток. Поэтому значение $I_{n.QF11}$ по табл. Б.2 определяется округлением $I_{Z.кб1}$ в большую сторону до ближайшего значения из дискретного ряда токов. Это в дальнейшем обеспечит возможность настройки расцепителя $QF11$ на $I_{Z.кб1}$, так как настройка АВ возможна только в меньшую сторону относительно его номинального тока.

В рассматриваемом примере $I_{Z.кб1} = 64$ А, ближайшее значение номинального тока по табл. Б.2 составляет $I_{n.QF11} = 100$ А, что соответствует сопротивлению $r_{QF11} = 0,52$ мОм.

Выключатель-разъединитель $QS1$ (см. раздел 2.8) не имеет защитных функций. Поэтому он должен быть защищён ближайшим вышестоящим АВ $QF11$. При этом настройка расцепителя $QF11$ будет выполнена так, чтобы обеспечить защиту кабеля КБ1. Таким образом, для гарантированной защиты выключателя-разъединителя $QS1$ его условный тепловой ток должен быть не меньше, чем длительно допустимый ток кабеля КБ1. В связи с этим в первом приближении можно принять $r_{QS1} = r_{QF11} = 0,52$ мОм.

Для рассматриваемого случая трёхфазного КЗ в точке 1 формула (1.38) принимает следующий вид

$$I_{k1}^{(3)} = \frac{U_{n.T1}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\Sigma 1}^2 + x_{\Sigma 1}^2}}, \quad (1.39)$$

где $r_{\Sigma 1}$, $x_{\Sigma 1}$ — суммы активных и индуктивных сопротивлений фазы цепи КЗ от источника до точки 1 рассчитываемые как

$$\begin{aligned} r_{\Sigma 1} &= r_{\Sigma 0} + r_{QF11} + r_{к61} + r_{QS1} = \\ &= 3,4 \cdot 10^{-3} + 0,52 \cdot 10^{-3} + 143 \cdot 10^{-3} + 0,52 \cdot 10^{-3} = 147,4 \text{ мОм}, \end{aligned}$$

$$x_{\Sigma 1} = x_{\Sigma 0} + x_{к61} = 14,4 \cdot 10^{-3} + 8,2 \cdot 10^{-3} = 22,6 \text{ мОм}.$$

Значение тока трёхфазного КЗ в точке 1 по (1.39) составит

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(147,4 \cdot 10^{-3})^2 + (22,6 \cdot 10^{-3})^2}} = 1,55 \text{ кА}.$$

Однофазное КЗ. Возникает при замыкании проводников L и N в точке 1. При этом ток однофазного КЗ протекает по петле «фаза–нуль», состоящей из L - и N -жил кабеля КБ1, а также аппаратов, расположенных в этом контуре. Фазные и нейтральная жилы КБ1 имеют одинаковые сечения, а значит и сопротивления. Сопротивления фазного проводника от источника до точки 1 $r_{\Sigma 1}$ и $x_{\Sigma 1}$ рассчитаны ранее. Однако сопротивления нейтрального проводника от источника до точки 1 отличается от этих значений, по следующей причине.

Так как N -проводник подключен к нейтральной точке трансформатора, то в его сопротивление не входят сопротивления $T1$. Кроме того, делая обход от источника до точки 1 видно, что N -проводник разрывается аппаратами $QF10$ и $QS1$, а $QF11$ — нет. Поэтому сопротивление N -проводника определяется сопротивлениями $QF10$ и $QS1$ и кабеля КБ1, что отражено в схеме замещения цепи КЗ на рис. 1.4. Как и прежде, вычитание индуктивного сопротивления энергосистемы для L -проводника выполнено согласно соображениям, приведённым ранее на стр. 35.

Таким образом, формула (1.37) для случая однофазного КЗ в точке 1 принимает следующий расчётный вид

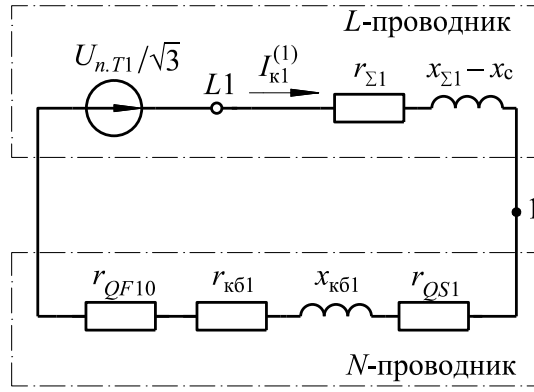


Рис. 1.4. Схема замещения при однофазном КЗ в точке 1

$$\begin{aligned}
 I_{к1}^{(1)} &= \frac{U_{n.T1}/\sqrt{3}}{\sqrt{(r_{\Sigma 1} + r_{QF10} + r_{кб1} + r_{QS1})^2 + (x_{\Sigma 1} - x_c + x_{кб1})^2}} = \\
 &= \frac{400/\sqrt{3}}{\sqrt{(147,4 \cdot 10^{-3} + 0,05 \cdot 10^{-3} + 143,0 \cdot 10^{-3} + 0,52 \cdot 10^{-3})^2 + \\
 &\quad + (22,6 \cdot 10^{-3} - 0,8 \cdot 10^{-3} + 8,2 \cdot 10^{-3})^2}} = \\
 &= 0,79 \text{ кА}.
 \end{aligned}$$

Короткое замыкание в точке 2

Точка 2 находится четырёхжильном кабеле, включающем три фазные жилы и одну жилу PE , поэтому в ней возможно как трёхфазное, так и однофазное КЗ. Из рассчитанных ранее значений при КЗ в точках 0 и 1 видно, что с удалением от источника ожидаемый ток КЗ уменьшается. Также можно заметить, что на расстоянии от источника ток однофазного КЗ заведомо меньше трёхфазного. Таким образом, рассчитав ток однофазного КЗ в наиболее удалённой точке 2, получим минимально возможный ток КЗ, который может протекать через $QF1$ (см. раздел 1.6). Это значение понадобится для последующего выбора $QF1$. Отметим, что максимально возможный ток КЗ через $QF1$ уже определён. С точностью до сопротивления r_{QF1} это $I_{к1}^{(3)}$.

В точке 2 нет N -проводника, поэтому однофазное КЗ возможно только при замыкании проводников L и PE . Ток однофазного КЗ в таком случае протекает по петле «фаза–нуль», состоящей из L - и PE -жил кабелей КБ2 и КБ1, а также электрооборудования, расположенного в этой цепи. Важно отметить, что PE -проводник запрещено разрывать, поэтому на схеме электроснабжения он проложен в обход коммутаци-

онных аппаратов. По этой причине в схему замещения цепи КЗ на рис. 1.5 в *РЕ*-проводник не входят сопротивления аппаратов.

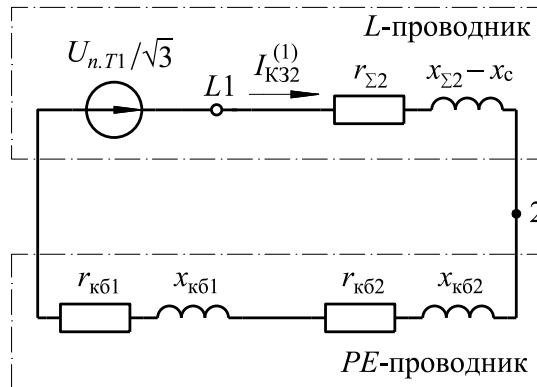


Рис. 1.5. Схема замещения при однофазном КЗ в точке 2

Таким образом, для определения тока однофазного КЗ в точке 2 формула (1.37) принимает вид

$$I_{к2}^{(1)} = \frac{U_{n.T1}/\sqrt{3}}{\sqrt{(r_{\Sigma 2} + r_{к61} + r_{к62})^2 + (x_{\Sigma 2} + x_{к61} + x_{к62} - x_c)^2}},$$

где $r_{\Sigma 2}$, $x_{\Sigma 2}$ — суммы активных и индуктивных сопротивлений фазы цепи КЗ от источника до точки 2, Ом.

АВ *QF1* предназначен для защиты двигателя и имеет либо регулируемый тепловой расцепитель. Необходимо иметь возможно его настройки на номинальный ток двигателя $I_{n.M1}$. Так как регулирование возможно в меньшую сторону относительно номинального тока АВ, то $I_{n.QF1}$ должен быть выбран несколько большим, чем $I_{n.M1}$. Таким образом, сопротивление r_{QF1} по табл. Б.2 определяется по номинальному току двигателя $I_{n.M1}$ с округлением до ближайшего большего значения из приведённого дискретного ряда.

В рассматриваемом примере номинальный ток двигателя 29,4 А. Ближайшее большее стандартное значение тока по табл. Б.2 составляет 32 А, что соответствует $r_{QF1} = 3,6$ мОм. Номинальный ток контактора *KM1* на данном этапе принимается таким же, как и АВ *QF1*. Поэтому в рамках проекта принимается $r_{KM1} = r_{QF1}$. Сопротивление теплового реле *KK1* не учитывается. Таким образом, суммарные сопротивления цепи КЗ до точки 2 составят

$$\begin{aligned} r_{\Sigma 2} &= r_{\Sigma 1} + r_{QF1} + r_{KM1} + r_{к62} = \\ &= 147,4 \cdot 10^{-3} + 3,6 \cdot 10^{-3} + 3,6 \cdot 10^{-3} + 56,8 \cdot 10^{-3} = 211,4 \text{ мОм}, \\ x_{\Sigma 2} &= x_{\Sigma 1} + x_{к62} = 22,6 \cdot 10^{-3} + 1,0 \cdot 10^{-3} = 23,6 \text{ мОм}. \end{aligned}$$

Таким образом, ток однофазного КЗ в точке 2

$$I_{к2}^{(1)} = \frac{U_{n.T1}/\sqrt{3}}{\sqrt{(r_{\Sigma 2} + r_{к61} + r_{к62})^2 + (x_{\Sigma 2} + x_{к61} + x_{к62} - x_c)^2}} =$$

$$= \frac{400/\sqrt{3}}{\sqrt{(211,4 \cdot 10^{-3} + 143,0 \cdot 10^{-3} + 56,8 \cdot 10^{-3})^2 + (23,6 \cdot 10^{-3} + 8,2 \cdot 10^{-3} + 1,0 \cdot 10^{-3} - 0,8 \cdot 10^{-3})^2}} = 0,56 \text{ кА.}$$

В проекте, аналогично приведённым примерам, необходимо рассчитать токи однофазного КЗ в точках 3 и 4. Если эти точки находятся на кабеле, в котором есть и *N*-, и *РЕ*-жилы, то в них возможно замыкание *L*-проводника как с нейтральным проводником *N*, так и с защитным *РЕ*. При замыкании в конце линий, где располагаются точки 3 и 4, необходимо знать минимальный ток КЗ. Поэтому в проекте рекомендуется рассмотреть случай замыкания проводников *L* и *N*, так как в таком случае получаем наименьший ток КЗ, что обусловлено несколько большим сопротивлением проводника *N* по сравнению с *РЕ* из-за наличия в проводнике *N* коммутационных аппаратов.

При определении сопротивлений коммутационных аппаратов необходимо руководствоваться тем, что в отличие от приведённых ранее примеров, в линиях однофазных нагрузок используются модульные аппараты, не обладающие регулируемыми расцепителями. Эти аппараты предназначены для защиты отходящих от них кабелей КБЗ...КБ8. Если выбрать номинальный защитных аппаратов выше, чем длительно допустимый кабеля, то он не будет полноценно защищён, так как нет возможности настроить расцепитель на его длительно допустимый ток в виду отсутствия возможности настройки. Поэтому номинальный ток модульных АВ и АВДТ должен быть либо равен длительно допустимому току отходящих кабелей КБЗ...КБ8, либо быть немного меньше его. Таким образом, для определения сопротивления аппаратов в линиях КБЗ и КБ4 по табл. **Б.2**, значение их номинального тока определяется по длительно допустимому току отходящих от них кабелей с округлением до ближайшего *меньшего* значения из дискретного ряда .

Выполните расчёты токов КЗ в точках 3 и 4 самостоятельно и сравните полученные данные со значениями в табл. **1.2**.

Для самостоятельной оценки корректности полученных значений токов КЗ в собственных проектах необходимо проверить выполняемость

следующих соотношений:

$$I_{к0}^{(3)} > I_{к1}^{(3)}, \quad I_{к1}^{(1)} > I_{к2}^{(1)}, \quad I_{к1}^{(1)} > I_{к3}^{(1)}, \quad I_{к1}^{(1)} > I_{к4}^{(1)}, \quad 1,1 \leq I_{к1}^{(3)} / I_{к1}^{(1)} \leq 2.$$

Таблица 1.2

Токи КЗ

Вид КЗ	Ток КЗ в точке, кА				
	0	1	2	3	4
Трёхфазное	15,61	1,55	—	—	—
Однофазное	16,46	0,79	0,56	0,26	0,35

1.6. Предельные токи КЗ в аппаратах

Каждый АВ защищает свой участок цепи. Для пояснения этого утверждения рассмотрим упрощённую схему электроснабжения на рис. 1.6. Ранее было показано, что ток КЗ протекает от источника до точки замыкания. По этой причине, если КЗ случается выше некоторого АВ, то через него ток КЗ просто не протекает и он не срабатывает. Отсюда следует, что принципиально каждый АВ может защищать только ту часть цепи, которая ниже его по схеме электроснабжения. Например, обращаясь к рис. 1.6, через $QF10$ будут протекать токи КЗ при замыканиях в расчётных точках 0, 1 и 2. Можно предположить, что в таком случае можно обойтись только одним $QF10$, защищающим всё, что ниже него, но это не так. Дело в том, что помимо защиты при КЗ АВ также защищают кабели от перегрузки, препятствуя долговременному протеканию через кабели токов выше длительно допустимого значения. Обеспечить одним АВ защиту сразу нескольких кабелей с разными длительно допустимыми токами невозможно.

Например, рассмотрим случай, если бы в схеме на рис. 1.6 $QF10$ был бы единственным АВ. Находясь в линии с трансформатором $T1$, он должен срабатывать при длительном протекании тока выше $I_{н.T1} = 909,3$ А и не срабатывать при меньших токах. С другой стороны, $QF10$ должен был бы защищать кабель КБ1. Для этого он должен срабатывать при длительном протекании тока выше $I_{З.кб1} = 50$ А. Очевидно противоречие: с одной стороны, $QF10$ должен срабатывать при длительном

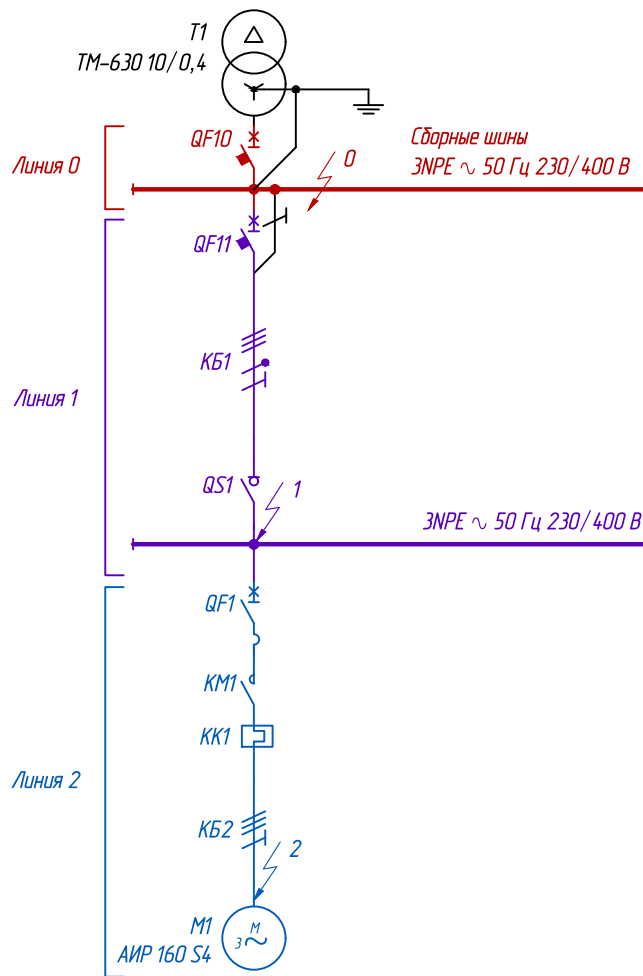


Рис. 1.6. Зоны защиты автоматических выключателей при КЗ

протекании токов более 50 А, а с другой стороны, не должен срабатывать при токах меньших 909,3 А. Поэтому одним $QF10$ не обойтись.

Таким образом, в каждой точке, где изменяется поперечное сечение проводника, должен быть установлен аппарат защиты, настроенный на допустимый ток отходящей от него линии. В этом легко убедиться, посмотрев, где расположены АВ в схеме на рис. 1.6 и на рис. В1. Такое включение называется *каскадным*.

При аварии нужно, чтобы сработал наиболее близкий к месту повреждения аппарат. Это необходимо из соображения надежности электроснабжения. Очевидно, что при КЗ в точке 2 на рис. 1.6, ток КЗ протекает и через $QF1$, и через $QF10$, и через $QF11$, но должен сработать только $QF1$. В таком случае питание потеряет только двигатель $M1$, а остальных потребителей авария не затронет. Если же срабатывает $QF10$, то отключатся все потребители, получающие питание от

трансформатора $T1$. Такая избирательность срабатывания называется **селективностью при сверхтоке**.

Резюмируя вышесказанное, можно сделать вывод, что у каждого АВ есть своя «зона ответственности» в пределах системы электроснабжения, при аварии в которой он обязан сработать, а если авария за пределами этой зоны, то срабатывать он не должен.

Было показано, что АВ способен полноценно защитить участок от себя и до ближайшей точки изменения поперечного сечения проводника. В месте изменения поперечного сечения устанавливается другой АВ. Поэтому «зона ответственности» АВ распространяется от него и до следующего за ним нижестоящего АВ. Именно по такому принципу на рис. 1.6, цветом отмечены участки цепи:

- $QF10$ защищает участок цепи до следующего за ним $QF11$, т.е. сборные шины. Кроме того, защищает вторичную обмотку трансформатора $T1$, но только от перегрузки, так как находится ниже неё и при возникновении на ней КЗ не сработает.

- $QF11$ защищает участок цепи до следующего за ним $QF1$, т.е. кабель КБ1 и выключатель-разъединитель $QS1$, так как он не обладает функцией защиты от сверхтока и нуждается во внешней защите.

- $QF1$ защищает участок цепи ниже себя, т.е. кабель КБ2 и двигатель $M1$.

Ток КЗ уменьшается при удалении точки замыкания от источника. Поэтому максимальный ток КЗ, который может протекать через АВ, соответствует замыканию в начале защищаемой им линии, т.е. при КЗ на выводах АВ со стороны нагрузки.

Аналогично, минимальный ток КЗ, который АВ должен мгновенно отключать, соответствует замыканию в конце защищаемой им линии, т.е., учитывая всё вышесказанное, при КЗ на выводах нижестоящего АВ со стороны питания.

По такой логике определяется диапазон токов КЗ, которые АВ должен отключать мгновенно, что в дальнейшем будет использовано для настройки расцепителей АВ.

Ожидаемые значения токов КЗ во всех расчётных точках системы уже рассчитаны (табл. 1.2), осталось только определить, в зоне защиты какого АВ они находятся, т. е. какой из аппаратов должен их отключать. При этом делается допущение 1.3.

Допущение 1.3

Ожидаемые токи КЗ при замыкании на **выводах** АВ со стороны питания и со стороны нагрузки равны, т. е. не учитывается собственное сопротивление АВ.

Поясним сделанное допущение на следующем примере. Точка 1 на рис. В1 соответствует выводам $QF1$ со стороны источника («верхние» клеммы), где ожидаемые токи КЗ уже рассчитаны ранее — $I_{к1}^{(1)}$ и $I_{к1}^{(3)}$ (табл. 1.2). При замыкании на выводах $QF1$ со стороны нагрузки («нижние» клеммы) фактическое значение ожидаемого тока КЗ будет немного меньше тока КЗ в точке 1 из-за дополнительного сопротивления $QF1$, однако эта разница пренебрежимо мала, так как наибольшее влияние на значение тока КЗ оказывает сопротивление кабеля $r_{кб1} = 143,0$ мОм, а не $r_{QF1} = 3,6$ мОм.

Пример 1.6 Предельные токи КЗ в аппаратах

- Автоматический выключатель $QF1$

Из данных табл. 1.2 хорошо видно, что ток КЗ уменьшается с удалением от источника. Также на удалении от трансформатора ток однофазного КЗ меньше трёхфазного, что видно по сделанным расчётам в точке 1. Учитывая это, минимально возможный ток КЗ, в линии, защищаемой $QF1$ (• рис. 1.6), возникнет при однофазном замыкании в конце линии КБ2, где расположена точка 2, откуда $I_{к.QF1}^{\min} = I_{к2}^{(1)} = 0,36$ кА.

По такой же логике максимальный ток через $QF1$ возникнет при трёхфазном КЗ в начале КБ2, т.е. на выводах $QF1$ со стороны нагрузки. В соответствии с принятым допущением 1.3 $I_{к.QF1}^{\max} = I_{к1}^{(3)} = 1,55$ кА.

Таким образом, $QF1$ должен обеспечивать защиту от токов КЗ в диапазоне от 0,36 до 1,55 кА. Отметим, что ниже этого диапазона токи быть не могут, так как уже нет более удалённой точки от источника, чем точка 2. При замыкании выше $QF1$ возникают токи КЗ больше этого диапазона, но в таких случаях место КЗ находится над $QF1$. Токи КЗ протекают от источника до точки замыкания, поэтому они в таком случае просто не протекают через $QF1$ и поэтому не могут вызвать его срабатывания.

• Автоматический выключатель $QF11$

$QF11$ защищает линию, от своих выводов со стороны нагрузки до точки 1 (• рис. 1.6). Исходя из тех же соображений, что и ранее, минимальный ток КЗ в этой линии возникает при однофазном КЗ в самой удалённой точке защищаемого участка, т.е. в точке 1. Таким образом, $I_{к.QF11}^{\min} = I_{к1}^{(1)} = 0,79$ кА. Отметим, что при замыкании ниже точки 1 ток КЗ также будет протекать через $QF11$, и его значение будет ещё меньше. Однако, такое возможно, только если замыкание случится за нижестоящим АВ, например $QF1$. В таком случае ток будет протекать уже не только через $QF11$, но и через $QF1$. Последний окажется наиболее близким к месту повреждения, и поэтому по требованию селективности именно $QF1$ должен отключить этот ток. Другими словами токи меньше, чем $I_{к.QF11}^{\min} = 0,79$ кА, хоть и могут возникать, но только при КЗ на участке, за который «отвечает» другой АВ.

Максимальный ток через $QF11$ возникнет при КЗ в начале защищаемой линии, т.е. в месте присоединения КБ1 к выводам $QF11$. Учитывая сделанное допущение 1.3, можно считать, что это точка 0. В связи с тем, что она находится фактически у обмотки НН трансформатора, то ток однофазного КЗ больше трёхфазного (табл. 1.2), поэтому $I_{к.QF11}^{\max} = I_{к0}^{(3)} = 16,46$ кА.

Таким образом, $QF11$ должен обеспечивать защиту от токов КЗ в диапазоне от 0,79 до 16,46 кА.

• Автоматический выключатель $QF10$

$QF10$ защищает от КЗ участок цепи от своих выводов со стороны нагрузки до выводов нижестоящего $QF11$ со стороны питания (• рис. 1.6). Пренебрегая малым сопротивлением сборных шин и согласно сделанному допущению 1.3, можно считать, что $QF10$ и $QF11$ расположены в одной точке системы. Поэтому максимальные токи КЗ для них одинаковые, откуда $I_{к.QF10}^{\max} = I_{к0}^{(1)} = 16,46$ кА.

Минимальный ток КЗ на участке, защищаемом $QF10$ составляет $I_{к.QF10}^{\min} = I_{к0}^{(3)} = 15,61$ кА. Как и прежде отметим, что при КЗ ниже точки 0 ток будет ещё меньше, но в этом случае точка КЗ оказывается на участке, защищаемом $QF11$ и поэтому этот ток должен быть отключен именно $QF11$ по требованию селективности.

Таким образом, $QF10$ должен обеспечивать защиту от токов КЗ в диапазоне от 15,61 до 16,46 кА.

Используя аналогичную логику, определите минимальные и максимальные токи КЗ для $QF2$, $FD1$ и сравните полученные данные с приведёнными в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Предельные значения диапазонов токов КЗ в линиях

Значение диапазона	Ток КЗ, кА, в линии, защищаемой				
	$QF10$	$QF11$	$QF1$	$QF2$	$FD1$
Минимальное	15,61	0,79	0,56	0,26	0,35
Максимальное	16,46	16,46	1,55	1,55	1,55

Контрольные вопросы

1. В чём причина возникновения ударного пускового тока во время пуска двигателя?
2. Как определить номинальный ток двигателя, зная его мощность, номинальное напряжение, коэффициент мощности и КПД?
3. Чем опасны большие значения падения напряжения в линии?
4. Почему во время пуска двигателя падения напряжений в линиях больше, чем при работе двигателя в номинальном режиме?
5. Что такое КЗ и чем оно опасно?
6. В чём отличия трёхфазного КЗ от однофазного? Укажите на схеме электроснабжения примеры неправильных соединений, которые приводят к возникновению однофазного и трёхфазного КЗ?
7. Чем определяется значение тока КЗ? Какие параметры вносят наибольший вклад в значение тока КЗ?
8. Покажите на схеме электроснабжения контур тока при возникновении КЗ на вводе НКУ.
9. Поясните принцип расчёта тока КЗ, какие допущения были приняты в проекте при расчёте тока КЗ?
10. Какое значение тока КЗ рассчитывается в проекте: установившееся действующее, амплитудное или максимальное значение переходного тока?
11. В каких случаях для расчёта тока КЗ применяется метод симметричных составляющих? Поясните его принцип.

12. Поясните принцип расположения расчётных точек на схеме электроснабжения.

13. В каком случае можно ограничиться расчётом только тока однофазного КЗ в точке?

14. Каково типичное значение номинального тока бытовой розетки?

15. Каковы допустимые значения падений напряжений на зажимах потребителей? Как они рассчитываются?

16. Укажите назначение L -, N - и PE -проводников.

17. Что такое «длительно допустимый» ток кабеля и от чего он зависит?

18. Какими факторами определяется выбор сечения жил кабелей?

19. Что такое напряжение КЗ трансформатора и какой параметр с помощью него определяется в проекте?

20. Объясните, почему кабель КБ1 питает семь отходящих линий КБ2...КБ8, а его расчётный ток складывается из расчётных токов только трёх линий? Какое допущение позволяет выполнить это алгебраическое сложение?

21. Как определяется максимальный и минимальный ток КЗ в аппаратах? Зачем это делается?

22. Почему в точках 2, 3, 4 не рассчитывались токи трёхфазного КЗ?

23. От каких факторов зависит ток КЗ?

24. Какой тип заземления системы используется в разобранный в пособии примере? Поясните свой ответ при помощи схемы электроснабжения.

25. Поясните принцип расчёта падения напряжения? Какие меры можно предпринять, если падение напряжения на зажимах потребителя больше допустимых пределов? Каковы эти пределы?

26. Как влияет пуск двигателя на значение падения напряжения? Увеличиваются ли падения напряжения в расчётных точках 2, 3 и 4 во время пуска?

РАЗДЕЛ 2

ВЫБОР АППАРАТОВ

На первом этапе подбора оборудования рекомендуется использовать веб-формы с фильтрами на официальных сайтах отечественных производителей, таких как *IEK*, *КЭАЗ*, *ЧЭАЗ*, *EKF*, *Dekraft*, «Систэм Электрик», или на сайтах-агрегаторах, наиболее наполненным из которых является *etm.ru* компании ООО «ТД Электротехмонтаж». Однако необходимо помнить, что веб-страница продукта не всегда содержит исчерпывающую информацию. Полный перечень технических характеристик содержится в *PDF*-каталогах и паспортах оборудования, опубликованных на официальных сайтах производителей. При этом в документации по проекту следует указывать библиографические ссылки на все используемые технические материалы. При работе с каталогами следует помнить, что некоторые термины в них могут отличаться от действующих стандартов. Эти различия обычно незначительны и не искажают сути терминов, однако могут вызвать путаницу на первых порах освоения нового оборудования. В связи с этим рекомендуется в первую очередь обращать внимание на буквенное обозначение величин, приведённых в каталогах, а затем уже на их текстовую интерпретацию. При выполнении второй части проекта необходимо выбирать аппараты в следующей последовательности:

1. Модульные АВ и устройства дифференциальной защиты в линиях с однофазной нагрузкой КБЗ...КБ8: *QF2...QF4*, *FD1...FD3*.

2. Аппараты защиты и управления в линию КБ2 с двигателем М1: АВ защиты двигателя *QF1*, контактор *KM1*, тепловое реле *KK1*, а также предохранитель *FU1* и кнопочные выключатели *SB1* и *SB2* в цепь управления.

3. Выключатель-разъединитель *QS1*.

4. АВ в литом корпусе *QF11* в линию КБ1.

5. Воздушный АВ QF10 в линию вторичной обмотки трансформатора T1.

Рекомендуется в РПЗ приводить все критерии выбора аппаратов в табличном виде, как это сделано далее в данном пособии. Кроме того, следует предоставить визуальное изображение выбранной модели аппарата, а также ссылку на официальный электронный каталог. Для текущего контроля результаты выбора аппаратов заносятся в лист проверки по форме [приложения В](#).

2.1. Модульные АВ

Согласно схеме электроснабжения (рис. [В1](#)) однофазные кабели КБЗ...КБ5 защищены от [сверхтоков](#) при помощи АВ QF2...QF4. Расчётные токи этих кабелей относительно малы, к тому же ток КЗ в месте установки данных АВ (точка 1) в значительной степени ограничен сопротивлением КБ1. В связи с этим для этих линий используются компактные аппараты с относительно невысокими номинальными токами и отключающими способностями — модульные АВ. Аппараты этого типа компактны, что обуславливает их относительно небольшие номинальные токи до [125 А](#) и [наибольшие отключающие способности](#) — типичные значения 4,5; 6; 10 кА, в редких случаях до [25 кА](#). В международной практике используется термин «[малогабаритные](#)» АВ (англ. *Miniature Circuit Breakers* или *MCB*), что отражает их компактный размер и, как следствие, относительно невысокие характеристики. В России устоялся термин «модульные» АВ, что отражает стандартизированные размеры этих устройств. В частности, ширина модульного аппарата устанавливается кратной 17,5 мм (18 мм)¹. Этот размер иногда называется один *DIN*-модуль² или просто один «модуль» по названию установившего его немецкого стандарта *DIN* 43 880. Например, если однополюсный модульный АВ имеет ширину 17,5 мм, то двухполюсный — 35 мм и т. д. В модульном исполнении производят не только АВ, но и другие аппараты: выключатели дифференциального тока ВДТ, контакторы, реле напряжения, ограничители перенапряжений, устройства защиты от дугового пробоя (УЗДП) и прочее. Стандартна не только

¹Стандарт *DIN* 43 880. Определяет ширину одного модуля как 17,5 мм, но при этом расстояния между центрами двух соседних одномодульных аппаратов определяется как 18 мм т.е. подразумевается, что между установленными рядом аппаратами есть зазор 0,25 мм на сторону. В связи с этим у некоторых производителей таких как *Schneider Electric*, КЭАЗ, *IEK*, *Siemens* ширина одного модуля — 18 мм, в то время как у других *ABB*, *Hager* — 17,5 мм.

²*DIN* — аббревиатура немец. *Deutsches Institut für Normung*, (немецкий институт по стандартизации).

ширина, но и другие размеры, из-за чего разное по назначению оборудование имеет примерно одинаковые корпуса. Из этих устройств как из стандартных блоков (модулей) komponуется НКУ, что значительно упрощает процесс проектирования и сборки. Модульное оборудование имеет встроенное в корпус крепление на монтажную рейку типоразмера *TH35* или, как её часто называют на практике — *DIN*-рейку³, представляющую собой металлический профиль стандартной формы. Благодаря такому креплению установка модульного оборудования не требует винтового или иного резьбового соединения, что значительно ускоряет монтаж. Упрощённая конструкция в сочетании с массовым производством определяют относительно низкую стоимость модульных АВ.

Перечисленные особенности модульного оборудования делают его общепринятым стандартом для бытового и маломощного промышленного применения. Именно модульные аппараты стоят в щитке во многих квартирах и домах.

Критерии выбора модульных АВ

По заданию (стр. 14) через АВ *QF2*, *QF3* и *QF4* питается нагрузка одинаковой мощности. Также они защищают кабели одинакового поперечного сечения и длины. Вследствие этого они полностью идентичны, и для краткости дальнейшие формулировки приводятся на примере *QF2*. От него требуется соответствие ряду критериев, согласно которым он должен обеспечивать.

1. Работу в сети переменного тока частотой 50 Гц.
2. Коммутацию определённого принципиальной схемой (рис. В1) числа проводников. Например, в линии КБЗ *QF2* должен иметь один полюс, так как он разрывает только фазный проводник *L1*, а нейтральный проводник *N* проходит в обход него. В тех случаях, когда АВ разрывает два проводника, он должен иметь два полюса, при этом в рамках проекта возможно использование двух исполнений:
- 2а. Исполнение *2P* имеет два защищённых полюса, т.е. максимальные расцепители тока установлены в обоих полюсах — можно считать, что это два однополюсных АВ в одном корпусе.

Исполнение *2P* обязательно к применению при подключении однофазной нагрузки на линейное напряжение сети, а также при питании

³ГОСТ Р МЭК 60715—2003 Аппаратура распределения и управления низковольтная. Установка и крепление на рейках электрических аппаратов в низковольтных комплектных устройствах распределения и управления.

однофазной нагрузки через трансформатор с незаземлённой вторичной обмоткой. В обоих случаях оба питающих нагрузку проводника имеют потенциал относительно земли. В связи с этим замыкание одного из них, например на заземлённый корпус, вызовет протекание тока КЗ только через один из полюсов АВ, и если в этом полюсе не окажется расцепителя, то аппарат не среагирует на аварию. Это диктует необходимость наличия расцепителей в двух полюсах, что соответствует исполнению $2P$.

26. Исполнение $1P+N$ имеет один защищённый полюс, и один незащищённый, т.е. максимальный расцепитель тока установлен только в одном фазном полюсе. По этой причине аппараты данного исполнения требуют соблюдения порядка подключения к выводам L - и N -проводников.

3. Присоединение к выводам кабеля КБЗ с поперечным сечением жилы $q_{кбз}$. Для этого максимальное поперечное сечение присоединяемого проводника должно удовлетворять условию

$$q_{QF2} \geq q_{кбз}. \quad (2.1)$$

4. Работу в сети с заданным напряжением. Во время отключения цепи к АВ приложено напряжение между фазным и нейтральным проводником. Этим напряжением определяется максимальный ток, который может быть отключен аппаратом. Для коммутационного оборудования зачастую используется термин «номинальное рабочее напряжение», для отражения факта, что работа АВ проверена производителем при нескольких «номинальных» напряжениях и для каждого из них определена своя номинальная наибольшая отключающая способность. В зависимости от числа фаз, модульные АВ, как правило, работают при напряжении — 230 В или 400 В. Поэтому для них устанавливается одно значение номинального рабочего напряжения, называемое для краткости в технической документации просто «номинальное напряжение», которое в соответствии с данным критерием для $QF2$ должно удовлетворять условию

$$U_{n.QF2} = \frac{U_{n.T1}}{\sqrt{3}}. \quad (2.2)$$

Если данному критерию удовлетворяют несколько значений $U_{n.QF2}$, то из них должно быть выбрано ближайшее к $U_{n.T1}/\sqrt{3}$.

5. Длительное протекание расчётных токов линии, для чего необходимо, чтобы номинальный ток $QF2$ был не меньше расчётного тока кабеля

$$I_{n.QF2} \geq I_{B.кбз}. \quad (2.3)$$

- 6.** **Защиту от перегрузок** кабеля КБЗ. При этом АВ должен как можно меньше ограничивать максимально допустимую нагрузку кабеля. Для этого необходимо, чтобы номинальный ток АВ был как можно ближе к длительно допустимому току защищаемого кабеля, но не превышал его

$$I_{n.QF2} \leq I_{Z.кбз}. \quad (2.4)$$

- 7.** Мгновенное срабатывание при КЗ ниже QF2 по схеме электроснабжения. Мгновенное срабатывание АВ гарантировано при превышении ожидаемым током КЗ **уставки тока расцепителя мгновенного действия** I_i с учётом её допустимого отклонения. В случае **уставки тока расцепителя мгновенного действия** модульных аппаратов нормируется **диапазон токов мгновенного расцепления** $(I_i^-; I_i^+]$. Это означает, что номинальное значение уставки может находиться в пределах данного диапазона. На практике это означает, что если ожидаемый ток меньше нижней границы допустимых значений I_i^- этого диапазона, то расцепитель мгновенного действия гарантированно не срабатывает, если больше или равен верхней границе I_i^+ , то — гарантированно срабатывает. Внутри диапазона $(I_i^-; I_i^+]$ расцепитель мгновенного действия может сработать, а может и не сработать. Во последнем случае срабатывание обеспечить расцепитель с обратной зависимой выдержкой времени. **Диапазон токов мгновенного расцепления** для модульных АВ определяется через тип характеристик мгновенного расцепления B , C и D как $(3-5) \cdot I_n$, $(5-10) \cdot I_n$ и $(10-20) \cdot I_n$ соответственно.

Например, для АВ типа B с номинальным током $I_n = 10$ А справедливо $I_i^- = 30$ А, а $I_i^+ = 50$ А. Другими словами, точное значение I_i неизвестно, но гарантируется, что оно находится в интервале $(30; 50]$ А.

На практике для обеспечения гарантированного мгновенного срабатывания QF2 при КЗ необходимо убедиться, что верхняя граница допустимых значений **уставки тока расцепителя мгновенного действия** не больше, чем минимальный ожидаемый ток КЗ, на участке цепи, защищаемом QF2 $I_{к.QF2}^{\min}$ (табл. 1.3)

$$I_{i.QF2}^+ \leq I_{к.QF2}^{\min}. \quad (2.5)$$

Зачастую условию (2.5) удовлетворяют сразу несколько типов характеристик мгновенного расцепления. С точки зрения защиты при КЗ предпочтительно минимальное значение уставки тока расцепителя

мгновенного действия, что соответствует характеристике *B*. Однако это не всегда возможно из-за наличия у электрооборудования пусковых токов, вызванных переходным процессом в момент подключения к сети. Максимальное мгновенное значение этого тока может на один-два порядка превышать потребляемый в установившемся режиме ток. Подобно рассмотренному ранее пусковому току двигателя, этот ток кратковременный, за счёт чего его термическое воздействие невелико. Превышение пусковым током уставки расцепителя мгновенного действия может привести к срабатыванию АВ.

Наиболее часто применяемые светодиодные светильники с драйверами, как правило, имеют значительный пусковой ток, превышающий номинальный на один-два порядка. Однако длительность его протекания обычно составляет долю миллисекунды, за счёт чего мгновенный расцепитель АВ не успевает среагировать. Так как в проекте мощность светильников относительно мала, считаем, что пусковой ток не вызывает ложных срабатываний АВ. В виду того, что пусковой ток не учитывается, а с точки зрения защиты от КЗ чем меньше значение уставки тока расцепителя мгновенного действия, тем лучше, то в рамках проекта для цепей освещения рекомендуется использовать АВ с типом характеристики *B*.

С другой стороны, к розеткам подключается однофазная нагрузка с неизвестными заранее пусковыми характеристиками. Уставка расцепителя мгновенного действия должна давать возможность пропускать некое осреднённое значение пускового тока типичной однофазной нагрузки. Практика показывает, что в таком случае достаточно использовать выключатель с типом характеристики *C*. Ещё более сильно завышенная уставка характеристики *D*, как правило, считается избыточной для типичной нагрузки, подключаемой к однофазной розетке. Обычно аппараты с характеристикой *D* применяются либо при наличии конкретных данных о пусковых характеристиках подключаемой нагрузки, не позволяющих использовать характеристику *C*, либо при ложных срабатываниях ранее установленного аппарата с характеристикой *C*.

Подытоживая вышесказанное, в рамках проекта рекомендуется для линий с осветительной нагрузкой использовать выключатель с типом характеристики *B*, а для розеточных групп — *C*.

8. Отключение максимально возможного в точке его установки тока КЗ. Для *QF2* наиболее тяжёлым режимом является возникновение трёхфазного КЗ непосредственно на его [выводах](#). Такая авария может возникнуть при одновременном соединении между собой выводов *QF2*, *QF3* и *QF4* со стороны нагрузки, например из-за некорректного мон-

тажа. В этом случае ток КЗ, протекающий через $QF2$, принимает максимально возможное в данной системе значение. Пренебрегая внутренним сопротивлением $QF2$ в соответствии с допущением 1.3, за ток трёхфазного КЗ на его выходных выводах принимается ток трёхфазного КЗ в точке 1. Данный ток был рассчитан ранее $I_{к.QF2}^{\max}$ (табл. 1.3). Таким образом, $QF2$ гарантированно отключает ток КЗ, если его **номинальная наибольшая отключающая способность**⁴ I_{cn} удовлетворяет условию

$$I_{cn.QF2} \geq I_{к.QF2}^{\max}. \quad (2.6)$$

Пример 2.1 Выбор $QF2$

Для рассматриваемой схемы электроснабжения (рис. В1) в качестве $QF2$, $QF3$ и $QF4$ в линиях с осветительной нагрузкой по каталогу [2] выбран модульный АВ производителя *EKF* серии *AV-6* с номинальным током 10 А и типом характеристики мгновенного расцепления *B* в однополюсном исполнении, артикул *mcb6-1-10B-av*. Результаты проверки соответствия критериям выбора представлены в табл. 2.1, внешний вид аппарата — на рис. 2.1.

Таблица 2.1

Проверка соответствия $QF2$ критериям выбора

№	Параметры системы в месте установки аппарата	Усл.	Параметры аппарата АВ <i>EKF mcb6-1-10B-av</i>
1	Род тока Число	$AC =$	Род тока главной цепи AC
2	коммутируемых проводников	$1 =$	Количество полюсов 1

⁴У многих производителей модульные АВ предназначены для использования как в бытовом секторе, так и в промышленности, поэтому они соответствуют одновременно двум стандартам ГОСТ *IEC* 60898-1—2020 и ГОСТ *IEC* 60947-2—2021. Поэтому у большинства модульных АВ выделяют три вида наибольших отключающих способностей:

1. I_{cn} — **номинальная** (бытовое назначение) маркируется на корпусе аппарата;
2. I_{cs} — **номинальная рабочая** (промышленное назначение);
3. I_{cu} — **номинальная предельная** (промышленное назначение).

№	Параметры системы в месте установки аппарата		Усл.	Параметры аппарата АВ <i>EKF mcb6-1-10B-av</i>	
3	Сечение отходящего кабеля $q_{кбз}$, мм ²	1,5	=	Максимальное сечение присоединяемого проводника, мм ²	25
4	Коммутируемое напряжение, В	230	≤	Номинальное напряжение $U_{n.QF2}$, В	230
5	Расчётный ток кабеля $I_{B.кбз}$, А	1,9	≤	Номинальный ток, $I_{n.QF2}$, А	10
6	Длительно допустимый ток кабеля $I_{Z.кбз}$, А	14	≥	Номинальный ток, $I_{n.QF2}$, А	10
7	Минимальный ток КЗ $I_{к.QF2}^{\min}$, кА	0,26	≥	Верхняя граница допустимых значений уставки тока расцепителя мгновенного действия $I_{i.QF2}^+$, кА	0,05 ¹
8	Максимальный ток КЗ $I_{к.QF2}^{\max}$, кА	1,55	≤	Номинальная наибольшая отключающая способность $I_{сн.QF2}$, кА	6

¹Для АВ типа В верхняя граница допустимых значений уставки тока расцепителя мгновенного действия $I_{i.QF2}^+ = 5 \cdot I_{n.QF2} = 5 \cdot 10 = 50$ А.

2.2. Модульные АВДТ

Согласно схеме электроснабжения (рис. В1), линии КБ6...КБ8 защищены при помощи автоматических выключателей, управляемых дифференциальным током со встроенной защитой от сверхтоков (АВДТ). Как и ранее выбранные АВ, такие устройства выпускаются в модульном исполнении. АВДТ выполняют функцию АВ — защищают от сверхтоков, а также отключают линию при опасных значениях **тока утечки на землю** или **тока замыкания на землю**. Возникновение этих токов в

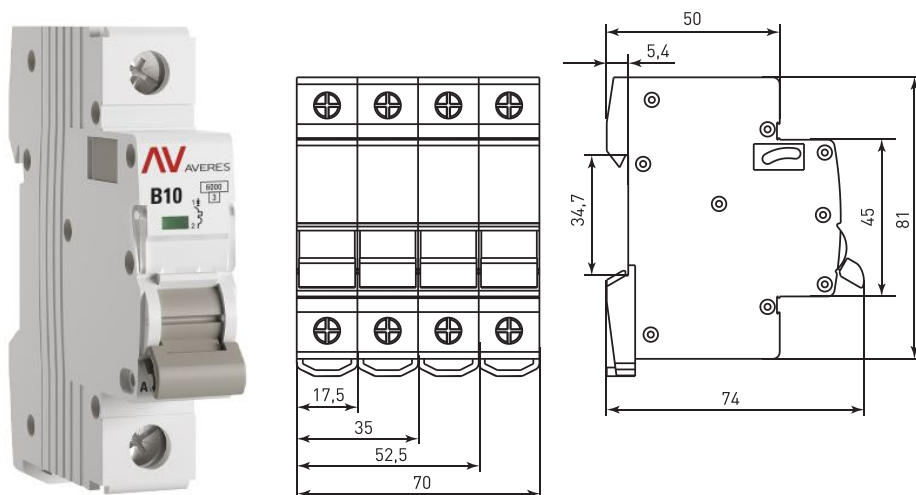


Рис. 2.1. Модульный автоматический выключатель в линиях КБЗ...КБ5 **EKF AVERES B10 [2]**

линии приводит к появлению дифференциального⁵ тока в главной цепи аппарата, что и вызывает расцепление. Под дифференциальным током в данном случае подразумевается векторная сумма токов в фазном L и нейтральном N -полюсах аппарата. В нормальном режиме эта сумма близка к нулю — в главной цепи аппарата ток в фазном и нейтральном проводнике равны по модулю, но противоположны по направлению. Когда часть тока уходит в землю или PE -проводник, то ток в нейтральном полюсе аппарата уменьшается, и появляется дифференциальный ток, на который реагирует АВДТ. Принцип действия, основанный на сравнении тока в L - и N -проводниках обуславливает двухполюсное исполнение однофазных устройств дифференциальной защиты.

Критерии выбора модульных АВДТ⁶

В рамках проекта от АВДТ требуется соответствие ряду критериев, согласно которым он должен обеспечивать.

1. Работу в сети переменного тока частотой 50 Гц.
2. Коммутацию количества проводников, которое определяется схемой электроснабжения. Для однофазной нагрузки устройство дифференциальной защиты должно иметь два полюса — исполнение $2P$ или

⁵От англ. *difference* — разница, разность.

⁶Для ВДТ справедливы те же критерии, кроме 6, 7 и 8, так как ВДТ не имеет защиты от сверхтоков. В связи с этим последовательно и выше его по схеме электроснабжения всегда устанавливается АВ, обеспечивающий как защиту отходящих кабелей, так и защиту самого ВДТ от сверхтоков. Последнее обеспечивается, если номинальный ток АВ не превышает номинальный ток ВДТ. В рамках одного производителя допустимо использовать АВ и ВДТ с одинаковыми номинальными токами.

$1P+N$. Отличия между исполнениями рассматривались ранее в пп. 2 на стр. 53).

3. Присоединение к выводам кабеля КБ6 с поперечным сечением жилы $q_{к66}$. Для этого максимальное поперечное сечение присоединяемого проводника должно удовлетворять условию

$$q_{FD1} \geq q_{к66}. \quad (2.7)$$

4. Работу в сети с заданным напряжением. К аппарату приложено фазное напряжение, поэтому его номинальное напряжение (см. пп. 4 на стр. 54) должно удовлетворять условию

$$U_{n.FD1} \geq \frac{U_{n.T1}}{\sqrt{3}}. \quad (2.8)$$

Если данному критерию удовлетворяют несколько значений $U_{n.FD1}$, то из них должно быть выбрано ближайшее к $U_{n.T1}/\sqrt{3}$.

5. Длительное протекание расчётного тока нагрузки, для чего необходимо, чтобы его номинальный ток был не меньше расчётного тока кабеля КБ6

$$I_{n.FD1} \geq I_{B.к66}. \quad (2.9)$$

6. Защиту кабеля КБ6 и розетки XS1 от перегрузок. Для этого необходимо, чтобы номинальный ток АВДТ был не больше, чем длительно допустимый ток кабеля и номинальный ток розетки

$$I_{n.FD1} \leq I_{Z.к66}; \quad (2.10)$$

$$I_{n.FD1} \leq I_{n.XS1}. \quad (2.11)$$

При этом АВДТ должен как можно меньше ограничивать допустимую нагрузку линии, поэтому его номинальный ток должен быть как можно ближе к минимуму из этих двух токов $\min(I_{Z.к66}; I_{n.XS1})$.

7. Защиту от КЗ при помощи мгновенного расцепления в случае возникновения повреждения ниже FD2 по схеме электроснабжения, для чего необходимо, чтобы верхняя граница допустимых значений уставки тока расцепителя мгновенного действия была не больше, чем минимальный ток КЗ в защищаемой линии, приведённый в табл. 1.3.

$$I_{i.FD1}^+ \leq I_{к.FD1}^{\min}. \quad (2.12)$$

8. Успешное отключение максимально возможного в защищаемой им линии тока КЗ $I_{к.FD1}^{\max}$, рассчитанного ранее и приведённого в табл. 1.3. АВДТ $FD1$ гарантированно отключит ток КЗ, если его номинальная наибольшая отключающая способность удовлетворяет условию

$$I_{cn.FD1} \geq I_{к.FD1}^{\max}. \quad (2.13)$$

9. Гарантированное срабатывание при возникновении дифференциального тока заданного значения. Для защиты человека от поражения электрическим током это значение не должно превосходить 30 мА. Для обеспечения этого требования необходимо, чтобы номинальный отключающий дифференциальный ток⁷ аппарата удовлетворял условию

$$I_{\Delta n.FD1} \leq 30 \text{ мА}. \quad (2.14)$$

Предпочтительное значение номинального отключающего дифференциального тока для устройств дифференциальной защиты для розеточных групп 30 мА⁸.

10. Гарантированное срабатывание при возникновении синусоидального переменного и пульсирующего постоянного дифференциальных токов. Этому требованию соответствует устройство дифференциальной защиты типа А по рабочей характеристики в случае дифференциального тока с составляющей постоянного тока.

Пример 2.2

Выбор $FD1$

Для рассматриваемой схемы электроснабжения (рис. В1) в качестве $FD1$, $FD2$ и $FD3$ для розеточной группы по каталогу [2] выбраны АВДТ производителя *EKF* серии *DVA-6* с номинальным током 16 А типом характеристики мгновенного расцепления *C*, номинальным отключающим дифференциальным током 30 мА, типа А по рабочей характеристике в случае дифференциального тока с составляющей постоянного тока. Артикул аппарата *rsbo6-1pn-16C-30-a-av*. Проверка его

⁷Термин в соответствии с ГОСТ IEC 61008-1—2020. В технической литературе также используются термины «номинальная чувствительность», «чувствительность», «номинальный дифференциальный ток».

⁸Меньшие значения номинального отключающего дифференциального тока увеличивают степень защищённости от поражения электрическим током, но при этом повышают вероятность ложных срабатываний аппарата из-за наличия естественных утечек через изоляцию электроустановки в нормальном режиме работы.

соответствия критериям выбора приведена в табл. 2.2, а внешний вид аппарата — на рис. 2.2.

Таблица 2.2

Проверка соответствия $FD1$ критериям выбора

№	Параметры системы в месте установки аппарата		Усл.	Параметры аппарата АВДТ $EKF\ rcbo6-1pn-16C-30-a-av$	
1	Род тока	AC	=	Род тока главной цепи	AC
2	Число коммутируемых проводников	2	=	Количество полюсов	$1P+N$
3	Сечение кабеля $q_{кб.6}$, мм ²	2,5	≤	Максимальное сечение присоединяемого проводника, мм ²	25
4	Коммутируемое напряжение, В	230	≤	Номинальное напряжение $U_{n.QF2}$, В	230
5	Расчётный ток кабеля $I_{B.кб6}$, А	16	≤	Номинальный ток, $I_{n.FD1}$, А	16
6	Длительно допустимый ток кабеля $I_{Z.кб6}$, А	18,5	≥	Номинальный ток, $I_{n.FD1}$, А	16
	Ном. ток розетки $I_{n.XS1}$, А	16	≥	Номинальный ток, $I_{n.FD1}$, А	16
7	Минимальный ток КЗ $I_{к.FD1}^{\min}$, кА	0,35	≥	Верхняя граница допустимых значений уставки расцепителя мгнов. действ. $I_{i.FD1}^+$, кА	0,16 ¹
8	Максимальный ток КЗ $I_{к.FD1}^{\max}$, кА	1,55	≤	Номинальная отключающая способность $I_{cn.FD1}$, кА	6
9	Максимальное допустимое значение тока утечки, мА	30	≥	Номинальный отключающий дифференциальный ток, $I_{\Delta n.FD1}$, мА	30
10	Род тока утечки	AC , пульс. DC	≥	Тип АВДТ	A^2

¹Для АВДТ типа мгновенного расцепления $C I_{i.FD1}^+ = 10 \cdot I_{n.FD1} = 10 \cdot 16 = 160 \text{ А}$.

²Рабочая характеристика в случае дифференциального тока с составляющей постоянного тока.

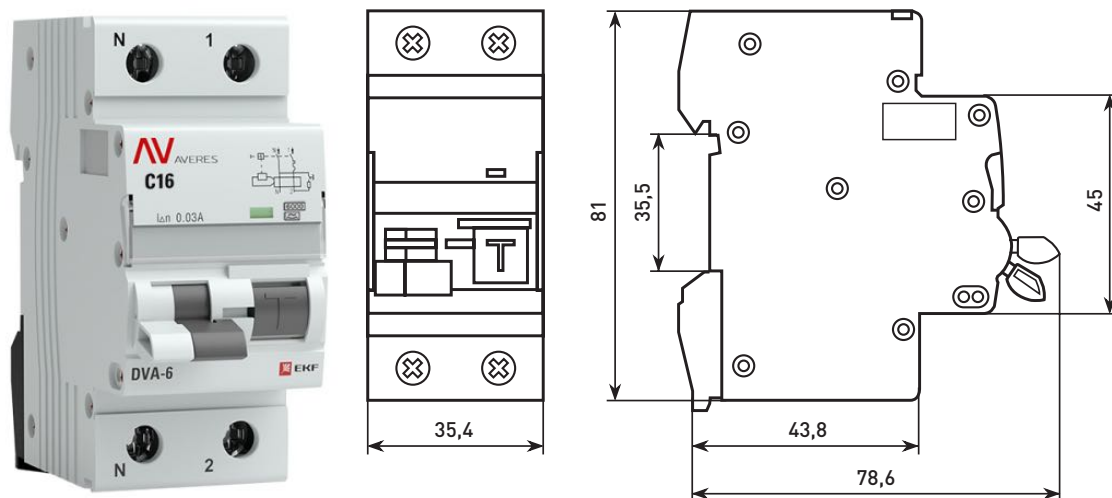


Рис. 2.2. Модульный АВДТ в линиях КБ4...КБ6
EKF AVERES C16 30 мА [2]

2.3. АВ защиты двигателя

Увеличение тока в обмотке двигателя выше номинального значения приводит к повышению его температуры больше допустимых пределов. Наиболее чувствительной к перегреву является изоляция обмотки двигателя. При небольших перегрузках уменьшается срок службы за счёт ускоренного старения изоляции вследствие повышения температуры. При значительной перегрузке может в короткие сроки развиваться необратимое термическое повреждение изоляции, вплоть до обугливания и последующего электрического пробоя. Как правило, двигатель относительно малой мощности не имеет встроенной температурной защиты, что вызывает необходимость применения аппаратов защиты от сверхтоков. При этом использование для этих целей модульных АВ не всегда возможно. В основном это связано с тем, что ряд номинальных мощностей асинхронных двигателей и соответствующих им номинальных токов не совпадает с предпочтительными значениями номинальных токов модульных АВ. Уставка тока теплового расцепителя в модульном АВ равна его номинальному току и не имеет возможности регулирования. В связи с этим при использовании модульного АВ зачастую получается так, что уставка тока срабатывания теплового расцепителя либо намного больше, чем номинальный ток

двигателя, что может приводить к его перегреву, либо намного меньше номинального тока двигателя, что не позволяет двигателю работать при номинальной мощности. Таким образом, модульные АВ не могут обеспечить качественную защиту двигателя от перегрузки. В связи с этим применяются специальные АВ защиты двигателей, также называемые как **ручной пускатель**. Такие аппараты имеют регулируемый **ток уставки теплового расцепителя перегрузки**. Такой регулируемый расцепитель обеспечивает возможность точной настройки на ток двигателя. В дополнение к вышесказанному АВ защиты двигателей обладают следующими особенностями по сравнению с модульными аппаратами.

1. Не имеют стандартных габаритных размеров и поэтому не относятся к модульному оборудованию.

2. Вместо типов характеристик мгновенного расцепления B , C и D для них приводится конкретное значение уставки тока срабатывания **расцепителя мгновенного действия** I_i и её предельное отклонение.

3. Во избежание срабатывания от ударного пускового тока двигателя **ток уставки** расцепителя мгновенного действия I_i , как правило, находится на уровне приблизительно 13 крат относительно номинального тока АВ.

4. По сравнению с модульными АВ имеют повышенную номинальную рабочую наибольшую отключающую способность I_{cs} до 100 кА.

5. **Времятоковая характеристика** теплового расцепителя адаптирована под протекание пускового тока двигателя во время его разгона, что обеспечивается соответствием её стандартным классам расцепления 10, 10А и т. д.

6. Зачастую имеют температурную компенсацию, что делает ВТХ теплового расцепителя менее чувствительной к температуре окружающей среды.

7. Как правило, чувствительны к обрыву фазы, за счёт особой конструкции опоры теплового расцепителя.

На практике используются два варианта схемы управления и защиты двигателя.

1. $QF1$ имеет **тепловой расцепитель перегрузки** с **обратно зависимой выдержкой времени** и электромагнитный **расцепитель КЗ мгновенного действия**. Такая комбинация теплового и электромагнитного расцепителей в технической документации часто называется «термомагнитный» расцепитель.

2. $QF1$ не имеет **расцепителя перегрузки**, а снабжён только электромагнитным **расцепителем КЗ**. В этом случае функция расцепителя перегрузки переносится на другой аппарат — **тепловое электрическое**

реле $KK1$, которое устанавливается отдельно. Именно такой вариант используется в примере на рис. В1.

Критерии выбора АВ защиты двигателя

В рамках проекта необходимо, чтобы АВ защиты двигателя соответствовал ряду критериев, согласно которым он должен обеспечивать следующее.

1. Работу в сети переменного тока с частотой 50 Гц.
2. Коммутацию необходимого по однолинейной схеме (рис. В1) числа проводников. $QF1$ разрывает фазные жилы трёхфазного кабеля КБ2, поэтому должен иметь исполнение $3P$.
3. Присоединение к выводам кабеля КБ2 с поперечным сечением жилы $q_{кб2}$. Для этого максимальное поперечное сечение присоединяемого проводника должно удовлетворять условию

$$q_{QF1} \geq q_{кб2}. \quad (2.15)$$

4. Работу в сети с заданным номинальным напряжением. АВ защиты двигателя, как правило, проверяются производителем на работоспособность при разных напряжениях, поэтому для них устанавливается несколько номинальных рабочих напряжений. В рамках проекта нужно выбрать значение, максимально приближенное к линейному напряжению сети, но не менее его. В дальнейшем выбранное номинальное рабочее напряжение будет определять отключающую способность аппарата. Таким образом, для выполнения данного критерия должно выполняться условие

$$U_{e.QF1} \geq U_{n.T1}. \quad (2.16)$$

Если данному критерию удовлетворяют несколько значений $U_{e.QF1}$, то из них должно быть выбрано ближайшее к $U_{n.T1}$.

5. Длительное пропускание номинального тока двигателя, для чего необходимо, чтобы номинальный ток АВ удовлетворял условию⁹

$$I_{n.QF1} \geq I_{n.M1}. \quad (2.17)$$

6. Возможность пуска двигателя. Для этого необходимо, чтобы значение тока уставки расцепителя мгновенного действия I_i с учётом допустимых

⁹Критерий 5 применяется только для АВ без теплового расцепителя. В случае наличия теплового расцепителя роль вместо этого применяется критерий 9.

отклонений превышало ударный пусковой ток двигателя, выраженный как эквивалентное действующее значение. Как и для модульных АВ конкретное значение I_i находится в некотором допустимом диапазоне. Для всех АВ, кроме модульных, этот диапазон задаётся не типом характеристики мгновенного расцепления B , C или D , а нормированием предельного отклонения уставки, обычно это $\pm 20\%$ или $\delta = 0,2$ в долях. Это означает, что I_i гарантированно находится в интервале свыше $I_i^- = (1 - \delta) I_i$ до $I_i^+ = (1 + \delta) I_i$ включительно. Как и в случае с модульным АВ, если установившееся действующее значение тока КЗ меньше нижней границы допустимых значений, то мгновенного расцепления гарантированно не происходит, если больше либо равно верхней, то мгновенное расцепление гарантированно, внутри диапазона мгновенное расцепление может быть, но не гарантированно. В рамках данного критерия необходимо, чтобы мгновенное расцепление гарантированно не происходило при ударном пусковом токе двигателя, что выражается условием

$$I_{i.QF1}^- \geq \frac{I_{p.M1}}{\sqrt{2}}. \quad (2.18)$$

- 7.** Гарантированное мгновенное отключение минимально возможного тока КЗ в защищаемой линии $I_{к.QF1}^{\min}$ (табл. 1.3). Для выполнения данного критерия этот ток должен быть в зоне гарантированного мгновенного срабатывания, что с учётом допустимого отклонения уставки соответствует условию

$$I_{i.QF1}^+ \leq I_{к.QF1}^{\min}. \quad (2.19)$$

- 8.** Гарантированное отключение максимально возможного тока КЗ в защищаемой линии $I_{к.QF1}^{\max}$ (табл. 1.3), для чего необходимо, чтобы его **номинальная рабочая наибольшая отключающая способность** удовлетворяла условию

$$I_{cs.QF1} \geq I_{к.QF1}^{\max}. \quad (2.20)$$

Важно отметить, что значение I_{cs} зависит от номинального рабочего напряжения — чем больше номинальное рабочее напряжение, тем меньше I_{cs} . Обычно в документации на АВ приводится несколько значений I_{cs} для каждого из номинальных рабочих напряжений — обычно это 230, 400 и 690 В. В таком случае значение I_{cs} для АВ нужно приводить в соответствии с номинальным напряжением сети 400 В.

9. Защиту двигателя от перегрузок¹⁰. АВ защиты двигателя имеет регулируемый **расцепитель сверхтоков с обратозависимой выдержкой времени** (тепловой расцепитель). Необходимо подобрать аппарат, обеспечивающий возможность настройки его уставки на номинальный ток двигателя. Для этого необходимо, чтобы номинальный ток двигателя попадал внутрь **диапазона токовых уставок расцепителя сверхтоков с обратозависимой выдержкой времени** $I_{r.\min} \dots I_{r.\max}$. Из этого диапазона нужно выбрать конкретное значение уставки теплового расцепителя I_r , которое должно быть как можно ближе к номинальному току двигателя, но не превышать его

$$I_{r.QF1} \leq I_{n.M1}. \quad (2.21)$$

На практике АВ защиты двигателя настраивается при помощи поворотного регулятора уставки. Выполнение данного условия также гарантирует защиту кабеля КБ2 от перегрузки. Действительно, если кабель выбран верно, то $I_{Z.кб2} \geq I_{n.M1}$, отсюда при выполнении (2.21) следует, что $I_{Z.кб2} \geq I_{r.QF1}$, что обеспечивает защиту кабеля.

Пример 2.3 Выбор QF1

Для рассматриваемой схемы электроснабжения (рис. В1) в качестве QF1 по каталогу [3] выбран АВ защиты двигателя производителя КЭАЗ серии *OptiStart* с номинальным током 32 А без теплового расцепителя *OptiStart MP-32RHI-32-T2* артикул 340159. Проверка его соответствия критериям выбора приведена в табл. 2.3, а внешний вид аппарата — на рис. 2.3.

Таблица 2.3

Проверка соответствия QF1 критериям выбора

№	Параметры системы в месте установки аппарата	Усл.	Параметры аппарата АВ КЭАЗ <i>MP-32RHI-32-T2</i>
1	Род тока	АС	Род тока главной цепи
		=	АС

¹⁰Только для АВ с комбинированным тепловым и электромагнитным расцепителем (термомагнитным).

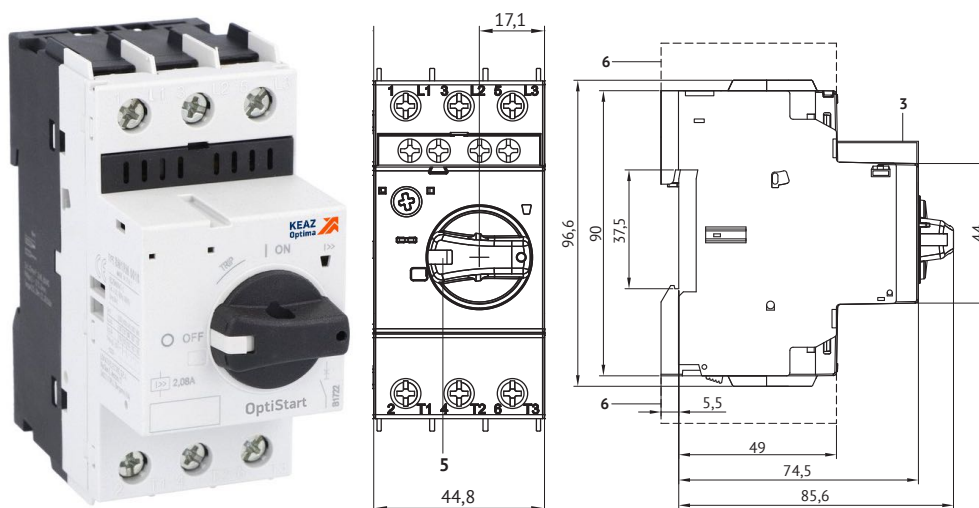


Рис. 2.3. АВ защиты двигателя в линии KB2 КЭАЗ *OptiStart* 32 А без теплового расцепителя [3]

Продолжение табл. 2.3

№	Параметры системы в месте установки аппарата	Усл.	Параметры аппарата АВ КЭАЗ <i>MP-32RNI-32-T2</i>
Число			
2	коммутируемых проводников	3 =	Количество полюсов $3P$
Сечение			
3	подключаемого кабеля q_{KB2} , мм ²	4 =	Максимальное сечение присоединяемого проводника, мм ² 6
Номинальное рабочее напряжение, В			
4	Коммутируемое напряжение, В	400 ≤	Номинальное рабочее напряжение $U_{e.QF1}$, В 400
Номинальный ток двигателя $I_{n.M1}$, А			
5	Номинальный ток двигателя $I_{n.M1}$, А	29,4 ≤	Номинальный ток, $I_{n.QF1}$, А 32
Ударный пусковой ток двигателя (действ.) $I_{p.M1}/\sqrt{2}$, А			
6	Ударный пусковой ток двигателя (действ.) $I_{p.M1}/\sqrt{2}$, А	247,2 ≤	Нижняя граница допустимых значений уставки расцепителя мгнов. действ. $I_{i.QF1}^-$, А 332,8 ¹
Минимальный ток КЗ $I_{к.QF1}^{\min}$, кА			
7	Минимальный ток КЗ $I_{к.QF1}^{\min}$, кА	0,56 ≥	Верхняя граница допустимых значений уставки расцепителя мгнов. действ. $I_{i.QF1}^+$, А 499,2 ¹

№	Параметры системы в месте установки аппарата	Усл.	Параметры аппарата	
			АВ КЭАЗ МР-32RHI-32-T2	
8	Максимальный ток КЗ $I_{к.QF1}^{\max}$, кА	0,71 ≤	Номинальная рабочая наибольшая отключающая способность $I_{cs.QF1}$ при $U_{e.QF1}$, кА	25

¹По каталогу [3] уставка электромагнитного расцепителя $I_i = 416$ А с допуском $\pm 20\%$ или $\delta = 0,2$. Мгновенное расцепление гарантированно не произойдёт до $I_i^- = 416 \cdot (1 - 0,2) = 332,8$ А включительно. Мгновенное срабатывание гарантированно при токах от $I_i^+ = 416 \cdot (1 + 0,2) = 499,2$ А.

2.4. Контактор

Контактор относится к **аппаратуре управления**. Под управлением понимается коммутации цепи. В своём составе он не имеет расцепителей и поэтому без вспомогательных устройств на сверхтоки реагировать не может. В проекте контактор используется для управления двигателем, подавая и снимая с него напряжение питания. Если АВ предназначен по большей части для редких отключений цепи в аварийных режимах, то контактор — для частых коммутаций цепи в нормальных условиях, а также для редких коммутаций относительно небольших сверхтоков (токов перегрузки). В связи с этим контактор имеет большую по сравнению с АВ коммутационную и механическую **износостойкости**. Контактор не имеет **ручного управления**. Контактор КМ1, применяемый в проекте, управляется при помощи встроенного в него электромагнита. В отличие от АВ, усилие для замыкания контактов передаётся не от рукоятки, приводимой в движение пользователем, а от электромагнитного привода. Такой контактор называется **электромагнитным**. Если для включения АВ необходимо вручную взвести его рукоятку управления, то для включения электромагнитного контактора необходимо подать напряжение на его **цепь управления**, куда входит катушка электромагнита. Таким образом, контактор имеет встроенную возможность **дистанционного управления**, что может быть достигнуто в АВ только при помощи дополнительных аксессуаров. Важно отметить, что несмотря на то, что контактор рассчитан на коммутацию токов перегрузки, он не имеет расцепителей и поэтому сам по себе не реагирует на возникновение сверхтока. В случае необходимости обеспечения защитных функций последовательно с контактором устанавливается тепловое реле, которое

включается своим **размыкающим** контактом в цепь управления контактора и при возникновении перегрузки обесточивает её, что приводит к размыканию контактора.

У контактора есть три электрические цепи.

1. **Главная цепь** — это силовая цепь, по которой протекает ток нагрузки, и в которой находятся главные контакты, способные коммутировать этот ток.

2. **Цепь управления** — это слаботочная цепь, необходимая для управления замыканием и размыканием контактов главной цепи контактора. В неё входит катушка электромагнита.

3. **Вспомогательная цепь** — это слаботочная цепь, в которую входят вспомогательные замыкающие и размыкающие контакты, включаемые в цепи управления и сигнализации¹¹.

Критерии выбора контактора

В рамках проекта необходимо, чтобы контактор *КМ1* соответствовал ряду критериев, согласно которым он должен обеспечивать следующее.

Главная цепь

1. Работу в сети переменного тока с частотой 50 Гц.
2. Коммутацию определённой схемой электроснабжения числа проводников (рис. В1), для чего должен иметь три главных контакта.
3. Присоединение к **выводам** отходящего кабеля с поперечным сечением жилы $q_{к62}$. Для этого максимальное поперечное сечение присоединяемого проводника должно удовлетворять условию

$$q_{КМ1} \geq q_{к62}. \quad (2.22)$$

4. Работу в сети с заданным номинальным напряжением. Каждая модель контактора, как правило, испытывается производителем на работоспособность при различных напряжениях. Поэтому для каждой модели нормируется несколько **номинальных рабочих напряжений**, каждому из которых соответствует свой **номинальный рабочий ток**. Если у выбранной в проект модели контактора несколько номинальных рабочих напряжений, то из них должно быть выбрано значение, наиболее близкое к линейному напряжению сети, но не меньше его. Таким образом,

¹¹В некоторых моделях контакторов может отсутствовать встроенная вспомогательная цепь.

для выполнения данного критерия должно выполняться условие

$$U_{e.KM1} \geq U_{n.T1}. \quad (2.23)$$

Если данному критерию удовлетворяют несколько значений $U_{e.KM1}$, то из них должно быть выбрано ближайшее к $U_{n.T1}$.

5. Заданную производителем коммутационную износостойкость. Для выполнения этого требования необходимо выполнение следующих двух условий:

5а. Отключаемый в режиме частых коммутаций ток должен быть не больше, чем номинальный рабочий ток контактора для [категории применения АСЗ](#)

$$I_{e.KM1}^{AC3} \geq I_{n.M1}. \quad (2.24)$$

Категория применения АСЗ учитывает условия коммутации, возникающие при пуске и отключении без предварительной остановки двигателя с КЗ ротором, применяемому в проекте. Важно отметить, что номинальный рабочий ток контактора зависит не только от категории применения, но и от выбранного ранее номинального рабочего напряжения — чем больше напряжение, тем меньше ток.

5б. Пусковой ток двигателя не должен превышать [шестикратный](#)¹² номинальный рабочий ток контактора, соответствующий категории применения АСЗ и выбранному рабочему напряжению

$$6I_{e.KM1}^{AC3} \geq U_{n.T1}. \quad (2.25)$$

Цепь управления

6. Работу цепи управления с заданным по схеме электроснабжения родом тока. Например, из схемы на (рис. [В1](#)) следует, что на катушку управления контактора подаётся переменное напряжение.

7. Работу цепи управления с заданным напряжением. Например, из схемы на рис. [В1](#) следует, что цепь управления подключена на фазное напряжение. Как правило катушка контактора предполагает работу

¹²В соответствии с режимом испытаний контактора на коммутационную износостойкость по ГОСТ Р 50030.4.1—2012 (МЭК 60947-4-1: 2009) Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 4. Контакторы и пускатели. Раздел 1. Электромеханические контакторы и пускатели. табл. В1. С. 64.

в некотором диапазоне напряжений $U_{c.KM1}^{\min} \dots U_{c.KM1}^{\max}$, поэтому условие выражается как

$$\frac{U_{n.T1}}{\sqrt{3}} \in \left[U_{c.KM1}^{\min}; U_{c.KM1}^{\max} \right]. \quad (2.26)$$

Вспомогательная цепь

8. Наличие во вспомогательной цепи необходимого в соответствии со схемой электроснабжения количества вспомогательных замыкающих контактов. Например из рис. В1 следует, что для организации схемы пуска необходим один дополнительный замыкающий контакт, шунтирующий кнопку $SB1$.

Пример 2.4 Выбор КМ1

Для рассматриваемой схемы электроснабжения (рис. В1) в качестве КМ1 по каталогу [3], выбран электромагнитный контактор производителя КЭАЗ серии *OptiStart E* с номинальным рабочим током для категории применения АС3 — 32 А и одним встроенным вспомогательным замыкающим контактом, напряжение катушки управления 220 В: *OptiStart E LC1-32E3210M5-32A-1NO-220AC*, артикул 330290. Проверка его соответствия критериям выбора приведена в табл. 2.4, а внешний вид аппарата — на рис. 2.5.

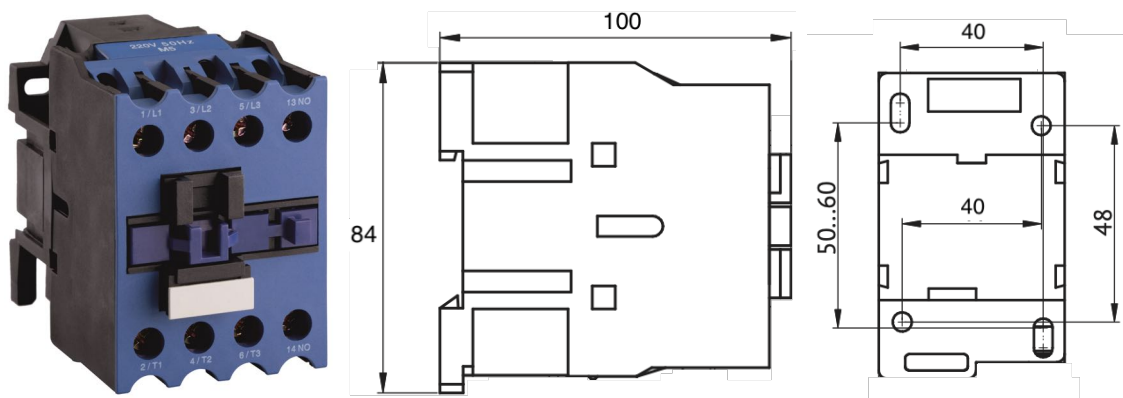


Рис. 2.4. Контактор КЭАЗ *OptiStart E* 32 А [3]

Таблица 2.4

**Проверка соответствия критериям выбора контактора
КЭАЗ *OptiStart LC1-32E3210M5-32A-1NO-220AC***

№	Параметры системы в месте установки аппарата	Усл.	Параметры аппарата
Главная цепь			
1	Род тока	$AC =$	Род тока главной цепи AC
2	Число коммутируемых проводников	$3 =$	Кол-во главных контактов 3
3	Сечение подключаемого кабеля $q_{кб2}$, мм ²	$4 =$	Макс. сечение присоединяемого проводника, мм ²
4	Коммутируемое напряжение, В	$400 \leq$	Номинальное рабочее напряжение $U_{e.KM1}^{AC3}$, В
5а	Номинальный ток двигателя $I_{n.M1}$, А	$29,4 \leq$	Номинальный рабочий ток (для $AC3$ и при $U_{e.KM1}$) $I_{e.KM1}$, А
5б	Пусковой ток двигателя $I_{s.M1}$, А	$205,8 \leq$	Шестикратный номинальный рабочий ток (для $AC3$ и при $U_{e.KM1}$) $6I_{e.KM1}^{AC3}$, А
Цепь управления			
6	Род тока	$AC =$	Род тока цепи управления AC
7	Напряжение, подключаемое к цепи управления, В	$230 \in$	Диапазон напряжений срабатывания, В 187...242

№	Параметры системы в месте установки аппарата	Усл.	Параметры аппарата
Вспомогательная цепь			
	Кол-во вспомогательных замыкающих контактов по схеме пуска		Кол-во встроенных вспомогательных замыкающих контактов
8	1	=	1

¹Соединение между *QF1* и *KM1* расположено внутри НКУ и выполняется гибким кабелем с наконечником. Поэтому в таблицу внесено значение из каталога [3] именно для случая подключения гибкого кабеля с наконечником.

Выбранный контактор удовлетворяет всем условиям, кроме условия по коммутационной износостойкости, в связи с чем необходимо выбрать контактор следующего типоразмера, т.е. на 40 А — *OptiStart E LC1E40M5-40A-1NO+1NC-220AC*, артикул 330295. У контакторов одинаковые характеристики, кроме номинального рабочего тока, поэтому в табл. 2.5 приведена проверка только по ранее не выполненному критерию 5б.

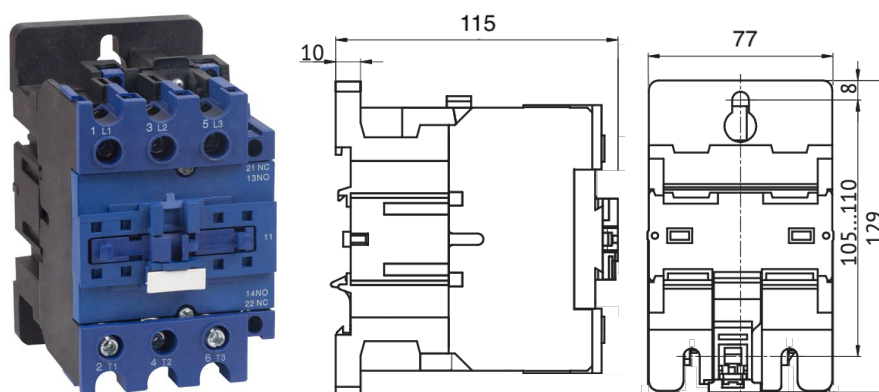


Рис. 2.5. Контактор КЭАЗ *OptiStart E* 40 А

Таблица 2.5

Дополнительная проверка для КЭАЗ *OptiStart E LC1E40M5-40A-1NO+1NC-220AC*

№	Параметры системы в месте установки аппарата	Усл.	Параметры аппарата
Главная цепь			

№	Параметры системы в месте установки аппарата	Усл.	Параметры аппарата
56	Пусковой ток двигателя $I_{с.М1}$, А	205,8 ≤	Шестикратный номинальный рабочий ток (для АСЗ и при $U_{е.КМ1}) 6I_{е.КМ1}^{(АСЗ)}$, А

2.5. Тепловое реле

В рассматриваемой схеме электроснабжения (рис. В1) функция защиты двигателя от перегрузки осуществляется не встроенным в АВ расцепителем перегрузки, а при помощи отдельного аппарата — **теплового реле**. Как упоминалось выше на стр. 64, в этом случае АВ защиты двигателя выполняет только функцию защиты от КЗ, т.е. должен иметь только расцепитель мгновенного действия, в роли которого, как правило, выступает электромагнитный расцепитель. Чувствительным элементом как, теплового расцепителя АВ, так и теплового реле, является биметаллическая пластина, изгибающаяся при нагревании. Однако в отличие от теплового расцепителя, интегрированного в АВ, тепловое реле представляет собой отдельное устройство.

В тепловом реле выделяют две электрические цепи.

1. **Входная цепь**, обтекаемая рабочим током двигателя, в которой находятся нагревательные элементы биметаллических пластин (аналог главной цепи контактора);

2. **Выходная цепь**, в которую входят размыкающие (**нормально замкнутые**) и замыкающие (**нормально разомкнутые**) слаботочные контакты, включаемые в цепи управления и сигнализации (аналог вспомогательной цепи контактора).

Отличительной чертой теплового реле является то, что его входная цепь включается последовательно в цепь питания двигателя, однако не предназначено для коммутации этой цепи. Это связано с тем, что тепловое реле обладает только слаботочными контактами в выходной цепи, в то время как контакты во входной цепи отсутствуют. Размыкающий контакт выходной цепи теплового реле включается последовательно в цепь управления контактора. Таким образом, при срабатывании реле его размыкающий контакт обесточивает катушку электромагнита контактора и он размыкается. В результате этого отключение двигателя осуществляется именно главными контактами контактора.

Ранее на стр. 69 отмечалось, что контактор предназначен для коммутации нормальных токов и токов перегрузки. Поэтому описанная коммутация сверхтока, инициированная тепловым реле, является для контактора штатным режимом. Тепловое реле имеет регулируемый ток уставки, что позволяет выполнить точную настройку на рабочий ток двигателя.

В проекте согласно рис. В1 входная цепь теплового реле включена последовательно с двигателем и тем самым обтекается его током, а размыкающий контакт выходной цепи включен последовательно в цепь управления контактора. Таким образом, при увеличении тока во входной цепи выше заданной уставки размыкается контакт в выходной цепи реле, что приводит к обесточиванию цепи управления контактора и его размыканию и, следовательно, отключению двигателя.

Критерии выбора теплового реле

В рамках проекта необходимо, чтобы тепловое реле *КК1* соответствовало ряду критериев, согласно которым оно должно обеспечивать следующее.

К о н с т р у к ц и я

1. Совместимость с контактором по типоразмеру. Тепловые реле используются совместно с контактором. Для удобства монтажа конструкция теплового реле позволяет крепить его к контактору. Контактور устанавливается на *DIN*-рейку, а тепловое реле крепится к нему, образуя единую жёсткую конструкцию. По этой причине тепловое реле *КК1* и контактор *КМ1* должны иметь совместимые типоразмеры. Как правило, в технической документации на контактор приводятся модели совместимых с ним тепловых реле.

В х о д н а я ц е п ь

2. Работу в сети переменного тока с частотой 50 Гц.
3. Присоединение к выводам отходящего кабеля с поперечным сечением жилы $q_{кб2}$. Для этого максимальное поперечное сечение присоединяемого проводника должно удовлетворять условию

$$q_{КК1} \geq q_{кб2}. \quad (2.27)$$

4. Работу в сети с заданным номинальным напряжением. В отличие от контактора, тепловое реле не коммутирует ток нагрузки, поэтому его рабочий ток не зависит от номинального рабочего напряжения. В связи с

этим в технической литературе приводится одно значение **номинального рабочего напряжения**, которое определяется **номинальным напряжением изоляции**. Таким образом, **номинальное рабочее напряжение** входной цепи должно удовлетворять условию

$$U_{e.KK1}^{(вх)} \geq U_{n.T1}. \quad (2.28)$$

- 5.** Возможность защиты электродвигателя с заданным номинальным током $I_{n.M1}$. Тепловое реле имеет регулируемую уставку. Для корректной настройки реле номинальный ток двигателя $I_{n.M1}$ должен входить в **диапазон уставки** $I_r^{\min} \dots I_r^{\max}$. На практике тепловое реле как и АВ защиты двигателя с термоманитным расцепителем настраивается при помощи поворотного регулятора на выбранное значение $I_{r.KK1}$. Идеально было бы обеспечить условие $I_{r.KK1} = I_{n.M1}$. Однако даже в рассматриваемом в пособии примере $I_{n.M1} = 29,4$ А. С такой точностью настроить поворотный регулятор невозможно, поэтому для гарантированной защиты он настраивается на **немного** меньший ток, значение которого возможно проконтролировать по шкале регулятора уставки¹³

$$I_{r.KK1} \leq I_{n.M1}. \quad (2.29)$$

Как было показано выше на стр. 67 выполнение данного условия также гарантирует защиту не только двигателя, но и кабеля КБ2 от перегрузки.

- 6.** Надёжное включение двигателя в заданных условиях, определяемых временем пуска t_s и пусковым током $I_{s.M1}$, а также защиту от затяжного пуска. Для этого в рамках проекта тепловое реле должно иметь **класс расцепления** 10 или 10А.

В ы х о д н а я ц е п ь

- 7.** Возможность отключения цепи управления контактора при срабатывании. Для этого требуется наличие минимум одного размыкающего контакта.
- 8.** Возможность подключения к цепи управления в соответствии с заданной схемой. Как было замечено выше, по схеме рис. В1 видно, что цепь управления подключена на фазное напряжение. Таким образом,

¹³Конкретное значение $I_{r.KK1}$ выбирается приблизительно. Для этого нужно найти фото выбранной модели теплового реле и визуально оценить по шкале регулятора уставки значение, на которое можно его настроить.

значение **номинального рабочего напряжения** выходной цепи (цепи управления), должно удовлетворять условию

$$U_{e.KK1}^{(ВЫХ)} \geq \frac{U_{n.T1}}{\sqrt{3}}. \quad (2.30)$$

Пример 2.5 Выбор *KK1*

Для рассматриваемой схемы электроснабжения (рис. **B1**) в качестве *KK1* по каталогу [3] выбрано тепловое реле производителя КЭАЗ серии *OptiStart E* типа *LRE353* с диапазоном уставки — 23...32 А, совместимое с выбранным контактором типа *LC1E40*: *OptiStart E LRE353-93A(23-32A)*, артикул **330328**. Проверка его соответствия критериям выбора приведена в табл. 2.6, а внешний вид аппарата — на рис. 2.6.

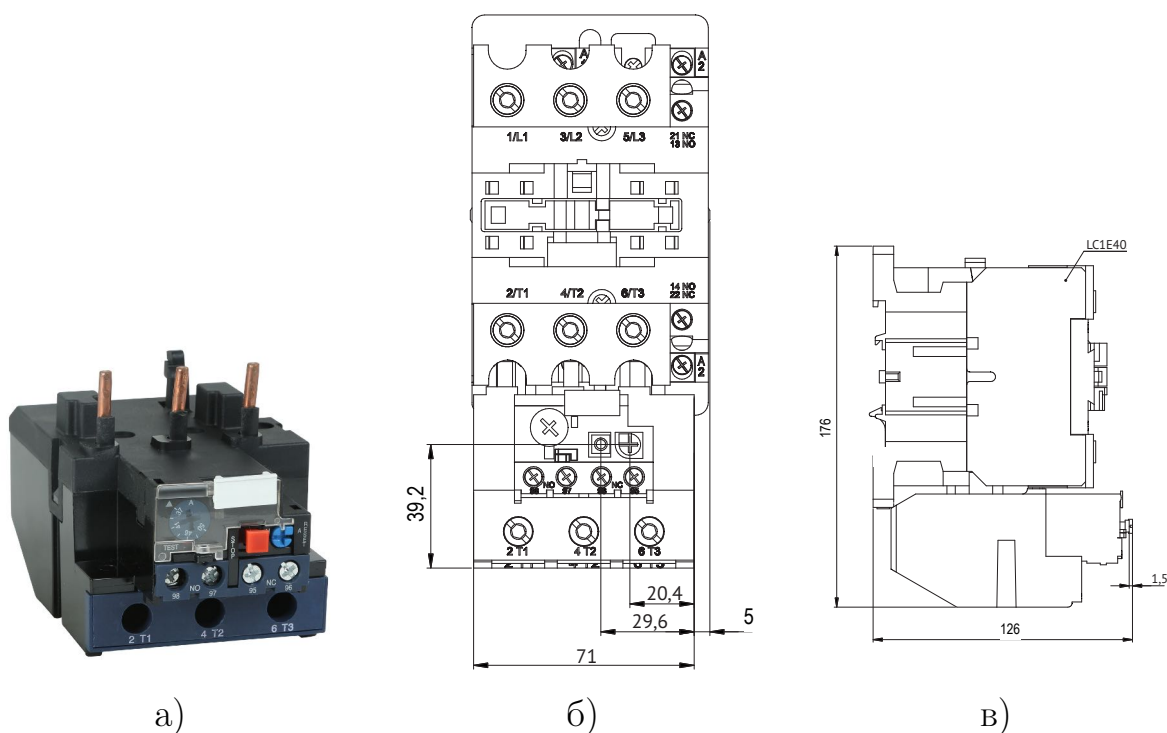


Рис. 2.6. Тепловое реле КЭАЗ *OptiStart E* типа *LRE353* [3]:
а) фото; б) и в) габаритный чертёж в сборке с контактором

**Проверка соответствия критериям выбора теплового реле
КЭАЗ *OptiStart E LRE353-93A(23-32A)***

№	Параметры системы в месте установки аппарата	Усл.	Параметры аппарата
К о н с т р у к ц и я			
1	Тип контактора <i>LC1E40</i>	$\Rightarrow$	Тип теплового реле <i>LRE353</i>
В х о д н а я ц е п ь			
2	Род тока <i>AC</i>	$=$	Род тока главной цепи <i>AC</i>
3	Сечение подключаемого кабеля $q_{кб2}$, мм ² 4	$=$	Макс. сечение присоединяемого проводника, мм ² 35 ¹
4	Подключаемое напряжение, В 400	$\geq$	Номинальное рабочее напряжение $U_{e.KK1}$, В 690
5	Номинальный ток двигателя $I_{n.M1}$, А 29,4	$\geq$	Уставка $I_{r.KK1}$, А 29 ²
6	Время пуска t_s , с 1,5 Пуск. ток $I_{s.M1}$, А 205,8	$\Rightarrow$	Класс расцепления 10A ³
В ы х о д н а я ц е п ь			
7	Кол-во размыкающих контактов по схеме пуска 1	$=$	Кол-во размыкающих контактов 1
8	Напряжение цепи управления 230	$\leq$	Номинальное рабочее напряжение вспомогательной цепи $U_{e.KK1}^{(вых)}$, В 690

¹Все соединения внутри НКУ выполняются гибким кабелем с наконечником, поэтому макс. значение сечения проводника определяется по каталогу именно для такого случая.

²Диапазон уставки 23...32 А. По изображению теплового реле видно, что диапазон разделён на 6 делений, откуда цена деления $(32 - 23)/6 = 1,5$ А. Считаем, что можно выставить настройку на глаз ровно по середине между делениями, откуда шаг регулирования уставки принимаем 0,75. Выбираем уставку $23 + 0,75 \cdot 8 = 29$ А.

³Класс расщепления 10А соответствует срабатыванию реле при токе $7,2 \cdot I_{r.KK1} = 7,2 \cdot 29 = 208,8 \text{ А}$ за время от $t_{r.KK1}^- = 2 \text{ с}$ до $t_{r.KK1}^+ = 10 \text{ с}$. Исходя из наихудшего случая считаем, что ВТХ теплового реле проходит через точку $(7,2 \cdot I_{r.KK1}; t_{r.KK1}^-)$ или $(208,8 \text{ А}; 2 \text{ с})$. Пусковая характеристика двигателя проходит через точку $(I_{s.M1}; t_s)$ или $(205,8 \text{ А}; 1,5 \text{ с})$. Однозначно сделать вывод об отсутствии перекрытия между ВТХ теплового реле и пусковой характеристикой двигателя можно только графически (рис. 2.19). Аналитически же на данном этапе выполнимость критерия 6 можно лишь оценить. Если приблизительно аппроксимировать ВТХ теплового реле функцией $I^2 t = \text{const}$, то в случае если $(7,2 \cdot I_{r.KK1})^2 \cdot t_{r.KK1}^- > (I_{s.M1})^2 \cdot t_s$ можно считать, что перекрытия нет. В данном случае это неравенство численно выражается как $(7,2 \cdot 29)^2 \cdot 2 > 208,8^2 \cdot 1,5$ или $87 \cdot 10^3 \text{ А}^2 \cdot \text{с} > 64 \cdot 10^3 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$, поэтому в первом приближении считаем, что тепловое реле класса 10А обеспечивает возможность пуска двигателя.

2.6. Плавкий предохранитель

Согласно рассматриваемой схеме электроснабжения на рис. В1, защита цепи управления контактора от сверхтоков осуществляется **плавким предохранителем FU1** (далее — предохранитель). Основным элементом предохранителя является **плавкая вставка**, внутри которой находится **плавкий элемент**, расплавляющийся от теплового действия сверхтока. После срабатывания предохранителя плавкая вставка подлежит замене. Плавкая вставка (рис. 2.7а) не имеет зажимов для присоединения внешних проводников. В связи с этим дополнительно к плавкой вставке необходимо выбрать **держатель плавкого предохранителя** или **клеммную колодку** с возможностью установки плавкой вставки. Зачастую держатели предохранителя обладают функциями разъединителя, поэтому у многих производителей в номенклатуре их можно найти под названием **плавкий предохранитель-разъединитель**¹⁴.

Критерии выбора предохранителя

В рамках проекта необходимо, чтобы предохранитель FU1 соответствовал ряду критериев, согласно которым он должен обеспечивать следующее.

П л а в к а я в с т а в к а

1. Работу в сети переменного тока 50 Гц.
2. Работу в цепи управления контактора с заданным напряжением питания цепи управления $U_{с.КМ1}$. Для этого номинальное напряжение плавкой

¹⁴В технической литературе, также как и в данном пособии слово «плавкий» зачастую опускается.

вставки должно соответствовать условию

$$U_{n.FU1} \geq U_{c.KM1}. \quad (2.31)$$

3. Длительное пропускание тока, потребляемого катушкой управления контактора $KM1$ при удержании I_c

$$I_{n.FU1} \geq I_{c.KM1}. \quad (2.32)$$

В технической документации ток I_c , как правило, не приводится. Вместо него указывается **удерживающая мощность** S_c . Зная номинальное напряжение цепи управления U_c ток при удержании рассчитывается как

$$I_{c.KM1} = \frac{S_{c.KM1}}{U_{c.KM1}}. \quad (2.33)$$

4. Кратковременное пропускание в течение времени срабатывания электромагнита (порядка десятков миллисекунд) переходного тока $I_{c.p}$, возникающего при подаче напряжения на катушку управления. Точная проверка выполнения данного критерия возможна с использованием ВТХ предохранителя. Однако в первом приближении можно считать это требование выполненным если используется **тип плавкой вставки типа** gG , gM или aM или плавкая вставка с замедлением срабатывания.

5. В случае использования электромагнита переменного тока в контакторе, токовая перегрузка в цепи управления может возникнуть, если после подачи напряжения на катушку электромагнита его якорь не может полностью притянуться к полюсу, что может быть вызвано как недостаточным напряжением питания, так и механическим заклиниванием якоря. В этом случае ток $I_{c.p}$, будучи на порядок больше, чем I_c , будет протекать длительно и предохранитель должен сработать. Таким образом необходимо, чтобы номинальный ток плавкой вставки соответствовал условию

$$I_{n.FU1} < I_{c.p.KM1}. \quad (2.34)$$

Как и в случае с током удержания в технической документации на контактор ток $I_{c.p}$ не даётся напрямую. Вместо него приведена **мощность включения** при срабатывании $S_{c.p}$, зная номинальное напряжение цепи управления U_c ток катушки при срабатывании рассчитывается как

$$I_{c.p.KM1} = \frac{S_{c.p.KM1}}{U_{c.KM1}}. \quad (2.35)$$

Держатель плавкой вставки

6. Совместимость с плавкой вставкой выбранного типоразмера.
7. Установку необходимого в соответствии со схемой количества плавких вставок. В случае рассматриваемого примера должен иметь однополюсное исполнение 1P.

Пример 2.6 Выбор FU1

Для рассматриваемой схемы электроснабжения в качестве FU1 по каталогу [4], выбрана плавкая вставка производителя TDM модель ВПТ6-1 0,16А 250В типоразмера 5×20 с номинальным током 0,16 А: артикул [SQ0738-0101](#).

В качестве держателя плавкой вставки по каталогу [5] выбрана клемма винтовая с держателем плавкой вставки IEK 5×20: артикул [УСТ14-00-K03-004](#).

Проверка соответствия критериям выбора приведена в табл. 2.7, а внешний вид аппаратов — на рис. 2.7 и 2.8.



Рис. 2.7. Плавкая вставка TDM
SQ0738-0101 5×20 мм

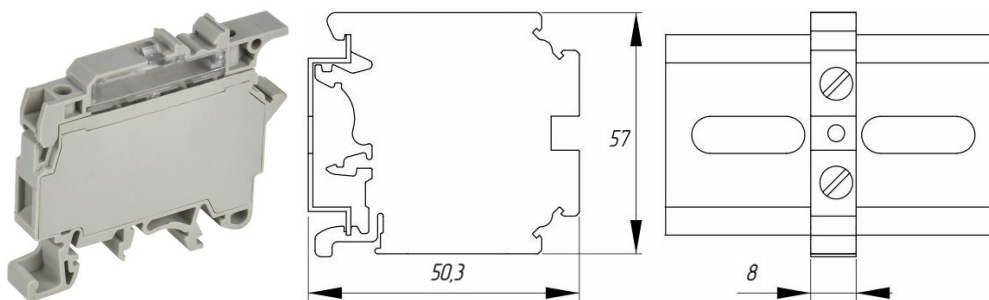


Рис. 2.8. Клеммная колодка с держателем плавкой вставки
IEK YCT14-00-K03-004

Таблица 2.7

Проверка соответствия критериям выбора предохранителя.
Плавкая вставка *TDM SQ0738-0101* и
держатель *IEK YCT14-00-K03-004*

№	Параметры системы в месте установки аппарата	Усл.	Параметры аппарата
П л а в к а я в с т а в к а			
1	Род тока AC	$=$	Род тока AC
2	Ток катушки контактора $KM1$ при удержании I_c , А	$0,09^1 \leq$	Номинальный ток $I_{n.FU1}$, А
3	Ток катушки контактора $KM1$ при срабатывании $I_{c.p.KM1}$, А	$0,9^2 >$	Номинальная ток $I_{n.FU1}$, А
4	Напряжение питания цепи управления контактора $U_{c.KM1}$, В	$230 \leq$	Номинальное напряжение $U_{n.FU1}$, В
Д е р ж а т е л ь			
5	Типоразмер плавкой вставки 5×20	$=$	Совместимый типоразмер плавкой вставки 5×20
6	Кол-во плавких вставок по схеме пуска 1	$=$	Кол-во полюсов $1P$

¹По каталогу для выбранного ранее контактора *LC1E40* мощность катушки на удержание $S_{c.KM1} = 20 \text{ В} \cdot \text{А}$ при номинальном напряжении катушки $U_{c.KM1} = 220 \text{ В}$, откуда $I_{c.KM1} = 20/220 = 0,09 \text{ А}$.

²Аналогично мощность катушки при срабатывании $S_{с.р.КМ1} = 200 \text{ В} \cdot \text{А}$ при номинальном напряжении катушки $U_{с.КМ1} = 220 \text{ В}$, откуда $I_{с.р.КМ1} = 200/220 = 0,9 \text{ А}$.

2.7. Кнопочные выключатели

Для подачи команды на включение и отключения двигателя в схеме предусмотрены два **кнопочных выключателя** — пуск и стоп, обозначенные на рис. В1 как $SB1$ и $SB2$. Далее рассматривается выбор **кнопочного выключателя** из модульной серии, в которой он собирается из нескольких элементов — **органа управления** (привод или головка кнопки) и **контактного элемента** (контактного блока или модуля), который содержит непосредственно коммутирующий **контакт**. Кнопочный выключатель должен быть выбран, соответствующий ряду критериев, согласно которым он должен обеспечивать следующее.

О р г а н у п р а в л е н и я

1. Возврат в исходное положение после снятия воздействия для чего должен иметь исполнение с **самовозвратом**. Использование такого типа кнопочных выключателей совместно с шунтированием кнопки $SB1$ вспомогательным замыкающим контактом контактора (рис. В1) позволяет предотвратить автоматический повторный запуск двигателя при потере и последующем восстановлении питания со стороны сети.
2. Соответствие нормам по **маркировке** и обозначению органов управления, предусматривающих выполнение кнопки пуск белого цвета (допускается зелёный), а стоп — чёрного цвета (допускается красный).
3. Орган управления в дальнейшем будет устанавливаться на внешнюю поверхность дверцы оболочки НКУ со **степенью защиты**, которая согласно исходным данным должна быть не ниже $IP65$ (стр. 14). Поэтому степень защиты органа управления кнопочного выключателя должна быть не ниже этого значения.

К о н т а к т н ы й э л е м е н т

4. Работу в сети переменного тока 50 Гц.
5. Работу в цепи управления контактора с заданным напряжением питания $U_{с.КМ1}$. Для этого номинальное рабочее напряжение контактного

элемента при работе на переменном токе должно соответствовать условию

$$U_{n.SB} \geq U_{c.KM1}. \quad (2.36)$$

6. Длительное пропускание потребляемого катушкой контактора тока $I_{c.KM1}$. Для этого условный тепловой ток должен удовлетворять условию

$$I_{th.SB} \geq I_{c.KM1}. \quad (2.37)$$

7. Наличие необходимого по схеме на рис. В1 количества размыкающих и замыкающих контактов. Кнопка пуск должна иметь минимум один замыкающий контакт, кнопка стоп — минимум один размыкающий контакт.

Пример 2.7 Выбор SB1

Для рассматриваемой схемы электроснабжения в качестве SB1 по каталогу [6] выбран кнопочный выключатель КЭАЗ типа КМЕ4510м белого цвета, с одним замыкающим контактом КМЕ4510м-белый-1но+0нз-цилиндр-IP54, артикул 354386.

Проверка соответствия кнопочного выключателя критериям выбора приведена в табл. 2.8, а внешний вид — на рис. 2.9.

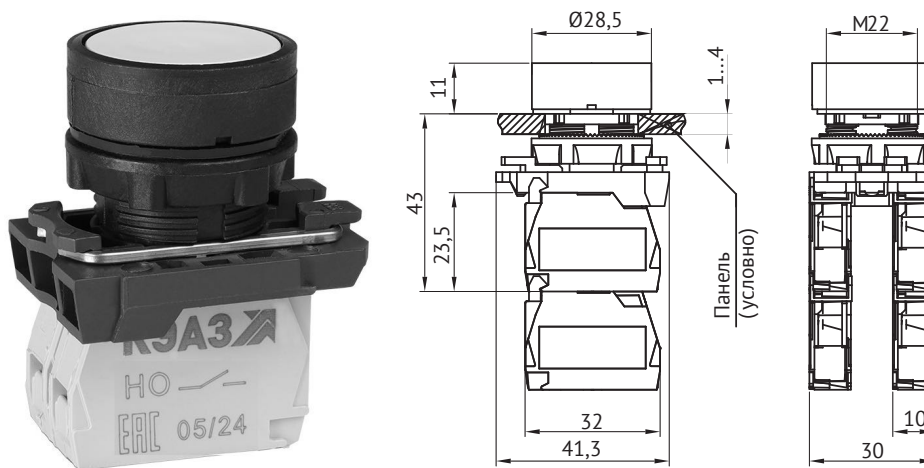


Рис. 2.9. Кнопочный выключатель КЭАЗ типа КМЕ4510м

**Проверка соответствия критериям выбора кнопочного
выключателя КЭАЗ типа КМЕ4510м**

№	Параметры системы в месте установки аппарата	Усл.	Параметры аппарата
О р г а н у п р а в л е н и я			
1	Возврат в исходное положение после воздействия	Да =	Исполнение с самовозвратом Да
2	Исполняемая команда	Вкл. $\Rightarrow$	Цвет кнопки Белый
3	Мин. степень защиты НКУ	IP65 $\geq$	Степень защиты IP65
К о н т а к т н ы й э л е м е н т			
4	Род тока	AC =	Род тока AC
5	Напряжение питания цепи управления контактора $U_{c.КМ1}$, В	230 $\leq$	Номинальное рабочее напряжение AC $U_{e.SB1}$, В 660
6	Ток катушки контактора КМ1 при удержании $I_{c.КМ1}$, А	0,09 $\leq$	Условный тепловой ток $I_{th.SB1}$, А 10
7	Кол-во замыкающих контактов по схеме пуска	1 $\geq$	Кол-во замыкающих контактов 1

Кнопочный выключатель SB2 «Стоп» выбирается аналогично, но отличается цветом и типом контактного элемента в соответствии с описанными выше критериями 2 и 7.

2.8. Выключатель-разъединитель

Выключатель-разъединитель, также называемый выключатель нагрузки, расположен в общей линии КБ1 и, в соответствии со своим названием, имеет две основные функции.

1. Функция выключателя — ручное включение и отключение номинальных токов, а также токов перегрузки. Выключатель-разъединитель не предназначен для коммутации токов КЗ.

2. Функция разъединителя — гарантированное снятие напряжения со всех аппаратов, входящих в состав НКУ, в целях обеспечения безопасности при проведении работ на электроустановке.

Для обеспечения функции разъединителя аппарат в разомкнутом положении должен обеспечивать изолирующий промежуток между своими главными контактами, выдерживающий заданные импульсные перенапряжения, а также иметь чёткую индикацию, однозначно отражающую положение главных контактов¹⁵.

Критерии выбора выключателя-разъединителя

В рамках проекта необходимо, чтобы выключатель-разъединитель соответствовал ряду критериев, согласно которым он должен обеспечивать следующее.

1. Работу в сети переменного тока с частотой 50 Гц.
2. Коммутацию необходимого по схеме электроснабжения (рис. В1) числа проводников. $QS1$ разрывает три фазных проводника и нейтральный проводник, поэтому должен иметь четырёхполюсное исполнение.
3. Присоединение к выводам кабеля с поперечным сечением жилы $q_{кб1}$. Для этого максимальное поперечное сечение присоединяемого проводника должно удовлетворять условию

$$q_{QS1} \geq q_{кб1}. \quad (2.38)$$

4. Работу в сети с заданным номинальным напряжением, для чего его номинальное рабочее напряжение переменного тока должно удовлетворять условию

$$U_{e.QS1} \geq U_{n.T1}. \quad (2.39)$$

Если данному критерию удовлетворяют несколько значений $U_{e.QS1}$, то из них должно быть выбрано ближайшее к $U_{n.T1}$.

5. Возможность коммутации смешанной активно-индуктивной нагрузки, характер которой определяется питаемыми по КБ1 двигателем и од-

¹⁵В соответствии с ГОСТ 60947–4–1 пп. 7.1.7.1 индикация положения главных контактов может быть обеспечена одним из следующих способов: положением органа управления, специальным механическим индикатором, возможностью визуального осмотра главных подвижных контактов.

нофазными потребителями. Условия гашения дуги в большой степени зависят от характера нагрузки. По этой причине, также как и для контакторов, нормируются **категории применения**. В рамках проекта рекомендуется, чтобы номинальный ток аппарата для категории применения не ниже $AC22A^{16}$ удовлетворял условию

$$I_{n.QS1}^{AC22A} \geq I_{B.кб1}. \quad (2.40)$$

Пример 2.8 Выбор QS1

Для рассматриваемой схемы электроснабжения в качестве $QS1$ по каталогу [7] выбран четырёхполюсный выключатель-разъединитель *IEK* серии *ARMAT* с номинальным током 63 А, артикул *AR-SWN-4-063*.

Проверка соответствия выключателя-разъединителя критериям выбора приведена в табл. 2.9, а внешний вид — на рис. 2.10.

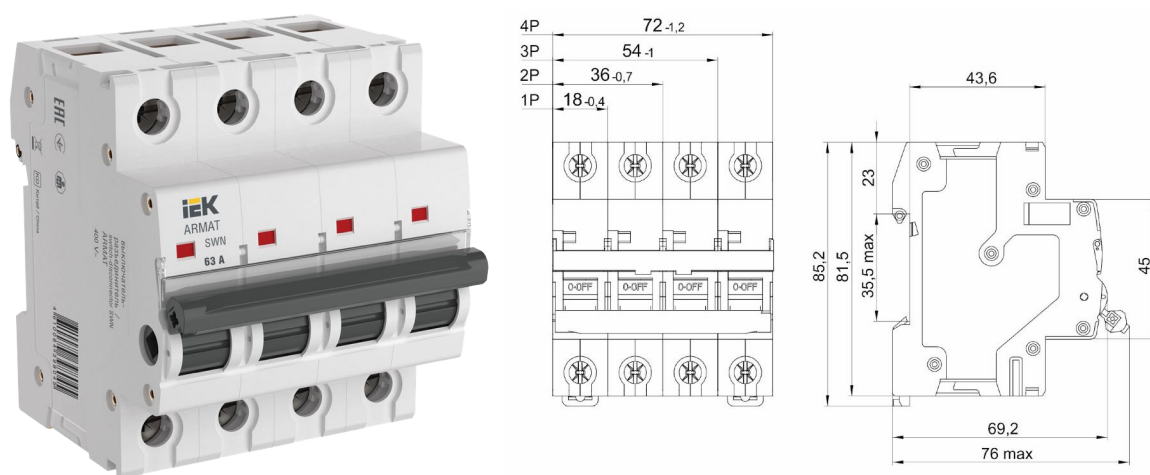


Рис. 2.10. Выключатель-разъединитель *IEK AR-SWN-4-063*

¹⁶Категория применения $AC22A$ предусматривает коммутацию смешанных активных и индуктивных нагрузок, включая умеренные перегрузки. Суффикс «А» означает, что аппарат может быть использован в условиях частых коммутаций (ГОСТ IEC 60947-3—2016 пп. 4.4)

Проверка соответствия $QS1$ критериям выбора

№	Параметры системы в месте установки аппарата		Усл.	Параметры аппарата АВ $EKF\ mcb6-1-10B-av$	
1	Род тока	AC	=	Род тока главной цепи	AC
2	Число коммутируемых проводников	4	=	Кол-во полюсов	4
3	Сечение вводного кабеля $q_{кб1}$, мм ²	16	=	Максимальное сечение присоединяемого проводника, мм ²	35
4	Коммутируемое напряжение, В	400	≤	Номинальное напряжение $U_{n.QS1}$, В	400
5	Расчётный ток кабеля $I_{B.кб1}$, А	47,3	≤	Номинальный ток для кат. $AC22A$, $I_{n.QS1}^{AC22A}$, А	63

2.9. Автоматический выключатель в литом корпусе

АВ $QF11$ располагается на верхнем уровне системы электроснабжения и не входит в состав разрабатываемого в данном проекте НКУ, являясь частью комплектной трансформаторной подстанции (КТП), однако его характеристики должны быть согласованы с нижестоящими аппаратами. За счёт такого расположения АВ имеет ряд особенностей по сравнению с аппаратами нижнего уровня системы электроснабжения, выбранными ранее.

1. Высокие предельные значения номинального тока, что связано с питанием через этот АВ нескольких линий, т.е. через него протекает сумма токов всех нижестоящих потребителей.

2. Высокие предельные значения наибольшей отключающей способности. Это связано с тем, что при появлении КЗ на уровне КТП, возникающий ток не ограничен сопротивлениями длинных кабельных линий и поэтому принимает большие значения.

3. Как правило имеет расцепители с регулируемыми уставками срабатывания. Это даёт возможность тонкой настройки ВТХ для координации относительно ВТХ нижестоящих АВ. Это связано с повышенными требованиями к надёжности подачи электроэнергии на верхнем уровне электроснабжения, так как в случае отключения АВ верхнего уровня обесточивается большое число потребителей.

Отмеченными характеристиками обладают специальные типы аппаратов АВ в литом корпусе и воздушные АВ.

Согласно стандарту термин «АВ в литом корпусе»¹⁷ характеризует конструктивное исполнение аппарата. Согласно определению стандарта такой АВ имеет несущий корпус из литого изоляционного материала, т.е. корпус пластиковый и является внешним «скелетом» АВ, к которому крепятся все узлы.

Однако на практике сложилось более узкое понимание термина «АВ в литом корпусе». В каталогах производителей АВ в литом корпусе — это силовой АВ, имеющий несущий корпус из литого изоляционного материала немодульного исполнения, имеющий категорию селективности А. Типичные значения номинальных токов АВ в литом корпусе до 630 А в редких случаях до 1600 А и отключающей способности до 150 кА.

АВ категории селективности А могут обеспечивать кратковременную выдержку срабатывания при КЗ, но до относительно малых значений токов менее $\max(12I_n; 5 \text{ кА})$. Это принудительное замедление необходимо для реализации временной селективности с нижестоящими АВ. За счёт обозначенных особенностей конструкции, АВ в литом корпусе имеют относительно небольшую механическую прочность, поэтому протекание больших токов КЗ в течение хоть кратковременной, но выдержки времени несёт в себе опасность повреждения аппарата. По этой причине предел тока, до которого может действовать кратковременная выдержка, относительно низкий и он значительно меньше, чем отключающая способность аппарата. В виду существующей опасности для АВ при больших токах КЗ активизируется механизм самозащиты, реализуемый при помощи сверхмгновенного расцепителя. Принцип действия сверхмгновенного расцепителя обычно основан на явлении электродинамического отброса контактов силой Лоренца. При протекании токов выше уставки сверхмгновенного расцепителя I_{io} ¹⁸ эта сила принимает значения, достаточные для преодоления силы контактного нажатия, и под её действием контакты размыкаются. На практике это означает, что когда ток в АВ достигает высоких значений, то контакты размыкаются за время менее 10 мс, какая бы ни была настройка расцепителя. Учитывая, что кратковременная выдержка, как правило, более 100 мс, то в этом случае она уже не обеспечена. По этой причине аппараты категории А определяются как специально не предназначенные для временной селективности, так как она хоть и может быть

¹⁷В технической документации встречается международная аббревиатура МССВ от англ. *Moulded Case Circuit Breaker*.

обеспечена, но лишь при относительно малых токах КЗ. Как следствие временная селективность не может действовать во всём диапазоне токов КЗ, которые могут протекать через аппарат. По этой причине наиболее характерной зоной применения АВ в литом корпусе является средний уровень системы электроснабжения низкого напряжения, где требования по надёжности электроснабжения не столь существенны по сравнению с верхним уровнем.

Помимо сверхмгновенного расцепителя в АВ в литом корпусе есть и «обычный» расцепитель сверхтоков, в качестве которого в современных аппаратах всё чаще применяются электронные расцепители. Из-за того, что действие сверхмгновенного расцепителя основано на отталкивании контактов под действием электромагнитной силы, возникающей в самой контактной системе, то никакие настройки электронного расцепителя не могут повлиять на этот процесс. В связи с этим при достижении током КЗ уставки сверхмгновенного расцепителя I_{io} происходит мгновенное отключение «в обход» настроек электронного расцепителя. Таким образом, настройки электронного расцепителя в области больших токов автоматически переопределяются сверхмгновенным расцепителем¹⁸.

В связи с тем, что аппарат категории селективности А защищает сам себя от больших токов КЗ при помощи сверхмгновенного расцепителя, то для него не нормируется значение **номинального кратковременно выдерживаемого тока** I_{cw} . Другими словами, требование не превышения интеграла Джоуля I^2t допустимого значения выполняется автоматически и не требует дополнительной проверки.

АВ в литом корпусе предназначены для промышленного применения, их электронные расцепители позволяют гибко настроить ВТХ, обеспечив координацию с ВТХ нижестоящих аппаратов. Также встречаются и регулируемые терромагнитные (электромагнитические) расцепители, однако в них, как правило, отсутствует функция обеспечения кратковременной выдержки при КЗ.

В рамках проекта в качестве QF11 рекомендуется использовать **АВ в литом корпусе**, снабжённые **максимальными расцепителями тока** электронного типа. Электронные расцепители имеют ВТХ в виде кусочно-заданной зависимости, состав которой определяется набором функций, наиболее распространёнными из которых являются (рис. 2.11):

- **L** (от англ. *Long Time*). Обеспечивает расцепление с длительной задержкой, т.е. выполняет функцию **расцепителя сверхтока с обратно**

¹⁸В международной терминологии данное явление называется *instantaneous override*, дословно — «мгновенное переопределение» (переопределение настроек расцепителя мгновенным срабатыванием – прим. авт.).

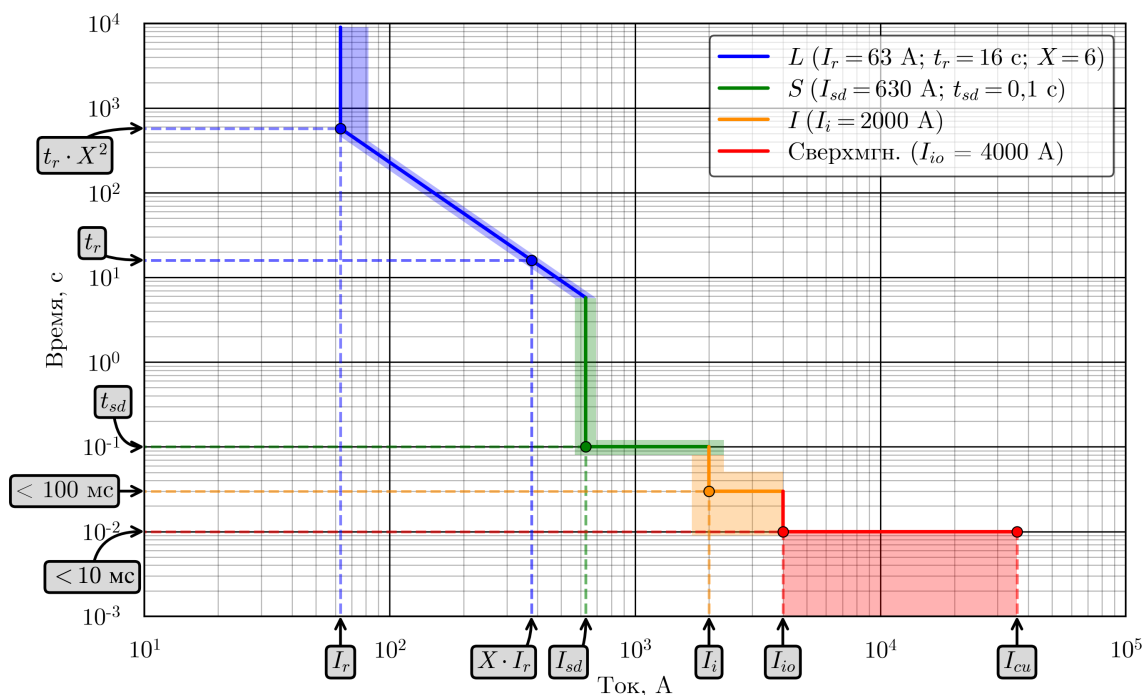


Рис. 2.11. Типовая ВТХ электронного расцепителя для АВ в литом корпусе категории селективности А

зависимой выдержкой времени. Если проводить аналогию с модульным АВ, то функция L — это аналог [теплового расцепителя перегрузки](#). ВТХ функции L настраивается при помощи регулирования уставки тока I_r и времени расцепления t_r при токе $X \cdot I_r$, где X — это коэффициент, приводящийся в технической документации на аппарат, типичные значения которого зависят от производителя и модели АВ (табл. 2.10).

Таблица 2.10

Типичные значения коэффициента X

Производитель	Значение X
<i>EKF AVERES</i>	6
<i>System Electric</i>	6
<i>Dekraft</i>	6
КЭАЗ <i>OptiMat D/T</i>	6/1,5
IEK <i>ARMAT/MASTER</i>	1,5/2

• I (от англ. *Instantaneous*). Обеспечивает мгновенное расцепление, т.е. выполняет функцию [расцепителя мгновенного действия](#). Используется для защиты от токов КЗ без кратковременной выдержки. Если проводить аналогию с модульным АВ, то функция I — это аналог

электромагнитного расцепителя. ВТХ функции I настраивается при помощи регулирования [уставки номинального мгновенного тока КЗ](#) I_i , время срабатывания не настраивается — электронный расцепитель в области действия функции I обеспечивает максимально быстрое отключение.

- S (от англ. *Short Time*). Обеспечивает расцепление с [кратковременной выдержкой](#), т.е. выполняет функцию [расцепителя защиты от КЗ с кратковременной задержкой](#). Задержка времени может быть независимой ($I^2t\ Off$) или обратнозависимой ($I^2t\ ON$) от протекающего тока. Аналогичной функции в модульных АВ нет, за исключением довольно редко встречающихся селективных исполнений. Функция S используется для защиты от КЗ в случае необходимости обеспечения временной селективности с нижестоящими устройствами защиты от сверхтоков. ВТХ функции S настраивается при помощи регулирования уставок [кратковременного тока срабатывания](#) I_{sd} и времени t_{sd} .

Важно отметить, что обозначения уставок I_r , t_r , I_{sd} , t_{sd} и I_i закреплены стандартом ГОСТ IEC 60947-2—2021, однако встречаются и альтернативные обозначения, например *IEK* для серии *ARMAT* использует обозначения для функции L I_{r1} , t_1 , $S - I_{r2}$, t_2 и $I - I_{r3}$.

В рамках проекта для *QF11* необходимы функции L и I , при этом возможно использование одного из двух вариантов расцепителей. .

1. LS/I — функция L неотключаемая, функции S и I являются взаимоисключающими, т. е. может быть включена либо функция S , либо I , а одновременное включение функций S и I невозможно.

2. LSI — функция L неотключаемая, функции S и I могут быть включены одновременно.

Расцепители АВ в литом корпусе зачастую являются взаимозаменяемыми, поэтому процесс подбора АВ подразделяется на два этапа.

1. Выбор типоразмера АВ в соответствии с требуемым номинальным током.

2. Подбор расцепителя, совместимого с выбранным ранее типоразмером АВ. Расцепитель должен обладать необходимым набором функций и диапазоном регулирования уставок. Важно отметить, что в некоторых случаях номинальный ток расцепителя может быть выбран меньше номинального длительного тока автоматического выключателя.

Критерии выбора АВ в литом корпусе

В рамках проекта необходимо, чтобы *QF11* соответствовал ряду критериев, согласно которым он должен обеспечивать следующее.

1. Работу в сети переменного тока с частотой 50 Гц.
2. Коммутацию определённого однолинейной схемой (рис. В1) числа проводников. $QF11$ разрывает фазные жилы кабеля КБ1, поэтому он должен иметь трёхполюсное исполнение $3P$.
3. Присоединение к своим выводам отходящего кабеля КБ1 с поперечным сечением жилы $q_{кб1}$. Для этого максимальное поперечное сечение присоединяемого проводника должно удовлетворять условию

$$q_{QF11} \geq q_{кб1}. \quad (2.41)$$

4. Работу в сети с заданным номинальным напряжением. АВ в литом корпусе как правило проходят испытания на работоспособность при различных напряжениях, поэтому производителем для них устанавливается несколько номинальных рабочих напряжений. В рамках проекта из них должно быть выбрано значение, наиболее близкое к линейному напряжению сети. В дальнейшем выбранное значение будет определять отключающую способность аппарата. Таким образом, для выполнения данного критерия должно выполняться условие

$$U_{e.QF11} \geq U_{n.T1}. \quad (2.42)$$

5. Длительное пропускание расчётного тока кабеля КБ1 $I_{B.кб1}$, для чего необходимо, чтобы номинальный ток¹⁹ удовлетворял условию

$$I_{n.QF11} \geq I_{B.кб1}. \quad (2.43)$$

6. Кратковременное протекание максимально возможного в защищаемой им линии тока КЗ $I_{к.QF11}^{\max}$ (таб. 1.3). Таким образом, необходимо, чтобы номинальная рабочая отключающая способность АВ удовлетворяла условию

$$I_{cs.QF11} \geq I_{к.QF11}^{\max}. \quad (2.44)$$

Для АВ в литом корпусе I_{cs} , как правило, приводится в процентах от номинальной предельной наибольшей отключающей способности I_{cu} .

¹⁹Также употребляются термины номинальный длительный ток I_u или условный тепловой ток на открытом воздухе I_{th} ГОСТ Р 50030.2-2010. пп. 4.3.2.3.

7. Длительное протекание расчётного тока кабеля КБ1 $I_{B.кб1}$, для чего необходимо, чтобы номинальный ток расцепителя $I_{n.QF11}^{рас}$ был не меньше расчётного тока кабеля $I_{B.кб1}$

$$I_{n.QF11}^{рас} \geq I_{B.кб1}. \quad (2.45)$$

8. Защиту кабеля КБ1 от перегрузки. Для этого необходимо чтобы АВ был снабжён электронным расцепителем с функцией L . Токовая уставка I_r функции L настраивается относительно номинального тока расцепителя $I_n^{рас}$. У электронных расцепителей [диапазон токовых уставок](#) обычно²⁰ составляет $I_r = (0,4...1) I_n^{рас}$. Выбор считается корректным, если длительно допустимый ток I_Z кабеля, защищаемого данным АВ попадает внутрь этого [диапазона токовых уставок](#)

$$I_{r.QF11} \leq I_{Z.кб1}. \quad (2.46)$$

9. [Селективность при сверхтоке](#) с нижестоящими аппаратами в области перегрузок. Данное требование выполняется, если ВТХ функции L у $QF11$ располагается выше ВТХ теплового реле $KK1$ с учётом допустимых отклонений. Другими словами, в области зоны перегрузок время срабатывания $QF11$ должно быть гарантированно больше, чем $KK1$. Время срабатывания $QF11$ в зоне функции L регулируется уставкой t_r . Однозначно в выполнимости данного критерия можно убедиться только при построении ВТХ аппаратов, что будет сделано в следующем разделе при создании карты селективности (раздел [2.11](#) на стр. [118](#)). На данном этапе можно только приблизительно оценить выполнимость данного критерия. Для этого сравнивается время срабатывания аппаратов при одинаковом токе:

KK1. ВТХ теплового реле приводится в технической документации. Однако, даже не обращаясь к ней известно, что [классам расцепления](#) 10 и 10 А соответствует время срабатывания не более 10 с при токе $7,2 \cdot I_{r.KK1}$. В этом значении времени уже учтено максимальное допустимое отклонение. Таким образом, координата точки ● на ВТХ $KK1$ ($7,2 \cdot I_{r.KK1}$; 10 с) как это показано на рис. [2.12](#).

QF1. ВТХ функции L обычно представляет собой зависимость $I^2t = \text{const}$.²¹ Значение этой константы зависит от уставки t_r . На

²⁰Указанный диапазон является типичным для большинства электронных расцепителей, однако рекомендуется уточнять его по технической документации на выбранный аппарат.

²¹У некоторых расцепителей в области малых перегрузок времена срабатывания могут быть немного больше, чем определённые по зависимости $I^2t = \text{const}$, однако при токе $7,2I_r$ они достаточно точно соответствуют $I^2t = \text{const}$.

ВТХ времени t_r соответствует ток $X \cdot I_r$, где безразмерный коэффициент X определяется по технической документации, его ориентировочное значение — по табл. 2.10.

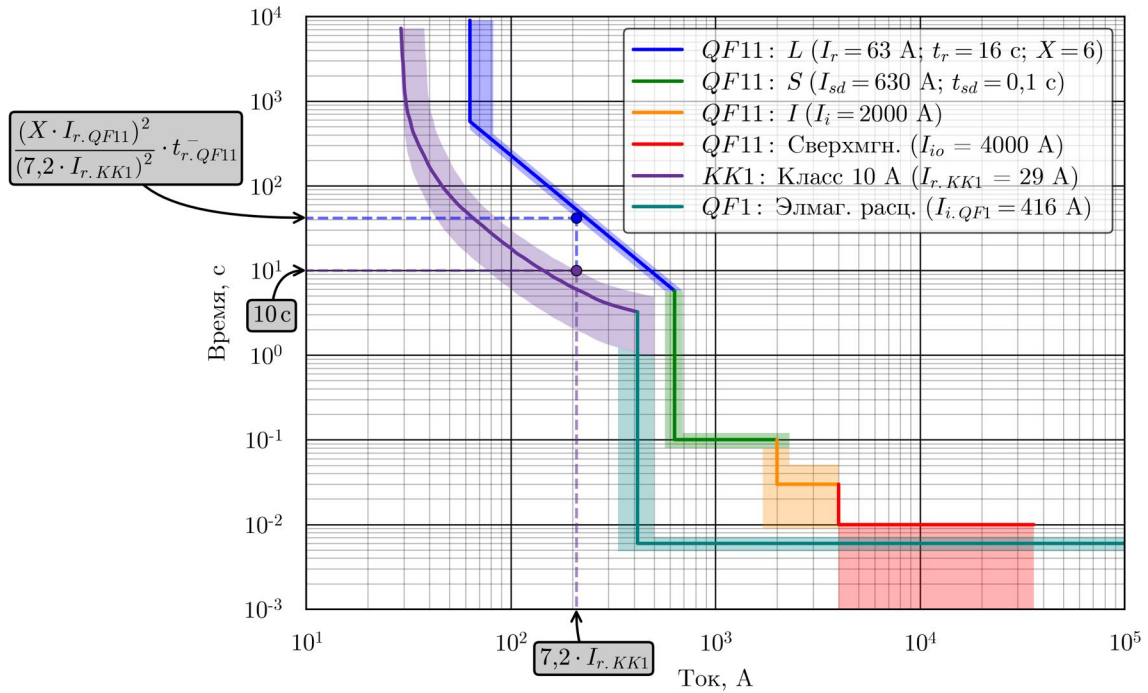


Рис. 2.12. Координация ВТХ $KK1$ и $QF1$ в области токов перегрузки

Таким образом для функции L справедливо $I^2 t = (X \cdot I_r)^2 t_r$, откуда время срабатывания при заданном токе I определяется как $t = (X \cdot I_r / I)^2 t_r$. Функция L имеет допустимые положительное δ_{tr}^+ и отрицательное δ_{tr}^- отклонения времени срабатывания. Нижняя и верхняя границы допустимых значений времени срабатывания при $X \cdot I_r$ определяются как

$$\begin{aligned}
 t_r^- &= (1 - \delta_{tr.QF11}^-) \cdot t_r, \\
 t_r^+ &= (1 + \delta_{tr.QF11}^+) \cdot t_r.
 \end{aligned}
 \tag{2.47}$$

Искомое минимально возможное время срабатывания функции L $QF11$ при токе $7,2 \cdot I_{r.KK1}$ с учётом допустимого отклонения составит

$$t_{QF11}^- \Big|_{I=7,2 \cdot I_{r.KK1}} = \left(\frac{X \cdot I_{r.QF11}}{7,2 \cdot I_{r.KK1}} \right)^2 \cdot t_{r.QF11}^-,
 \tag{2.48}$$

что даёт точку ● на ВТХ $QF11$, показанную на рис. 2.12. Критерий считается выполненным, если полученное таким образом время срабатывания $QF11$ больше 10 с в случае использования теплового реле класса 10 или 10А.

10. Селективность при сверхтоке с нижестоящими АВ в области КЗ. Необходимость данного критерия может быть проиллюстрирована на следующих примерах.

Пример 1. При возникновении КЗ на выводах $QF1$ со стороны питания (т.е. в конце кабеля КБ1 или в точке 1) возникает ток $I_{к1}$. Этот ток не протекает через $QF1$, так как место повреждения находится выше его по схеме электроснабжения, поэтому $QF1$ не реагирует на аварию. Учитывая, что $QS1$ не обладает защитой от сверхтоков, расцепление без длительной выдержки времени при значении тока $I_{к1}$ должен обеспечить ближайший вышестоящий АВ — $QF11$.

Пример 2. При возникновении КЗ на выводах $QF1$ со стороны нагрузки (т.е. в месте присоединения кабеля КБ2 к $QF1$) должно происходить мгновенное расцепление $QF1$. С точностью до сопротивления $QF1$ значение тока при такой аварии не отличается от предыдущего случая и равно $I_{к1}$. Однако теперь этот ток будет протекать не только через $QF11$, но и через $QF1$, так как место повреждения находится ниже $QF1$ по схеме электроснабжения. Срабатывание $QF11$ обесточит сразу всё НКУ, поэтому для надёжности электроснабжения необходимо, чтобы сработал АВ, наиболее близкий к месту повреждения, т.е. $QF1$, отключив только двигатель.

В итоге очевидно противоречие: в первом примере $QF11$ должен сработать при токе $I_{к1}$, а во втором — при таком же токе он сработать не должен. Решением в данных случаях является обеспечение между аппаратами временной, либо энергетической селективности.

Временная селективность между $QF1$ и $QF11$, принадлежащим к категории селективности А, может быть обеспечена при условии, что максимальный ток КЗ через $QF1$ менее тока самозащиты $QF11$ ($I_{к.QF1}^{\max} < I_{io.QF11}$) и основана на задании **кратковременной выдержки** для $QF11$ при протекании через него токов КЗ в точке 1. При КЗ в точке 1 время срабатывания $QF11$ будет больше, чем $QF1$. Таким образом, $QF11$ сработает только в том случае, если $QF1$ не сработает, например, из-за того, что место повреждения расположено выше его по схеме. Селективность в данном случае обеспечена за счёт разницы времён срабатывания.

Визуальное пояснение принципа организации временной селективности между $QF11$ и $QF1$ представлено на рис. 2.13. Для настройки **кратковременной выдержки** у электронного расцепителя $QF11$ должна быть активирована функция S (—). Функция S имеет возможность настройки токовой уставки $I_{sd.QF11}$ и временной $t_{sd.QF11}$. Номинальное значение нижней токовой границы действия функции S определено уставкой $I_{sd.QF11}$, а верхнее — либо уставкой $I_{i.QF11}$ функции I (—),

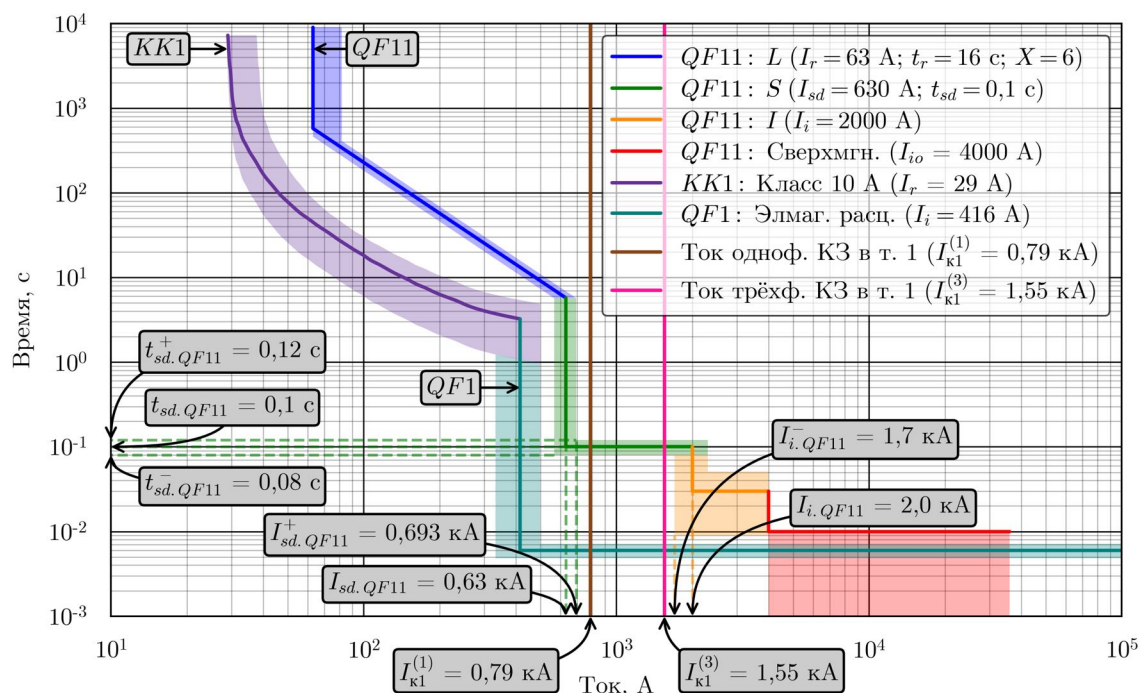


Рис. 2.13. Координация ВТХ $QF1$ и $QF11$ в области токов КЗ (допустимые предельные отклонения настроек $QF11$ для уставок I_{sd} и $t_{sd} \pm 20\%$; для $I_i \pm 15\%$)

либо током самозащиты $I_{io, QF11}$ (—), в случае если функция I отключена. Таким образом, временная селективность между $QF1$ и $QF11$ обеспечена, если токи КЗ в точке 1, будучи в диапазоне от $I_{k1}^{(1)}$ до $I_{k1}^{(3)}$, находятся в зоне действия функции S (—) расцепителя $QF11$ ²². При этом при токах от $I_{k1}^{(1)}$ до $I_{k1}^{(3)}$ должен быть обеспечен запас минимум в 50 мс во времени срабатывания между $QF1$ и $QF11$. На практике требования временной селективности выражаются в выполнении следующих трёх условий:

- 10а.** Обращаясь к рис. 2.13, минимальный ток КЗ в точке 1, равный $I_{k1}^{(1)}$ (—), должен гарантированно попадать в зону действия функции S (—). Значение токовой уставки функции S имеет допустимые положительные $\delta_{I_{sd}}^+$ и отрицательные отклонения $\delta_{I_{sd}}^-$, которые по стандарту составляют не более 20%. Таким образом, нижняя и верхняя граница

²²Ранее на стр. 47 было показано, что ток однофазного КЗ в точке 1 — это минимальный ток КЗ, который может протекать через $QF11$, а ток трёхфазного КЗ в точке 1 — это максимальный ток КЗ, который может протекать через $QF1$. Поэтому на практике для обеспечения временной селективности можно пользоваться правилом: функция S расцепителя АВ должна действовать от его минимального тока КЗ и до максимального тока КЗ ближайшего нижестоящего АВ с учётом допустимых отклонений.

допустимых значений I_{sd} определяются как

$$I_{sd}^{-} = (1 - \delta_{I_{sd}}^{-}) I_{sd},$$

$$I_{sd}^{+} = (1 + \delta_{I_{sd}}^{+}) I_{sd}.$$

Напомним, что токи от I_{sd}^{+} гарантированно попадают в зону функции S , а токи по I_{sd}^{-} — не попадают. Таким образом, условие гарантированного отключения $I_{к1}^{(1)}$ при помощи функции S расцепителя $QF11$ записывается как

$$I_{sd.QF11}^{+} \leq I_{к1}^{(1)}. \quad (2.49)$$

106. Обращаясь к рис. 2.13, максимальный ток КЗ в точке 1, равный $I_{к1}^{(3)}$ (—), должен гарантированно попадать в зону действия функции S (—) расцепителя $QF11$. При этом токи выше $I_{к1}^{(3)}$ могут возникать, только если место повреждения выше точки 1, и поэтому они не протекают через $QF1$. По этой причине при таких токах $QF1$ принципиально не может сработать, поэтому аппарату $QF11$ уже нет смысла «ждать» срабатывания $QF1$. В итоге при токах более $I_{к1}^{(3)}$ кратковременная выдержка времени от $QF11$ уже не только не имеет смысла, но и даже вредна из-за увеличения времени воздействия тока КЗ на аппарат и систему в целом.

В связи с этим необходимо настроить токовую уставку мгновенного расщепления I_i функции I (—) так, чтобы токи более $I_{к1}^{(3)}$ попадали в зону её действия и, таким образом, отключались без выдержки времени. Как и в случае с другими уставками, I_i имеет допустимые положительное $\delta_{I_i}^{+}$ и отрицательное $\delta_{I_i}^{-}$ отклонения, которые по стандарту составляют не более 20 %.

Получается, что токи более $I_{к1}^{(3)}$ должны попадать в зону действия функции I , но, с другой стороны, все токи КЗ в точке 1 должны попадать в зону действия функции S по условию временной селективности. Учитывая допустимое отклонение функции I , одновременно обеспечить оба эти условия невозможно, поэтому приоритет отдаётся первому, так как он обеспечивает надёжность электроснабжения. Таким образом, токи до $I_{к1}^{(3)}$ включительно должны гарантированно попадать в зону действия функции S (—) или, другими словами, гарантированно не попадать в зону действия функции I (—). При этом токи несколько больше $I_{к1}^{(3)}$ должны попадать в зону функции I , что с учётом допустимого отклонения выражается следующим образом

$$I_{i.QF11}^- > I_{k1}^{(3)}, \quad (2.50)$$

при этом не следует выбирать слишком высокие значения уставки $I_{i.QF11}$, достаточно, чтобы она была на 20...30 % больше, чем $I_{k1}^{(3)}$.

10в. Настройка **кратковременной выдержки** должна обеспечивать разницу во времени срабатывания между $QF1$ и $QF11$ при любых токах КЗ в точке 1 более 50 мс с учётом допустимого отклонения временной уставки функции S — δ_{tsd}^- (рис. 2.13).

Нижестоящий аппарат $QF1$ имеет электромагнитный расцепитель, у которого нет **кратковременной выдержки** — он срабатывает настолько быстро, как может. Время срабатывания расцепителя мгновенного действия (электромагнитного расцепителя или функции I электронного расцепителя), как правило, напрямую в технической документации не приводится. Его можно определить по ВТХ, где оно отображается как верхняя граница допустимых отклонений времени срабатывания, или воспользоваться следующим **правилом**: если нижестоящий АВ не имеет кратковременной выдержки при токе КЗ, как в случае с $QF1$, то требуемая разница во временах срабатывания достигается при условии

$$\begin{aligned} t_{sd.QF11} &\geq 100 \text{ мс при } I^2t = Off, \\ t_{sd.QF11} &\geq 150 \text{ мс при } I^2t = On, \end{aligned} \quad (2.51)$$

для независимой и обратнoзависимой выдержки времени функции S , соответственно.

Энергетическая селективность может быть обеспечена при $I_{к.QF1}^{\max} > I_{io}$ и основана на разнице во временах срабатывания в зоне электродинамического отброса контактов (зона самозащиты/токоограничения). **Токоограничивающими** являются все модульные АВ, большинство АВ в литом корпусе, а также АВ защиты двигателя.

Выше на стр. 90 было отмечено, что кратковременная выдержка для АВ в литом корпусе может быть установлена только до тока уставки сверхмгновенного расцепителя I_{io} (тока самозащиты), значение которой зависит от типоразмера выключателя и особенностей конструкции его контактной системы. При токе более I_{io} активируется процесс токоограничения за счёт сверхмгновенного отключения за время менее 10 мс, за которое ток КЗ просто не успевает достигнуть своего пикового значения и тем самым ограничивается.

Так как ток I_{io} для АВ в литом корпусе значительно меньше предельной номинальной отключающей способности I_{cu} , то в некото-

рых случаях токи КЗ в точке 1 могут оказаться больше I_{io} , т.е. в зоне токоограничения. При этом если ток КЗ находится в зоне токоограничения $QF11$, то он с большой вероятностью находится и в зоне токоограничения и $QF1$. Это связано с тем, что $QF1$ обладает меньшим типоразмером и поэтому имеет менее массивную контактную систему, а значит и самозащита активируется при меньшем токе. За счёт этого он сильнее ограничивает сквозную энергию (I^2t), чем $QF11$. Откуда следует, что при одинаковом токе время отключения $QF11$ больше, чем $QF1$. Таким образом, оба АВ срабатывают за время менее 10 мс, однако, несмотря на существующую разницу во временах срабатывания порядка нескольких миллисекунд, о временной селективности речь не идет, так как это разница менее 50 мс.

При разнице во временах срабатывания в зоне токоограничения (самозащиты) говорят об энергетической селективности. Времена срабатывания АВ в зоне токов от I_{io} до I_{cu} настолько малы, что существующая разница между ними в несколько миллисекунд недостаточна для однозначного вывода о их селективной работе. При временной селективности вышестоящий выключатель «ждёт» в течение заданной кратковременной выдержки, не начиная срабатывать, что позволяет сделать однозначный вывод о селективной работе на основе разницы во временах отключения. При энергетической селективности оба АВ начинают срабатывать, но нижестоящий срабатывает быстрее, не давая завершиться процессу отключения вышестоящего, поэтому имеющаяся разница во временах срабатывания порядка нескольких миллисекунд еще не гарантирует что вышестоящий АВ не перейдет в зону необратимого отключения. В связи со сложностью проходящих процессов, селективная работа пары аппаратов в зоне энергетической селективности проверяется экспериментально производителем. Результаты этих испытаний приводятся в таблицах координации, из которых можно определить селективна ли работа данной пары АВ при известном токе КЗ большим, чем I_{io} .

11. Защиту выключателя-разъединителя $QS1$ от термического воздействия тока КЗ на его выводах. Максимальный ток КЗ, который может протекать через $QS1$, равен $I_{k1}^{(3)}$. Поскольку выключатель-разъединитель не обладает защитными функциями, этот ток должен быть отключен вышестоящим аппаратом $QF11$. Принципиально возможны два случая.

11a. Случай 1: между $QF1$ и $QF11$ полная временная селективность или $I_{k1}^{(3)} < I_{io.QF11}$. Другими словами, ток $I_{k1}^{(3)}$ попадает в зону действия функции S аппарата $QF11$, т.е. у него установлена кратковременная

выдержка $t_{sd.QF11}$ как раз на этот ток. В таком случае необходимо проверить, не слишком ли большая эта выдержка для $QS1$, т.е. может ли $QS1$ выдержать ток $I_{к1}^{(3)}$ в течение времени $t_{sd.QF11}$. Как и любая установка, $t_{sd.QF11}$ имеет допустимые положительное δ_{tsd}^+ и отрицательное δ_{tsd}^- отклонения. В наихудшем случае реальное время срабатывания может достигать значения $t_{sd}^+ = (1 + \delta_{tsd}^+) \cdot t_{sd}$. Среди параметров выключателя-разъединителя в каталогах приводится **номинальный кратковременно выдерживаемый ток** I_{cw} . Если иного не указано, то приведённое в документации значение I_{cw} аппарат может безопасно пропускать через себя в течение $t_{cw} = 1 \text{ с}$ ²³. В проекте через $QS1$ будет протекать ток не I_{cw} , а максимально возможный ток в месте его установки — $I_{к1}^{(3)}$. Соответственно, допустимое время $t_{к.QS1}^{\max}$ протекания этого тока будет отличаться от 1 с. Так как это время в любом случае мало по сравнению с тепловой постоянной времени, то можем считать процесс адиабатическим (без теплообмена с окружающей средой) и провести расчёт при помощи интеграла Джоуля. Суть расчёта заключается в том, что произведение квадрата тока на время не должно превышать нормированного производителем значения $I_{cw}^2 \cdot t_{cw}$

$$\left(I_{к1}^{(3)}\right)^2 t_{к.QS1}^{\max} = (I_{cw.QS1})^2 t_{cw.QS1}.$$

Таким образом, максимально допустимое время протекания тока $I_{к1}^{(3)}$ через $QS1$

$$t_{к.QS1}^{\max} = \left(\frac{I_{cw.QS1}}{I_{к1}^{(3)}}\right)^2 t_{cw.QS1}. \quad (2.52)$$

В результате данный критерий сводится к условию

$$t_{sd.QF11}^+ \leq t_{к.QS1}^{\max}. \quad (2.53)$$

116. Случай 2: между $QF1$ и $QF11$ энергетическая селективность или $I_{к1}^{(3)} \geq I_{io.QF11}$. Другими словами, ток $I_{к1}^{(3)}$ настолько высок, что находится вне зоны действия функции S аппарата $QF11$, а в области токоограничения. В таком случае $QF11$ срабатывает без выдержки времени. Одним из параметров выключателя-разъединителя является **номинальный условный ток КЗ** I_q . Фактически это максимальное допустимое значение тока КЗ через выключатель-разъединитель в том случае,

²³ГОСТ IEC 60947-3—2022 пп. 5.3.7.1.



Рис. 2.14. АВ в литом корпусе Систэм Электрик *QF11* $I_n = 100$ А *SPC160F16052E3DF* [8]

если он защищен вышестоящим АВ, не имеющим кратковременной выдержки при этом токе. В результате данный критерий сводится к условию

$$I_{q.QS11} \geq I_{k1}^{(3)}. \quad (2.54)$$

Пример 2.9 Выбор *QF11*

Для рассматриваемой схемы электроснабжения в качестве *QF11* по каталогу [8] выбран АВ в литом корпусе производителя «Систэм Электрик» *SystemePact CCB160* с номинальным током 160 А, с электронным расцепителем *SystemeLogic 5.2E* с номинальным током 160 А. Артикул аппарата *SPC160F16052E3DFC*. Проверка его соответствия критериям выбора приведена в табл. 2.3, а внешний вид аппарата — на рис. 2.14.

Проверка соответствия $QF11$ критериям выбора

№	Параметры системы в месте установки аппарата	Усл.	Параметры аппарата
1	Род тока	AC	$=$ Род тока AC
2	Число коммутируемых проводников	3	$=$ Количество полюсов $3P$
3	Сечение отходящего кабеля $q_{кб1}$, мм ²	16	$=$ Максимальное сечение присоединяемого проводника, мм ² 120
4	Коммутируемое напряжение, В	400	$\geq$ Номинальное рабочее напряжение $U_{e.QF11}$, В 415
5	Расчётный ток линии $I_{B.кб1}$, А	47,3	$\leq$ Номинальный ток, $I_{n.QF11}$, А 160
6	Максимальный ток КЗ $I_{к.QF11}^{\max}$, кА	15,61	$\leq$ Номинальная рабочая наибольшая отключающая способность $I_{cs.QF11}$ при $U_{e.QF11}$, кА 36 ¹
7	Расчётный ток линии $I_{B.кб1}$, А	47,3	$\leq$ Номинальный ток, $I_{n.QF11}^{\text{рас}}$, А 160
8	Длительно допустимый ток кабеля $I_{Z.кб1}$, А	64	$\geq$ Уставка $I_{r.QF11}$ функции L 63 ²
9	Макс. время срабатывания $KK1$ при $7,2 \cdot I_{r.KK1}$, с	10 ³	$<$ Мин. время сраб. $QF11$ при $7,2 \cdot I_{r.KK1}$, с 26 ⁴
10a	Мин. ток КЗ в точке установки нижестоящего АВ $I_{к1}^{(1)}$, кА	0,77	$\geq$ Верхняя граница допустимых значений токовой уставки функции S $I_{sd.QF11}^+$, кА 0,69 ⁵

№	Параметры системы в месте установки аппарата	Усл.	Параметры аппарата
10б	Макс. ток КЗ в точке установки нижестоящего АВ $I_{к1}^{(3)}$, кА	1,55 ≤	Нижняя граница допустимых значений уставки тока функции I $I_{i.QF11}^-$, кА
10в	Кратковременная выдержка в области токов КЗ нижестоящего АВ $QF1$	Нет ⇒	Уставка времени функции $S t_{sd}$, с при $I^2t = Off$
11а	Допустимое время протекания тока КЗ через $QS1$ по формуле (2.52) $t_{к.QS1}^{max}$, с	0,97 ⁶ ≥	Верхняя граница допустимых значений уставки времени функции S t_{sd}^+ , с при $I^2t = Off$

¹В соответствии с каталожным номером $SPC160F16052E3DF$ исполнение по отключающей способности F , что соответствует $I_{cs.QF11} = 36$ кА при номинальном рабочем напряжении $U_{e.QF11} = 415$ В.

²Согласно каталогу поворотный регулятор уставки I_r расцепителя *SystemeLogic* 5.2E имеет деления 63, 70, 80, 90, 100, 110, 125, 150, 160 А, а также настройку в пределах диапазона 62...160 А с точностью 1 А при помощи клавиатуры и встроенного дисплея.

³Класс расцепления ранее выбранного теплового реле 10 А (табл. 2.6). В таблицу вносится числовая составляющая обозначения класса расцепления, соответствующая времени расцепления в секундах при токе $7,2 \cdot I_r \cdot KK1$.

⁴Согласно каталогу, расцепитель *SystemeLogic* 5.2E позволяет устанавливать t_r из ряда 0,5, 1, 2, 4, 8, 16 с. Выбрана уставка $t_r = 8$ с. Согласно каталогу, данное время соответствует току $6 \cdot I_r$, откуда $X = 6$. Допустимое отклонение t_r по каталогу 0...20 %, поэтому $\delta_{tr}^- = 0$. Учитывая ранее выбранную уставку тока теплового реле $I_{r.KK1} = 29$ А (табл. 2.6), по формуле (2.48) получаем время $t = (6 \cdot 63 / (7,2 \cdot 29))^2 \cdot 8 = 26$ с.

⁵Согласно каталогу I_{sd} настраивается указанием коэффициента кратности относительно ранее выбранной уставки I_r . Поворотный регулятор расцепителя позволяет выполнить настройку $I_{sd} = I_r \cdot (1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 10)$, при помощи клавиатуры — в пределах того же диапазона, но с шагом $0,5 \cdot I_r$. Выбираем кратность уставки 10, откуда $I_{sd} = I_r \cdot 10 = 630$ А. Учитывая указанное в каталоге допустимое отклонение $\delta_{Isd} = \pm 10\%$, в таблицу вносится $I_{sd}^+ = (1 + \delta_{Isd}^+) \cdot I_{sd} = (1 + 0,1) \cdot 630 = 693$ А.

⁶Согласно каталогу, ток I_{io} начала токоограничения для типоразмера $CCB160$ около $I_{io} = 3,8$ кА, что меньше, чем $I_{к.QF1}^{max} = 1,55$ кА, поэтому необходимо рассчитать допустимое время в соответствии с критерием 11а. Номинальный кратковременно выдерживаемый ток для выбранной ранее модели $QS1$, согласно каталогу [7], составляет $I_{cw.QS1} = 1,5$ кА. Допустимое время протекания тока КЗ через $QS1$ по формуле (2.52) составит $t_{к}^{max} = (I_{cw.QS1} / I_{к1}^{(3)})^2 \cdot t_{cw.QS1} = (1500 / 1550)^2 \cdot 1 = 0,97$ с.

⁷Согласно каталогу, у расцепителя доступны уставки t_{sd} из ряда 0; 0,1; 0,2; 0,4 с. Выбрана уставка $t_{sd} = 0,1$ с. Требуемое значение δ_{tsd}^+ не задано. Вместо этого напрямую задано максимальное время срабатывания в зоне функции S при $I^2t = Off$, которое составляет $t_{sd}^+ = 140$ мс.

⁸Согласно каталогу, уставка I_i настраивается с шагом $0,5 \cdot I_n = 80$ А в диапазоне от $(1,5 \dots 15) \cdot I_n = 240 \dots 2400$ А. Выбираем значение $I_i = 2000$ А. Учитывая указанное в каталоге допустимое отклонение $\delta_{I_i} = \pm 15\%$, в таблицу вносится значение $I_i^- = (1 - \delta_{I_i}^-) = (1 - 0,15) \cdot 2000 = 1700$ А.

2.10. Воздушный автоматический выключатель QF10

Согласно стандарту²⁴, термин «воздушный АВ²⁵» определяет лишь, что главные контакты выключателя находятся в воздухе при атмосферном давлении. Согласно этому строгому определению, абсолютное большинство АВ низкого напряжения общего применения являются воздушными, в том числе рассмотренные ранее АВ в литом корпусе и модульные АВ. Однако, как и в случае с АВ в литом корпусе, на практике сложилось более узкое понимание воздушного АВ. В каталогах производителей воздушный АВ — это силовой АВ, имеющий категорию селективности B . Типичные значения номинальных токов от 630 до 6300 А и отключающей способности до 150 кА. АВ категории селективности B специально предназначены для обеспечения временной селективности в широком диапазоне токов. Они сконструированы так, чтобы выдерживать воздействие высоких токов КЗ в течение заданной кратковременной выдержки. По этой причине для АВ категории селективности B нормируется номинальный кратковременно выдерживаемый ток I_{cw} , до которого аппарат гарантированно сохраняет контакты в замкнутом состоянии в течение кратковременной выдержки, не повреждаясь термически и электродинамически. Если АВ относится к категории селективности B , то его I_{cw} составляет не менее 5 кА или $12I_n$, если последнее больше 5 кА. Встречаются модели воздушных АВ, у которых $I_{cw} = I_{cu}$, т.е. временная селективность может быть обеспечена для всех токов вплоть до отключающей способности аппарата.

Воздушный АВ имеет металлический каркас, в отличие от АВ в литом корпусе, у которого в его роли выступает пластиковый корпус. Такая конструктивная особенность делает воздушные АВ более

²⁴ГОСТ IEC 60050-441—2015, пп. 441-14-27.

²⁵В технической документации встречается международная аббревиатура ACB от англ. *Air Circuit Breaker*.

прочными по сравнению с АВ в литом корпусе и, как следствие, позволяет им пропускать через себя большие токи КЗ и выдерживать их воздействие в течение [кратковременной выдержки](#).

Если обратиться к каталогу любого производителя, то можно заметить, что несмотря на описанные конструктивные преимущества воздушного АВ, его отключающая способность I_{cu} примерно такая же, как и для АВ в литом корпусе меньшего типоразмера, а иногда даже ниже. Это объясняется тем, что заявленное значение тока I_{cu} — это действующее значение ожидаемого тока КЗ, который протекал бы в цепи не будучи отключенным ни одним АВ. Ключевой особенностью типичного АВ в литом корпусе категории селективности *B* является наличие токоограничения при относительно малых токах, за счёт чего ток КЗ не достигает своего высокого ожидаемого значения. Таким образом, в действительности АВ в литом корпусе отключает не заявленное значение I_{cu} , а значительно меньший ток, не превышающий значения [тока отсечки](#), который значительно ниже I_{cu} . Однако при этом такой аппарат может быть установлен в точку системы с ожидаемым значением тока КЗ со значением вплоть до I_{cu} .

В то же время типичный воздушный АВ либо вовсе не имеет токоограничения, либо имеет высокое значение I_{cw} , до которого оно не активируется. Более того, воздушные АВ позволяют устанавливать [кратковременную выдержку](#) длительностью в несколько десятков полупериодов тока вплоть до высоких значений I_{cw} . За время этой выдержки ток КЗ, проходящий через АВ, достигает своего ударного значения и оказывает значительное термическое и электродинамическое воздействие на аппарат. Как известно, при самой неблагоприятной фазе коммутации мгновенное значение переходящего тока КЗ может быть до $2\sqrt{2}$ раз больше, чем установившееся значение ожидаемого тока КЗ, и воздействие такого тока должен выдерживать воздушный АВ.

Таким образом, на практике типичный воздушный АВ не только реально пропускает через себя ожидаемое значение тока КЗ вплоть до I_{cw} , но и может принудительно держать его в течение кратковременной выдержки времени. При этом значение I_{cw} относительно высоко, более $\max 12I_n; 5 \text{ кА}$, а у некоторых современных моделей I_{cw} зачастую приближается к предельной отключающей способности I_{cu} . В то же время реально коммутируемый ток типичного токоограничивающего АВ в литом корпусе ограничен значением его [тока отсечки](#), которое, как правило, почти на порядок ниже его заявленной I_{cu} . При этом АВ в литом корпусе может справиться с ожидаемым током вплоть до I_{cu} , но помогая себе, задействуя внутренний механизм токоограничения.

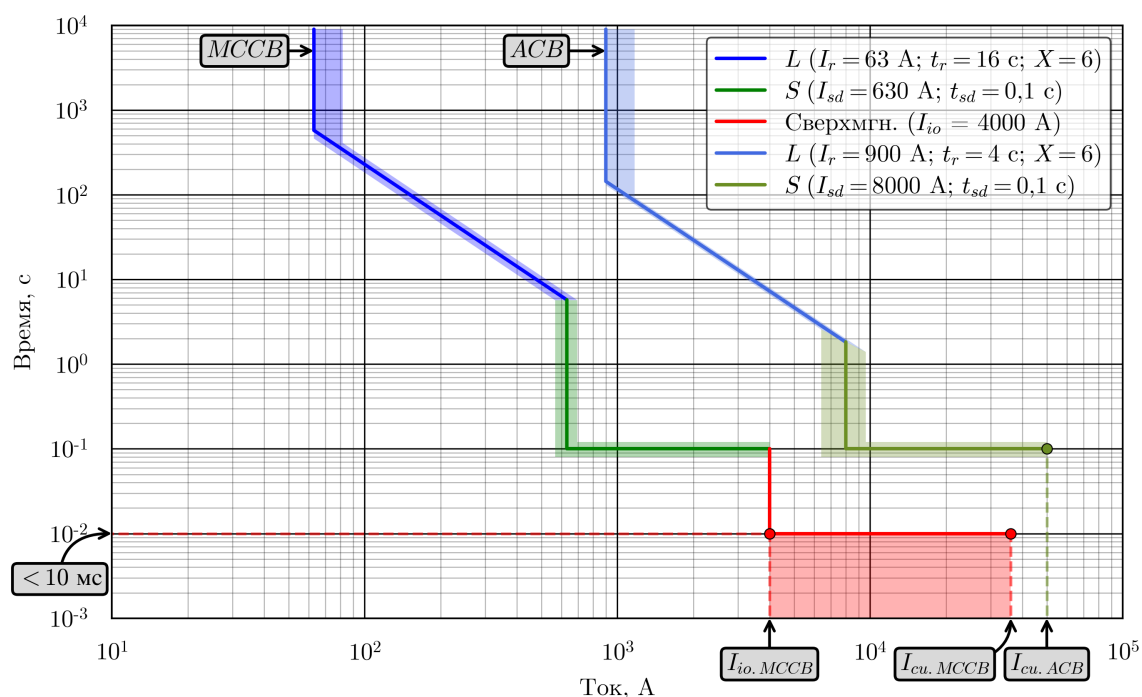


Рис. 2.15. Типичные время-токовые характеристики АВ в литом корпусе (*MCCB*) и воздушного АВ (*ACB*) с электронными расцепителями

Современные воздушные АВ снабжаются исключительно электронными расцепителями с минимальным набором функций L , S и I . На рис. 2.15 показаны типичные ВТХ АВ в литом корпусе (*MCCB*) и воздушного АВ (*ACB*). Далее в целях упрощения рассматривается случай, когда $I_{cw} = I_{cu}$, т.е. функция S воздушного АВ действует вплоть до отключающей способности $I_{cu.ACB}$. За счёт отсутствия токоограничения вплоть до $I_{cu.ACB}$ воздушный АВ позволяет задать кратковременную выдержку, которая действует не до $I_{io.MCCB}$, как в случае с АВ в литом корпусе, а вплоть до $I_{cu.ACB}$ и этим обеспечивает более широкие возможности по обеспечению временной селективности с нижестоящими АВ.

Подытоживая вышесказанное, на практике в подавляющем большинстве случаев можно считать, что типичный АВ в литом корпусе — это токоограничивающий аппарат категории селективности A на ток до 630 А, в котором временная селективность может быть обеспечена только до относительно малых токов КЗ; типичный воздушный АВ — это аппарат без токоограничения категории селективности B на ток до 6300 А, в котором временная селективность может быть обеспечена до значительно больших токов КЗ. Однако здесь важно отметить, что в редких случаях встречаются модели АВ в литом корпусе категории селективности B , а также воздушные АВ с токоограничением, и это не противоречит действующим стандартам. Такие устройства как пра-

вило встречаются на границе номинальных токов между АВ в литом корпусе и воздушными АВ, обычно в диапазоне 800...1600 А.

Критерии выбора воздушного АВ

В рамках проекта необходимо, чтобы $QF10$ соответствовал ряду критериев, согласно которым он должен обеспечивать следующее.

1. Работу в сети переменного тока с частотой 50 Гц.
2. Коммутацию определённого однолинейной схемой числа проводников (рис. В1).
3. Работу в сети с заданным номинальным напряжением. Как и рассмотренные ранее АВ в литом корпусе, воздушные АВ, как правило, проверяются на работоспособность при разных напряжениях, поэтому производителем для каждой модели аппарата устанавливается несколько **номинальных рабочих напряжений**. В рамках проекта должно быть выбрано значение, наиболее близкое к линейному напряжению сети. В дальнейшем от выбранного значения будет зависеть отключающая способность аппарата. Таким образом, для выполнения данного критерия должно выполняться условие

$$U_{e.QF10} \geq U_{n.T1}. \quad (2.55)$$

4. Длительное пропускание номинального тока трансформатора $I_{n.T1}$, для чего необходимо, чтобы **номинальный ток**²⁶ удовлетворял условию

$$I_{n.QF10} \geq I_{n.T1}. \quad (2.56)$$

5. Кратковременное протекание максимально возможного в месте его установки тока КЗ. Для $QF10$ наиболее тяжёлым режимом является возникновение однофазного КЗ непосредственно на его выводах со стороны нагрузки, т.е. в точке 0. В этом случае ожидаемый ток КЗ, протекающий через $QF10$, принимает максимально возможное в данной схеме значение $I_{к.QF10}^{\max}$ (табл. 1.3). Таким образом, необходимо, чтобы номинальная рабочая наибольшая отключающая способность удовлетворяла условию

$$I_{cs.QF10} \geq I_{к.QF10}^{\max}. \quad (2.57)$$

²⁶Также употребляются термины номинальный длительный ток I_u или условный тепловой ток на открытом воздухе I_{th} [ГОСТ Р 50030.2–2010. пп. 4.3.2.3.](#)

Для воздушных АВ $I_{cs.QF10}$, как правило, приводится в процентах от номинальной предельной наибольшей отключающей способности $I_{cu.QF10}$.

- 6.** Длительное протекание номинального тока трансформатора $I_{n.T1}$, для чего необходимо, чтобы **номинальный ток** расцепителя удовлетворял условию

$$I_{n.QF10}^{\text{рас}} \geq I_{n.T1}. \quad (2.58)$$

- 7.** Защиту вторичной обмотки трансформатора от перегрузки. Для этого необходимо подобрать электронный расцепитель с функцией L . Токовая уставка I_r функции L настраивается относительно номинального тока расцепителя $I_n^{\text{рас}}$. У электронных расцепителей **диапазон токовых уставок**, как правило²⁷, определяется как $I_r = (0,4...1) I_n^{\text{рас}}$. Таким образом, токовая уставка функции L настраивается исходя из условия

$$I_{r.QF11} \leq I_{n.T1}. \quad (2.59)$$

- 8.** **Селективность при сверхтоке** в области перегрузок с нижестоящим АВ $QF11$. Данное требование выполняется, если ВТХ функции L $QF10$ не пересекается и располагается выше ВТХ $QF11$ с учётом допустимых отклонений. Другими словами, в области зоны перегрузок время срабатывания $QF10$ должно быть гарантированно больше, чем $QF11$. Время срабатывания $QF10$ в зоне функции L регулируется уставкой t_r . Однозначно в выполнимости данного критерия можно убедиться только при построении ВТХ аппаратов, что будет сделано в следующем разделе при создании карты селективности (раздел 2.11 на стр. 118). Сейчас же, на этапе выбора аппарата, можно только приблизительно оценить выполнимость данного критерия. Для этого сравнивается время срабатывания функции L у $QF10$ и $QF11$ при одинаковом токе.

QF11. Максимальное допустимое время срабатывания функции L при токе $X_{QF11} \cdot I_{r.QF11}$ с учётом допустимого отклонения составляет

$$t_{r.QF11}^+ = (1 + \delta_{tr.QF11}^+) \cdot t_{r.QF11}, \quad (2.60)$$

что даёт точку ● на ВТХ $QF11$ на рис. 2.16.

QF10. ВТХ функции L у воздушных АВ, как и у АВ в литом корпусе, как правило, представляет собой зависимость $I^2 t = \text{const}$. Зна-

²⁷Указанный диапазон является типичным для большинства электронных расцепителей, однако рекомендуется уточнять его по технической документации на выбранный аппарат.

чение константы зависит от уставки t_{QF10} . На ВТХ времени $t_{r.QF10}$ соответствует ток $X_{QF10} \cdot I_{r.QF10}$, где безразмерный коэффициент X_{QF10} определяется по технической документации или ориентировочно по табл. 2.10. Таким образом, для функции L аппарата $QF10$ справедливо $I^2 t = (X_{QF10} \cdot I_{r.QF10})^2 t_{r.QF10}$, откуда время срабатывания при некотором токе I определяется как $t = (X_{QF10} \cdot I_{r.QF10} / I)^2 t_{r.QF10}$. Временная уставка функции t_r имеет допустимые положительное δ_{tr}^+ и отрицательное δ_{tr}^- отклонение времени срабатывания. Нижняя граница допустимых значений $t_r^- = (1 - \delta_{tr}^-) \cdot t_r$, что составляет минимально допустимое время срабатывания $QF10$ при токе $X_{QF10} \cdot I_{r.QF10}$. Откуда искомое минимально возможное время срабатывания $QF10$ при токе значением $X_{QF11} \cdot I_{r.QF11}$ с учётом допустимого отклонения составит

$$t_{QF10}^- \Big|_{I=X_{QF11} \cdot I_{r.QF11}} = \left(\frac{X_{QF10} \cdot I_{r.QF10}}{X_{QF11} \cdot I_{r.QF11}} \right)^2 \cdot t_{r.QF10}^-, \quad (2.61)$$

что даёт точку ● на условном продолжении ВТХ $QF10$, показанную на рис. 2.16.

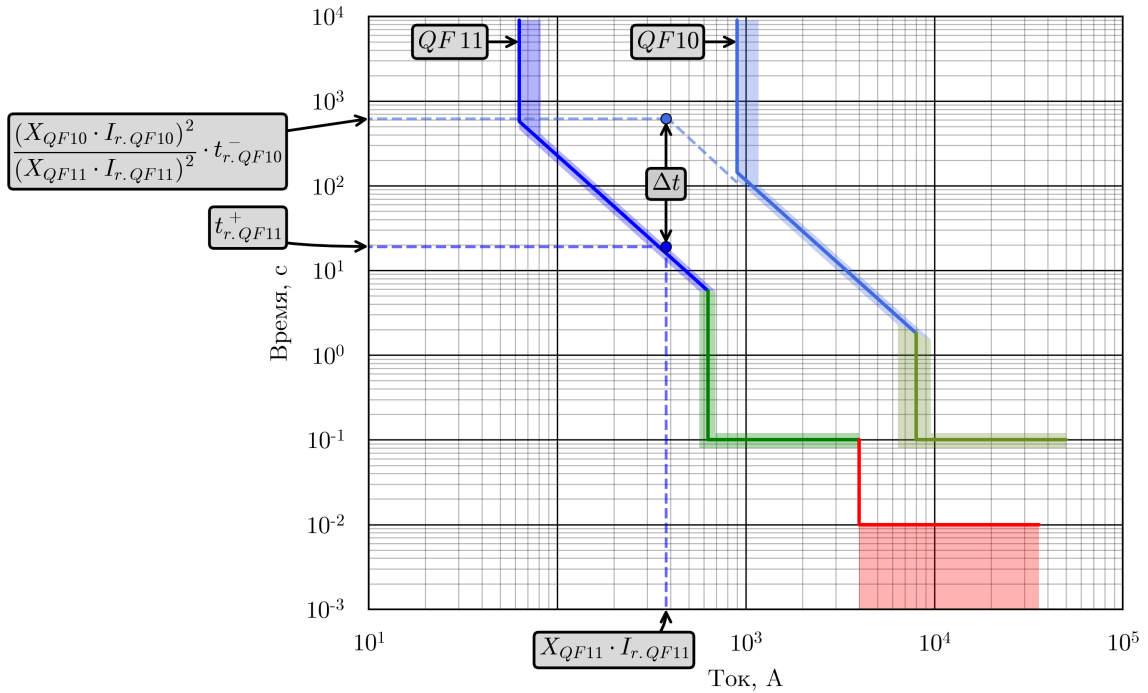


Рис. 2.16. Координация ВТХ $QF10$ и $QF11$ в области токов перегрузки

Важно отметить, что зачастую ток $X_{QF11} \cdot I_{r.QF11}$ оказывается меньше уставки $I_{r.QF10}$, как это показано на рис. 2.16. Строго говоря, в данном случае $QF10$ при токе $X_{QF11} \cdot I_{r.QF11}$ не срабатывает вовсе. Однако для предварительной оценки разброса по времени между функциями

L двух выключателей на рис. 2.16 искусственно сделана экстраполяция нижней границы допустимого отклонения функции L . Время срабатывания, рассчитанное по формуле (2.61), в таком случае считается условным, оно показывает, за какое время сработала бы функция L , если бы уставка $I_{r.QF10}$ была бы меньше $X_{QF11} \cdot I_{r.QF11}$.

Критерий считается выполненным, если полученное таким образом время срабатывания расцепителя $QF10$ больше, чем $QF11$, что свидетельствует об отсутствии перекрытия зон срабатывания

$$\left(\frac{X_{QF10} \cdot I_{r.QF10}}{X_{QF11} \cdot I_{r.QF11}} \right)^2 \cdot t_{r.QF10}^- > t_{r.QF11}^+ \quad (2.62)$$

9. Селективность при сверхтоке в области КЗ с нижестоящим АВ $QF11$. Необходимость данного критерия может быть проиллюстрирована на следующих примерах.

Пример 1. При возникновении КЗ на выводах $QF11$ со стороны питания (верхние клеммы) возникает ток $I_{к0}$. Этот ток не протекает через $QF11$, так как место повреждения находится выше его по схеме электроснабжения, поэтому он не реагирует на аварию. В этом случае расцепление без длительной выдержки времени обеспечит $QF10$, как единственный АВ, через который протекает ток КЗ.

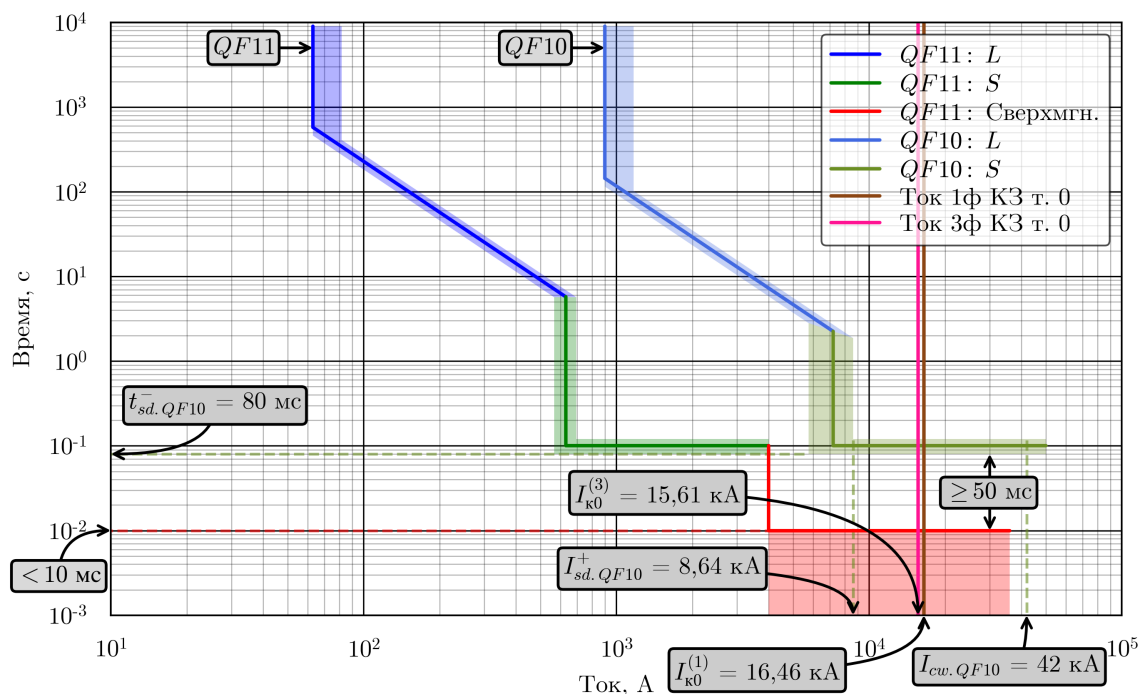


Рис. 2.17. Координация ВТХ $QF10$ и $QF11$ в области токов КЗ. Реализация полной временной селективности

Пример 2. При возникновении КЗ на выводах $QF11$ со стороны нагрузки (нижние клеммы) должно происходить мгновенное расцепление $QF11$, так как ток КЗ в этом случае протекает через него. С точностью до сопротивления $QF11$ значение тока при такой аварии не отличается от предыдущего случая и равно $I_{к0}$. Однако теперь этот ток будет протекать не только через $QF10$, но и через $QF11$, так как место повреждения находится ниже $QF11$ по схеме электроснабжения. Срабатывание $QF10$ обесточит сразу всех потребителей, питающихся от трансформатора, поэтому для надёжности электроснабжения необходимо чтобы сработал АВ, наиболее близкий к месту повреждения, т.е. $QF11$, обесточив только потребителей, получающих питание по КБ1.

В итоге из двух рассмотренных примеров очевидно противоречие: в первом примере $QF10$ должен сработать при токе $I_{к0}$, а во втором — при таком же токе $QF10$ сработать не должен.

Решением в данных случаях является обеспечение между аппаратами временной селективности, для которой собственно и предназначен $QF10$, будучи АВ категории селективности B .

Временнoвременная селективность основана на задании **кратковременной выдержки** для $QF10$ при протекании через него всех возможных токов при КЗ в точке 0. При токе $I_{к0}$ время срабатывания $QF10$ будет больше, чем $QF11$. Таким образом, $QF10$ сработает только в том случае, если $QF11$ не сработает, например из-за того, что место повреждения выше его по схеме. Селективность в данном случае обеспечена за счёт разницы во времени срабатывания.

Для настройки **кратковременной выдержки** у электронного расцепителя $QF10$ должна быть активирована функция S . В рамках проекта рекомендуется отключать функцию I , т.е. у расцепителя $QF10$ будут активированы функции L и S .

Визуальное пояснение принципа организации временной селективности между $QF11$ и $QF10$ представлено на рис. 2.17. Для настройки **кратковременной выдержки** у электронного расцепителя $QF10$ должна быть активирована функция S (—). Функция S имеет возможность настройки токовой уставки $I_{sd.QF10}$ и временной $t_{sd.QF10}$. Номинальное значение нижней токовой границы действия функции S определено уставкой $I_{sd.QF10}$, а верхнее — номинальным кратковременно выдерживаемым током $I_{cw.QF10}$, либо уставкой $I_{i.QF10}$ функции I , если она активирована. Таким образом, временная селективность между $QF10$ и $QF11$ обеспечена, если токи КЗ в точке 0, будучи в диапазоне от $I_{к0}^{(3)}$ до $I_{к0}^{(1)}$, гарантированно находятся в зоне действия функции S (—) расцепителя $QF10$. При этом при токах от $I_{к0}^{(3)}$ до $I_{к0}^{(1)}$ должен быть обеспечен запас минимум в 50 мс во времени срабатывания между $QF10$ и

нижестоящим $QF11$. На практике требования временной селективности выражаются в выполнении следующих трёх условий:

- 9а.** Обращаясь к рис. 2.17, минимальный ток КЗ в точке 0 (—) должен гарантированно попадать в зону действия функции S (—) аппарата $QF10$. Значение токовой уставки функции S $I_{sd.QF10}$ имеет допустимые положительное $\delta_{I_{sd.QF10}}^+$ и отрицательное отклонения $\delta_{I_{sd.QF10}}^-$, которые по стандарту составляют не более 20 %. Как и прежде это означает, что срабатывание $QF10$ с выдержкой времени гарантированно при токах не менее $I_{sd.QF10}^+ = (1 + \delta_{I_{sd.QF10}}^+) I_{sd.QF10}$. Учитывая это и то, что согласно табл. 1.2 $I_{к0}^{(1)} > I_{к0}^{(3)}$, условие гарантированного отключения аппаратом $QF10$ минимального тока КЗ в точке 0 с кратковременной выдержкой времени записывается как

$$I_{sd.QF10}^+ \leq I_{к0}^{(3)}. \quad (2.63)$$

- 9б.** Обращаясь к рис. 2.17, максимальный ток КЗ в точке 0 $I_{к0}^{(1)}$ КЗ (—), должен гарантированно попадать в зону действия функции S (—) аппарата $QF10$ (рис. 2.17). Для расцепителя воздушного $QF10$ действие функции S ограничено значением кратковременно выдерживаемого тока $I_{cw.QF10}$. Учитывая, что согласно табл. 1.2 $I_{к0}^{(1)} > I_{к0}^{(3)}$, условие гарантированного отключения минимального тока КЗ в точке 0 с кратковременной выдержкой времени записывается как

$$I_{cw.QF10} \geq I_{к0}^{(1)}. \quad (2.64)$$

- 9в.** Уставка t_{sd} должна обеспечивать разницу во времени срабатывания при токе $I_{к0}^{(3)}$ между $QF10$ и $QF11$ более 50 мс, с учётом допустимых отклонений (рис. 2.17). Нижестоящий аппарат $QF11$ имеет категорию селективности A и обладает токоограничением, которое активируется при токах больше, чем $I_{io.QF11}$. Также у $QF11$ ранее была активирована функция S при токах менее $I_{io.QF11}$. В связи с этим возможны два случая:

Случай 1: $I_{к0} \geq I_{io.QF11}$. Ток КЗ в точке 0 попадает в зону токоограничения $QF11$ и в зону функции S у $QF10$, как это изображено на рис. 2.17. В этом случае селективная работа, как правило, гарантирована при условии

$$\begin{aligned} t_{sd.QF10} &\geq 100 \text{ мс при } I^2t \text{ Off}, \\ t_{sd.QF10} &\geq 150 \text{ мс при } I^2t \text{ On}, \end{aligned} \quad (2.65)$$

для независимой и обратозависимой выдержки времени функции S , соответственно.

Случай 2: $I_{к0} < I_{io.QF11}$. Ток КЗ в точке 0 попадает в зону функции S у $QF11$ и в зону функции S у $QF10$. В этом случае уставка $t_{sd.QF10}$ должна быть выбрана так, чтобы обеспечивался запас в 50 мс с учётом предельных отклонения или

$$t_{sd.QF10}^{-} - t_{sd.QF11}^{+} \geq 50 \text{ мс.} \quad (2.66)$$

Пример 2.10 Выбор $QF10$

Для рассматриваемой схемы электроснабжения на рис. В1 в качестве $QF10$ по каталогу [9] выбран воздушный АВ производителя Систэм Электрик *SystemePact ACB16N* с номинальным током 1000 А, с электронным расцепителем *SystemeLogic6E*. Артикул аппарата [SPA16N104FHNN54ERU](#). Проверка его соответствия критериям выбора приведена в табл. 2.12, а внешний вид аппарата — на рис. 2.18.

Таблица 2.12

Проверка соответствия $QF10$ критериям выбора

№	Параметры системы в месте установки аппарата	Усл.	Параметры аппарата
1	Род тока	AC	AC
2	Число коммутируемых проводников	4	$4P$
3	Коммутируемое напряжение, В	400	$\geq$ Номинальное рабочее напряжение $U_{e.QF10}$, В
4	Расчётный ток линии $I_{n.T1}$, А	$909,3$	$\leq$ Номинальный ток, $I_{n.QF10}$, А
5	Максимальный ток КЗ $I_{QF10}^{\max}$, кА	$15,6$	$\leq$ Номинальная рабочая наибольшая отключающая способность $I_{cs.QF10}$ при $U_{e.QF10}$, кА

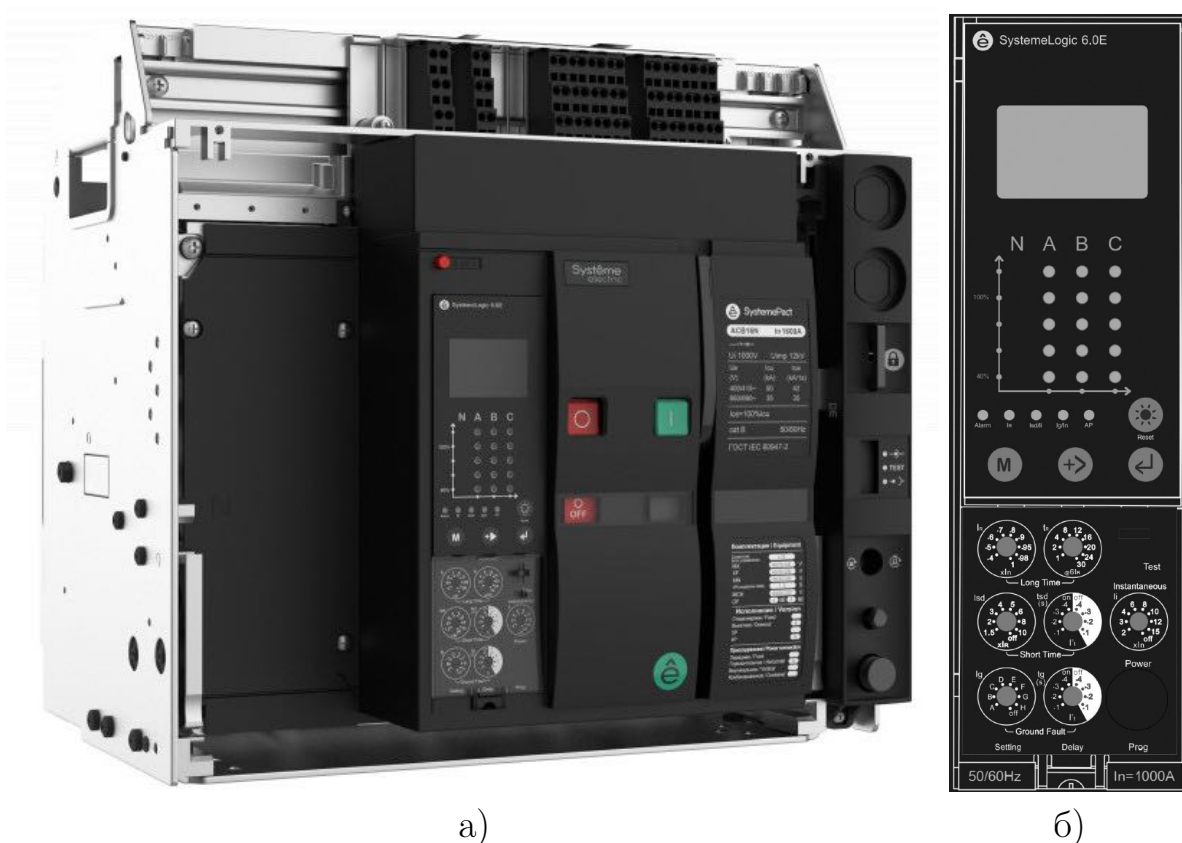


Рис. 2.18. Воздушный АВ Систэм Электрик $QF10$ $I_n = 1000$ А $SPA16N104FHNN54E$ [9]:

а) общий вид; б) панель настройки расцепителя

Продолжение табл. 2.12

№	Параметры системы в месте установки аппарата		Усл.	Параметры аппарата	
6	Расчётный ток линии $I_{n.T1}$, А	909,3	$\leq$	Номинальный ток, $I_{n.QF10}^{рас}$, А	1000
7	Номинальный ток трансформатора $I_{n.T1}$, А	909,3	$\geq$	Уставка $I_{r.QF10}$ функции L	63 ²
8	Макс. время срабатывания $QF11$ при $X_{QF11} \cdot I_{r.QF11}$, с	9,6 ¹	$<$	Условное мин. время срабатывания $QF10$ при $X_{QF11} \cdot I_{r.QF11}$, с	735 ²
9а	Мин. ток КЗ в точке установки нижестоящего АВ $I_{к0}^{(3)}$, кА	15,6	$\geq$	Верхняя граница допустимых значений токовой уставки функции S I_{sd}^{+} , кА	8,6 ³

№	Параметры системы в месте установки аппарата	Усл.	Параметры аппарата
9б	Макс. ток КЗ в точке установки нижестоящего АВ $I_{к0}^{(1)}$, кА	16,46 <	Номинальный кратковременно выдерживаемый ток $I_{cw.QF10}$, кА
9в	Верхняя граница допустимого времени срабатывания $QF11$ при токе $I_{к0}^{(3)}$, с	0,01 →	Уставка времени функции $S t_{sd}$, с при $I^2t Off$

¹В табл. 2.11 выбрана уставка $t_{r.QF11} = 8$ с при допустимом отклонении 0...20 %. Это время соответствует току $X_{QF11} \cdot I_{r.QF11} = 6 \cdot 63 = 378$ А. Откуда в таблицу вносится значение $t_{r.QF11}^+ = t_{r.QF11} \cdot (1 + \delta_{tr.QF11}^+) = 8 \cdot (1 + 0,2) = 9,6$ с.

²Согласно каталогу поворотный регулятор уставки I_r расцепителя *SystemeLogic* 6.0 имеет деления $(0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,95; 0,98; 1) \times I_n$ А. Выбрана уставка $I_{r.QF11} = 0,9 \cdot I_{n.QF11} = 0,9 \cdot 1000 = 900$ А. Согласно каталогу поворотный регулятор уставки t_r имеет деления 1; 2; 4; 6; 8; 12; 16; 20; 24; 30 с при допустимом отклонении ± 10 %. Выбрана уставка $t_{r.QF11} = 4$ с. Это время соответствует току $X_{QF10} \cdot I_{r.QF10} = 6 \cdot 900 = 5400$ А. В таблицу вносится условное время, определяемое по формуле (2.61) $(1 - 0,1) (6 \cdot 900)^2 / (6 \cdot 63)^2 \cdot 4 = 735$ А.

³Согласно каталогу I_{sd} настраивается указанием коэффициента кратности относительно ранее выбранной уставки I_r . Поворотный регулятор расцепителя позволяет выполнить настройку $I_{sd} = I_r \cdot (1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10)$. Выбираем кратность уставки 8, откуда $I_{sd} = I_r \cdot 8 = 900 \cdot 8 = 7200$ А. Учитывая указанное в каталоге допустимое отклонение $\delta_{I_{sd}} = \pm 20$ %, в таблицу вносится значение $I_{sd}^+ = (1 + \delta_{I_{sd}}^+) \cdot I_{sd} = (1 + 0,2) \cdot 7200 = 8640$ А.

⁴Согласно каталогу t_{sd} выбирается из ряда $(0,1; 0,3; 0,3; 0,4)$ с. Выбрана настройка $t_{sd} = 0,1$ с, которой с учётом допустимого отклонения соответствует минимальное время срабатывания $t_{sd}^- = 0,08$ с. Ток $I_{к0}^{(3)} = 15,6$ кА находится в зоне токоограничения нижестоящего АВ $QF11$, то верхняя граница допустимого времени срабатывания не более 10 мс. Таким образом с учётом допустимого отклонения между $QF11$ и $QF10$ минимальная разница во времени срабатывания $80 - 10 = 70$ мс, что удовлетворяет необходимой разницы не менее, чем в 50 мс.

2.11. Карта селективности

Карта селективности — это совокупность ВТХ последовательно соединённых аппаратов защиты, построенные в одной системе координат. Она позволяет в наглядном визуальном виде проконтролировать отсутствие пересечений между ВТХ, а также проконтролировать выполнение критериев селективности.

По оси абсцисс откладывается значение тока, а по оси ординат — время расцепления. У ВТХ аппаратов есть важная особенность. Токи

КЗ превышают номинальные токи на несколько порядков. Время срабатывания расцепителя мгновенного действия составляет миллисекунды, а расцепителей с обратозависимой выдержкой — порядка часа при малых перегрузках. Наглядное отображение таких разномасштабных значений в осях с линейным масштабом невозможно. В связи с этим при построении карты селективности используется логарифмический масштаб как по оси абсцисс, так и по оси ординат.

При таком представлении на ось равномерно наносятся основные линии координатной сетки. Подписи значений у этих линий не привычные 1, 2, 3,..., а $10^1, 10^2, 10^3...$, — это основные линии сетки логарифмической шкалы. Например, значению 100 соответствует вторая по счёту основная линия сетки $\log_{10} 100 = 2$, значению 1000 — третья $\log_{10} 1000 = 3$ и т. д. По схожему принципу между основными линиями сетки наносятся промежуточные. Например, значению 200 будет соответствовать линия сетки с координатой $\log_{10} 200 = 2,3$, значению 300 — $\log_{10} 300 = 2,48$, 400 — $\log_{10} 400 = 2,6$, 900 — $\log_{10} 900 = 2,95$ и т. д. Как видно, в отличие от основных промежуточные линии сетки расположены неравномерно.

В рамках проекта на карту селективности выносятся следующее.

1. ВТХ и их допустимые отклонения аппаратов $QF1$, $KK1$, $QF11$, $QF10$ в соответствии с ранее указанными в проекте настройками расцепителей.

2. Пусковая характеристика двигателя.

3. Токи $I_{B.к61}$, $I_{Z.к61}$, $I_{B.к62}$, $I_{Z.к62}$, $I_{n.T1}$, $I_{к.QF10}^{\min}$, $I_{к.QF10}^{\max}$, $I_{к.QF11}^{\min}$, $I_{к.QF11}^{\max}$, $I_{к.QF1}^{\min}$, $I_{к.QF1}^{\max}$.

На основании сделанных построений делается вывод о выполнении требований селективной работы аппаратов защиты, и, при необходимости, вносятся корректировки в настройки расцепителей.

Пример 2.11 Построение и анализ карты селективности

ВТХ электромеханических расцепителей теплового реле $KK1$ и АВ защиты двигателя $QF1$, как правило, доступны в технической документации на аппараты. Необходимо перенести эти характеристики на карту селективности, корректно отразив при этом их токовую уставку I_r расцепителя с обратозависимой выдержкой времени, указанную в табл. 2.3.

ВТХ электронных расцепителей доступны в каталогах, где они обычно даны для всего диапазона регулирования уставок. Методика построения ВТХ электронного приведена ранее на рис. 2.11, где она фактически полностью определена пятью точками.

Построение пусковой характеристики двигателя производится по нескольким опорным точкам: ударный пусковой ток $I_{p.M1}$, пусковой ток $I_{s.M1}$ и номинальный ток $I_{n.M1}$ (см. рис. 2.19). Соединение между этими точками делается сглаженной линией.

Карта селективности, построенная на основании данных табл. 2.3, 2.6, 2.11, 2.12 представлена на рис. 2.19.

А н а л и з с е л е к т и в н о с т и $QF1$ с $QF10$ и $QF11$

Для $QF1$ условие селективной работы заключается в том, что в случае протекания через него тока КЗ он срабатывает мгновенно, а вышестоящие выключатели $QF10$ и $QF11$ не успевают сработать. Согласно табл. 1.3 на участке цепи, защищаемом $QF1$ могут протекать токи КЗ от $I_{к.QF1}^{\min} = 0,35$ кА до $I_{к.QF1}^{\max} = 1,55$ кА. Сделать вывод о селективной работе можно определив времена срабатывания каждого из автоматических выключателей в крайних точках диапазона $I_{QF1}^{\min} \dots I_{QF1}^{\max}$. В соответствии с картой селективности на рис. 2.19 ток $I_{QF1}^{\min} = 0,35$ кА попадает в область:

- менее номинального тока $QF10$ — время срабатывания ∞ ;
- функции L $QF11$ — время срабатывания более 6 с;
- мгновенного расцепления $QF1$ — время срабатывания менее 7 мс.

Вывод. Мгновенное расцепление при токе $I_{\min.QF1}$ обеспечивает лишь $QF1$, поэтому со всеми вышестоящими аппаратами у него обеспечена токовая селективность, по определению основанная на разнице токовых уставок мгновенного срабатывания.

Ток $I_{QF1}^{\max} = 1,55$ кА попадает в зону:

- функции L $QF10$ — время срабатывания более 40 с;
- функции S $QF11$ — минимальное время срабатывания с учётом допустимого отклонения $t_{sd}^+ = 80$ мс;
- мгновенного расцепления $QF1$ — время срабатывания менее 7 мс.

Вывод. Между $QF1$ и $QF10$ при $I_{QF1}^{\max}$ обеспечена токовая селективность, между $QF1$ и $QF11$ — временная, так как ток попадает в зону мгновенного расцепления обоих выключателей, но у $QF11$ выставлена [кратковременная выдержка](#), дающая разницу во времени срабатывания

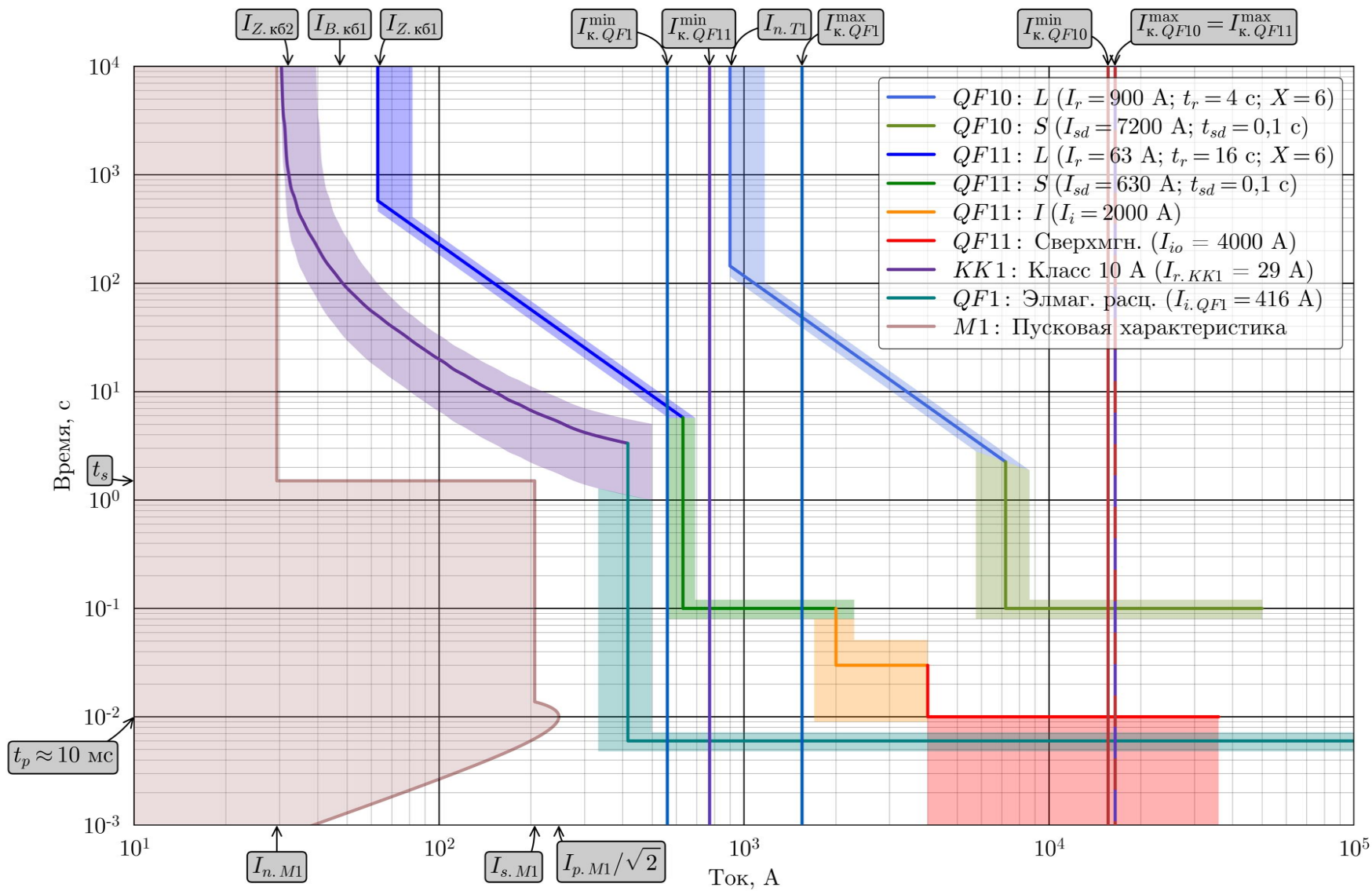


Рис. 2.19. Карта селективности

$80 - 7 = 73$ мс, что составляет более 50 мс и поэтому удовлетворяет условию временной селективности.

В результате проведённого анализа, при любом токе КЗ в защищаемом $QF1$ участке обеспечены требования селективной работы со всеми вышестоящими АВ.

А н а л и з с е л е к т и в н о с т и $QF11$ с $QF10$

Согласно табл. 1.3 на участке цепи, защищаемом $QF11$ могут протекать токи КЗ от $I_{к.QF11}^{\min} = 0,79$ кА до $I_{к.QF11}^{\max} = 16,46$ кА.

В соответствии с картой селективности на рис. 2.19 ток $I_{QF11}^{\min} = 0,79$ кА попадает в область:

- рабочих токов $QF10$ — время срабатывания ∞ ;
- функции S $QF11$ — минимальное время срабатывания с учётом допустимого отклонения $t_{sd}^- = 80$ мс.

Вывод. Расцепление, без длительной выдержки времени при токе $I_{QF11}^{\min}$ выполняет лишь $QF11$, поэтому с вышестоящим $QF10$ у него обеспечена токовая селективность.

В соответствии с картой селективности на рис. 2.19 ток $I_{\max.QF11} = 16,46$ кА попадает в область:

- Сверхмгновенного расцепления $QF11$ — время срабатывания менее 10 мс.
- Функции S $QF10$ — минимальное время срабатывания с учётом допустимого отклонения $t_{sd}^- = 80$ мс.

Вывод. При токе $I_{QF11}^{\max}$ $QF10$ срабатывает с кратковременной выдержкой, а $QF11$ — мгновенно. Разница во времени срабатывания с учётом допустимых отклонений $(80 - 10) = 70$ мс. Таким образом, между $QF10$ и $QF11$ обеспечена временная селективность.

В результате проведённого анализа, при любом токе КЗ в защищаемом $QF11$ участке обеспечены требования селективной работы вышестоящим АВ.

Контрольные вопросы

1. Поясните, что подразумевается под термином «модульное оборудование»?
2. Чему равна ширина одного DIN -модуля?
3. В чём заключаются преимущества и недостатки модульных автоматических выключателей?

4. По каким критериям выбирается номинальный ток модульного автоматического выключателя?

5. Какому условию должна соответствовать номинальная рабочая наибольшая отключающая способность автоматического выключателя?

6. Какие типы характеристик мгновенного расцепления существуют у модульных автоматических выключателей? Изобразите их времятоковые характеристики и обозначьте на них характерные точки: номинальный ток, диапазон токов мгновенного расцепления, наибольшую отключающую способность.

7. В чём заключается основное отличие ВДТ от АВДТ?

8. Почему при выборе устройств дифференциальной защиты в рамках проекта рекомендуется выбирать номинальный отключающий дифференциальный ток 30 мА, а не 10 мА или 100 мА?

9. В чём состоят основные особенности автоматического выключателя для защиты двигателя и какие его отличия от модульного автоматического выключателя?

10. В чём заключаются основные отличия автоматического выключателя от контактора?

11. Какие типы цепей выделяют в контакторе? В чём заключается их назначение?

12. Что необходимо сделать, чтобы включить электромагнитный контактор?

13. Какие типы цепей выделяют в тепловом реле? В чём заключается их назначение?

14. Каким образом производится регулирование токовой уставки теплового реле?

15. Относительного какого тока настраивается токовая уставка теплового реле?

16. Поясните, что происходит при срабатывании теплового реле?

17. Объясните устройство и принцип действия плавкого предохранителя?

18. В чём основное назначение выключателя-разъединителя и можно ли вместо него в схеме использовать модульный автоматический выключатель?

19. Какие основные особенности автоматических выключателей в литом корпусе?

20. Какие функции электронных расцепителей в области защиты от сверхтоков используются в проекте?

21. Каким образом в проекте обеспечивается селективность между автоматическими выключателями $QF10$ и $QF11$?

РАЗДЕЛ 3

КОНСТРУИРОВАНИЕ НКУ

Финальным этапом проекта является разработка чертежа общего вида НКУ. 3D-модель НКУ представлена на рис. 3.1. Она создана на основе приведённых в пособии примеров выбора аппаратов. К защите необходимо подготовить только двумерную версию чертежа общего вида (главный вид). На чертёж общего вида НКУ выносятся следующие аппараты:

- выключатель-разъединитель $QS1$;
- АВ защиты двигателя $QF1$;
- контактор $KM1$;
- тепловое реле $KK1$ (при его наличии в задании на проект);
- держатель предохранителя $FU1$;
- кнопки $SB1$, $SB2$;
- аппараты защиты в цепях однофазных нагрузок $QF2...QF4$, $FD1...FD3$;
- клеммные колодки.

Для выполнения чертежа рекомендуется использовать системы автоматизированного проектирования (САПР) *T-FLEX*, *Компас*, *NanoCAD* и др.

Процесс разработки конструкции НКУ структурно подразделяется на несколько этапов, более подробно рассмотренных далее.

3.1. Чертежи аппаратов

На первом этапе необходимо подготовить чертежи всех элементов НКУ. Чертежи аппаратов следует загружать с сайтов производителей

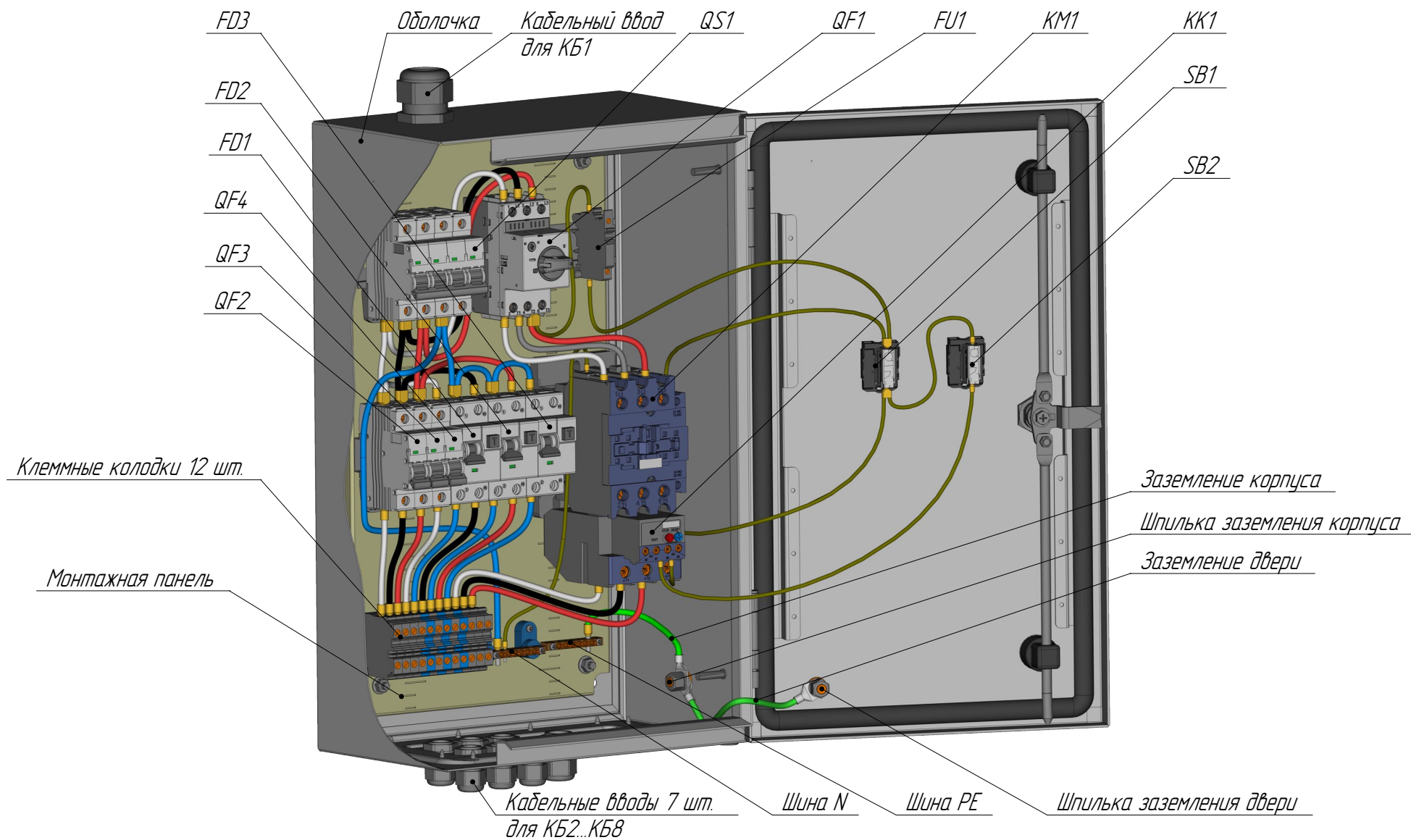


Рис. 3.1. Трёхмерная модель НКУ

или вычерчивать самостоятельно. Важно, чтобы чертежи соответствовали следующим требованиям:

- габаритные размеры аппаратов должны строго соответствовать данным, указанным в каталоге;
- на лицевых панелях аппаратов должны быть изображены все выводы;
- выводы следует маркировать так же, как на корпусе реального устройства, согласно его изображению и электрической схеме в каталоге (например, *L1*, *N*, *A1*, *A2*, 13, 14, *NO*, *NC* и так далее);
- у АВ изображаются рукоятки управления. Для устройств дифференциальной защиты дополнительно вычерчивается кнопка «Тест»;
- у тепловых реле и аппаратов защиты электродвигателя с тепловым расцепителем отображается регулятор тока уставки;
- если у АВ защиты двигателя нет теплового расцепителя, то убедитесь, что регулятор уставки не изображён на чертеже.

На данном этапе также готовятся чертежи *DIN*-реек и клеммных колодок. Рекомендуется располагать аппараты на *DIN*-рейках шириной 35 мм. Размеры *DIN*-реек стандартизованы¹, и их чертежи находятся в свободном доступе.

3.2. Компоновка оборудования

Зная габаритные размеры всех аппаратов в составе НКУ, необходимо как можно компактнее расположить их на поле чертежа.

1. Разместите несколько *DIN*-реек произвольной длины на чертеже так, чтобы расстояние между их центрами было 125 мм или 150 мм². При необходимости расстояние можно увеличить. Для удобства на данном этапе рейки можно изобразить схематично в виде отрезков.

2. Установите аппараты на *DIN*-рейках, учитывая правило: нижестоящий по схеме электроснабжения аппарат должен быть правее или ниже вышестоящего. По горизонтали модульные аппараты обычно размещаются вплотную. Остальные устройства допускается размещать как с зазором, так и без, если это не противоречит рекомендациям производителя.

3. На основании выполненной компоновки оцените минимально необходимые габариты оболочки НКУ для размещения аппаратов.

¹ГОСТ Р МЭК 60715–2021. Аппаратура распределения и управления низковольтная. Установка и крепление на направляющих электрических аппаратов в устройствах распределения и управления.

²*DIN* 43880.

Необходимо учесть, что расстояние от центральной оси *DIN*-рейки до верхней или нижней стенки шкафа должно быть 100–150 мм. Рекомендуемое расстояние по вертикали от АВ защиты электродвигателя до стенки шкафа — 75–100 мм.

Пример 3.2 Оценка габаритов оболочки

Габаритные размеры выбранных ранее аппаратов в соответствии с технической документацией сведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Габариты аппаратов в составе НК У

Аппарат	Высота мм	Ширина мм	Глубина мм
<i>QS1</i>	85,2	72,0	76,0
<i>QF1</i>	96,6	44,8	85,6
<i>KM1</i>	129,0	77,0	115,0
<i>KK1</i>	47,0	71,0	126,0
<i>FU1</i>	57,0	8,0	50,3
<i>QF2...QF4</i>	81,0	17,5	74,0
<i>FD1...FD3</i>	81,0	35,4	78,6
<i>XS1...XS12</i>	50,0	8,0	49,0

На рисунке 3.2 начерчены аппараты, изображённые в виде условных прямоугольников с шириной и высотой в соответствии с табл. 3.1. *DIN*-рейки изображены схематично в виде толстых чёрных линий на расстоянии 150 мм по вертикали.

Учитывая требование минимального расстояния от центра *DIN*-рейки до стенки шкафа — 100 мм, выполненные построения показывают, что подходящий габарит оболочки НК У 500×300 мм. Глубина шкафа определяется размером самого крупного в этом измерении аппарата. В рамках проекта обычно это сборка контактора *KM1* и теплового реле *KK1*. Согласно табл. 3.1, в рассматриваемом примере максимальная глубина у *KK1* — 126 мм.

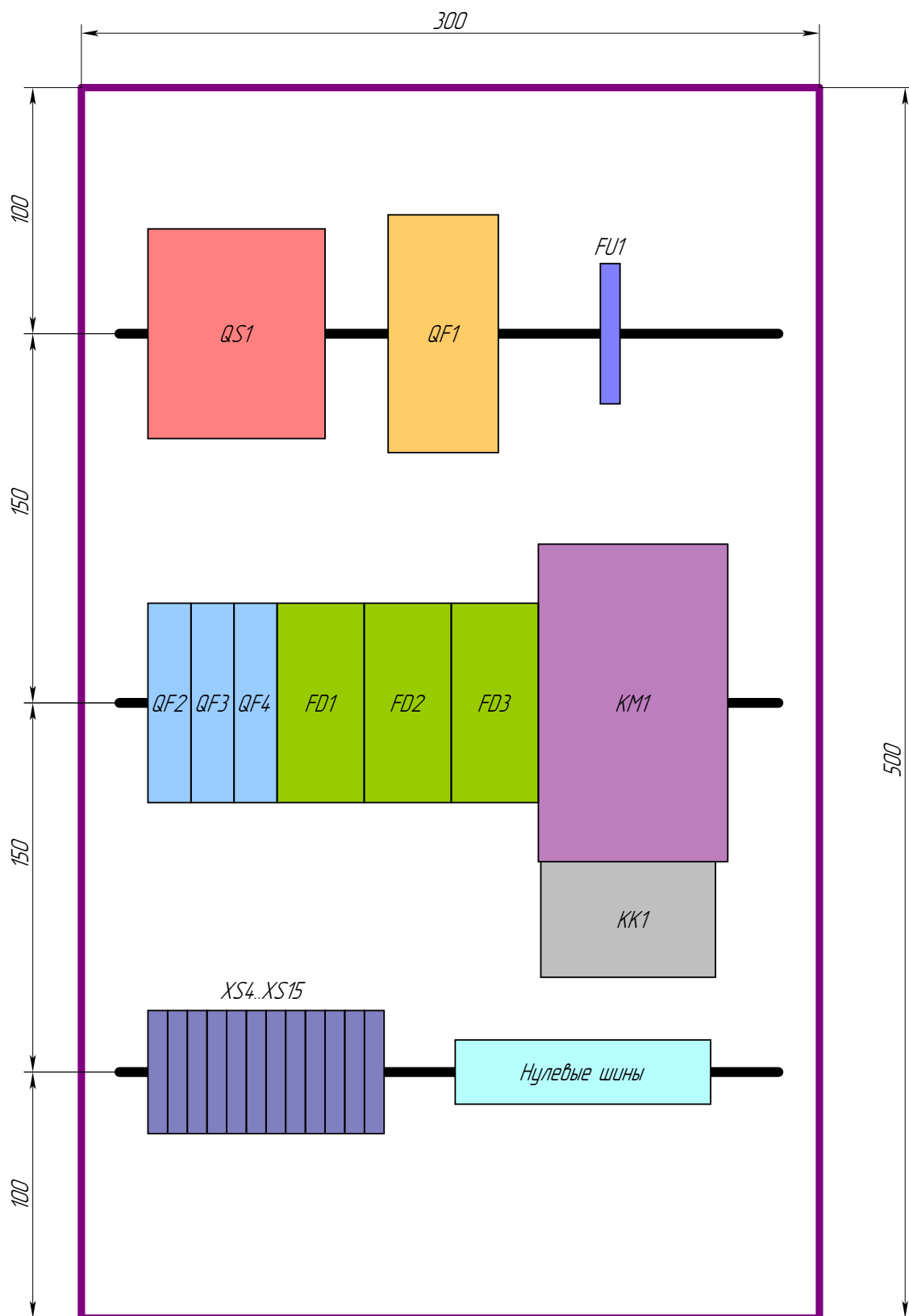


Рис. 3.2. Компоновка аппаратов

3.3. Оболочка НКУ

С учётом полученных оценок габаритных размеров необходимо подобрать оболочку НКУ. В качестве альтернативных терминов в технической документации также употребляются: ящик, шкаф, щит, корпус или стойка. При этом не следует выбирать слишком большой шкаф. По приблизительной оценке, на *DIN*-рейках должно оставаться около 30 % свободного пространства для обеспечения возможности установки дополнительного оборудования в будущем.

Рекомендуется выбирать металлическую оболочку с настенным креплением (поверхностный монтаж) и с монтажной рамой или с монтажной панелью. Степень защиты оболочки должна быть не ниже *IP54*.

Пример 3.3 Выбор оболочки

Согласно оценке размеров, полученной на рис. 3.2, а также рекомендуемым требованиям к оболочке, для рассматриваемого в пособии примера по каталогу [10] подходит металлический корпус с монтажной панелью производителя *IEK* серии *TITAN*, модель ЩМП-50.30.20 УХЛ1 *IP66*, артикул TI5-10-N-050-030-020-66 с габаритными размерами 500×300×200 мм и размерами монтажной панели 450×250 мм (рис. 3.3). Степень защиты оболочки *IP66*.

3.4. Электрические соединения

На двумерном чертеже общего вида необходимо соединить аппараты внутри НКУ в соответствии со схемой электроснабжения на рис. В1. Допускается каждый из соединительных проводов изображать как одной, так и двумя линиями для отображения его толщины. Питание на все аппараты должно подаваться строго на их верхние зажимы. Необходимо обеспечить, чтобы на чертеже было чётко различимо, к какой именно клемме аппарата подключен каждый из соединительных проводов.

Кнопочные выключатели цепи управления необходимо расположить на чертеже сбоку от шкафа, и выполнить все электрические



Рис. 3.3. Оболочка НКУ *IEK TITAN ЩМП-50.30.20*

соединения между ними и аппаратами внутри НКУ. При этом необходимо изобразить местный вид части дверцы шкафа, где располагаются кнопки управления.

В случае применения заземляющих клеммных колодок с креплением на *DIN*-рейку и на одной *DIN*-рейке установлены несколько таких колодок, то допускается присоединять *РЕ*-проводник только к одной из них. В этом случае *DIN*-рейка выполняет функцию *РЕ*-шины³. Таким образом, получается, что все заземляющие клеммы, установленные на одной *DIN*-рейке, находятся под одним потенциалом.

Для обеспечения защиты от поражения электрическим током все токопроводящие части НКУ должны иметь надёжный и видимый электрический контакт с цепью защиты. Для этого необходимо выполнить электрические соединения при помощи защитных *РЕ*-проводников:

- дверцы шкафа с корпусом шкафа,
- монтажной панели с корпусом шкафа.

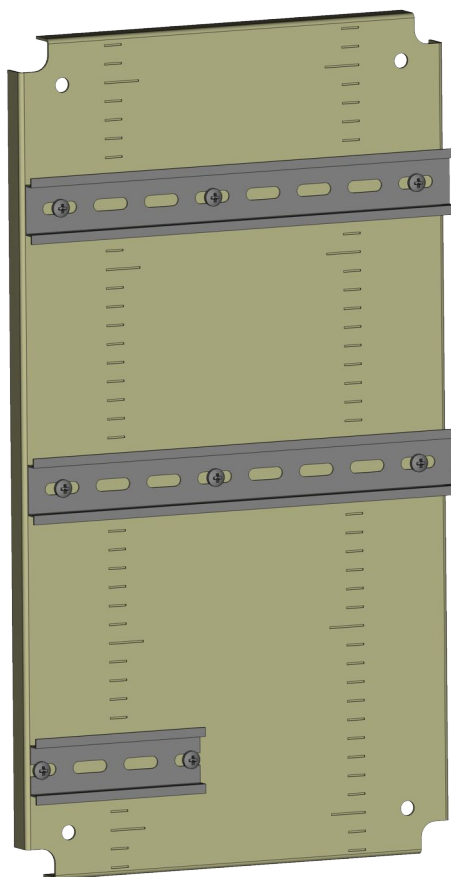
Для выполнения указанных соединений используются встроенные шпильки заземления. В случае их отсутствия в определенных моделях шкафов необходимо предусмотреть монтаж болтов заземления.

3.5. Сборка НКУ

Далее пошагово рассматривается процесс сборки НКУ, ранее изображённого на рис. 3.1.

1. Монтажная панель закреплена внутри оболочки при помощи четырёх болтовых соединений. Для удобства монтажа аппаратов монтажную панель извлекают из корпуса и размечают в соответствии с выполненной ранее компоновкой (рис. 3.2). Затем при помощи самонарезающих винтов на ней закрепляют *DIN*-рейки, которые предварительно обрезаются до требуемой длины.

³ГОСТ *IEC* 60947-7-2-2016. Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 7-2. Электрооборудование вспомогательное. Колодки клеммные защитных проводников для присоединения медных проводников. пп. 7.1.7.



2. Установка аппаратов начинается с вводного выключателя-разъединителя *QS1*. Как наиболее вышестоящий по схеме он защёлкивается в левой части верхней *DIN*-рейки в соответствии с рекомендациями по расположению аппаратов. После установки НКУ на объекте к верхним выводам *QS1* подключаются жилы *L1*, *L2*, *L3* и *N* кабеля КБ1. Этот кабель, как и другие кабели, не входит в состав НКУ и на рисунке не показывается. *РЕ*-жила кабеля КБ1 по правилам не должна разрываться, поэтому должна быть напрямую подключена на *РЕ*-шину, которую закрепляют самонарезающими винтами к монтажной панели напрямую без изоляторов. Это создаёт дополнительную точку заземления монтажной панели и оболочки в целом.

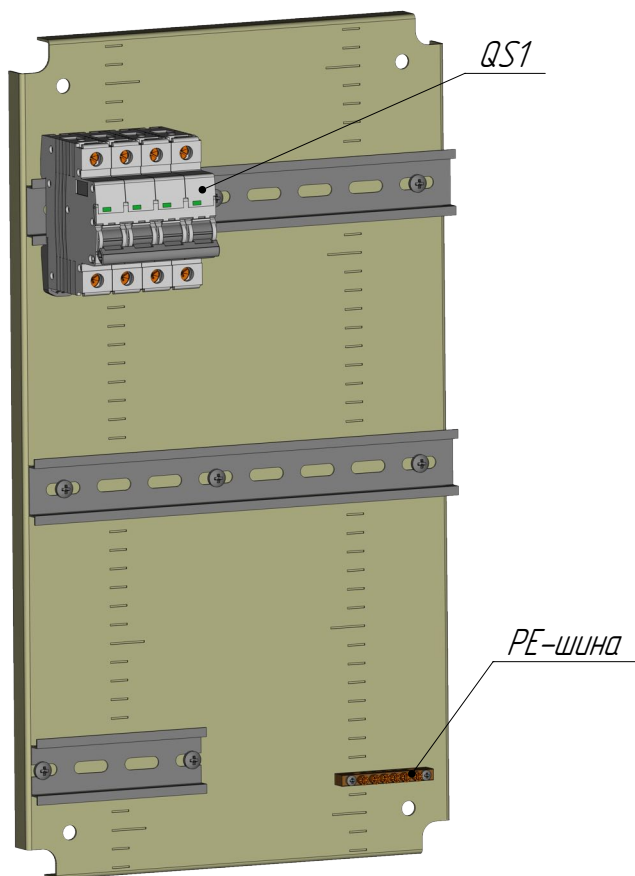
После установки НКУ на объекте к *РЕ*-шине будет подключена не только *РЕ*-жила вводного кабеля, но и *РЕ*-жилы отходящих кабелей. В соответствии с однолинейной схемой электроснабжения *РЕ*-жилу имеют отходящие кабели КБ2, КБ6, КБ7 и КБ8 (рис. В1).

При выборе *РЕ*-шины следует правильно подобрать число её выводов. В рассматриваемом примере их должно быть минимум пять — один для присоединения *РЕ*-жил вводного и четыре каждого из отхо-

дящих кабелей. Для *РЕ*-шин, как правило, приводится не номинальное сечение присоединяемого проводника, а диаметры отверстий выводов. Поэтому для определения возможности подключения нужно провести оценку диаметра жил выбранных кабелей. Из формулы площади круга следует, что диаметр жилы определяется через площадь $q_{кбj}$ как

$$D_{кбj} = \sqrt{\frac{4q_{кбj}}{\pi}}. \quad (3.1)$$

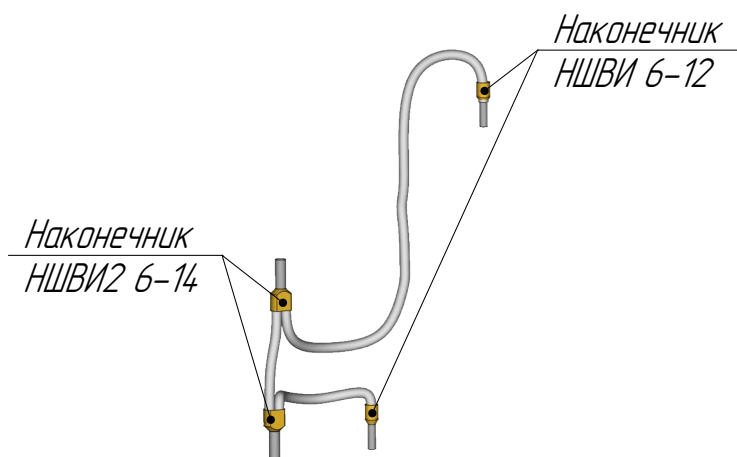
Учитывая ранее выбранные сечения (табл. 1.1) и в соответствии с (3.1), *РЕ*-шина должна иметь диаметры отверстий не менее 4,5 мм для КБ1, а также 2,3 мм для КБ2 и 1,8 мм для КБ6...КБ8. По каталогу [11] выбираем нулевую шину без изоляторов сечением 8×12 с отверстиями для крепления к монтажной панели по краям, с шестью отверстиями для подключения проводников с диаметрами 7,5 мм (2 шт.) и 5 мм (4 шт.). Артикул [YNN21-06-100](#).



3. В соответствии с предварительной компоновкой (рис. 3.2) на вторую *DIN*-рейку устанавливается модульный АВ *QF2*. По исходной схеме на рис. В1 к нему подключается фаза *L1* с выхода *QS1*. Для подключе-

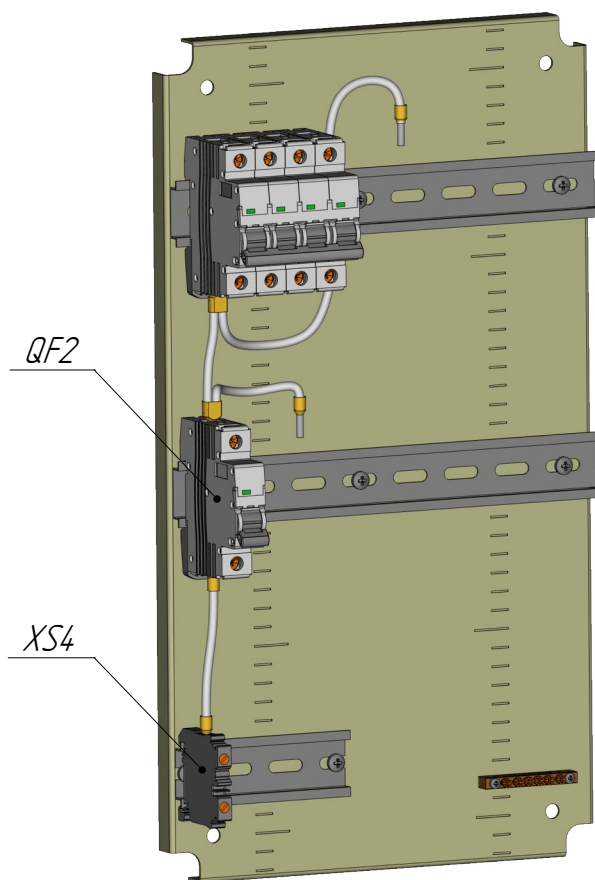
ния используется установочный медный провод сечением 6 мм^2 . Для удобства монтажа он должен обладать высокой гибкостью, что достигается за счёт многопроволочной жилы, состоящей из множества тонких проволок. Для надёжного зажима в клемме аппарата концы многопроволочных жил рекомендуется опрессовывать кабельным наконечником. Как правило, для этого используются наконечники штыревые втулочные изолированные (НШВИ). Так как согласно схеме рис. В1 после $QS1$ каждая из фаз разветвляется на три линии, то при помощи кабельных наконечников для опрессовки двух жил (НШВИ2) организован шлейф.

Для опрессовки установочного провода сечением 6 мм^2 по каталогу [3] выбраны кабельные наконечники: НШВИ *KEAZ OptiKit T-Shv-PVC-6,0-12*, артикул 278030 и НШВИ2 *OptiKit T-Shv2-PVC-6,0-14*, артикул 278052.



На данном этапе сборки шлейф подключен только к выводам фазы $L1$ у аппаратов $QS1$ и $QF2$, но в дальнейшем к его свободным концам будут подключены аппараты параллельных линий фазы $L1$ — $FD1$ и $QF1$. Вывод $QF2$ подключается к клеммной колодке $XS4$. К нижнему выводу $XS4$ при монтаже НКУ на объекте будет подключена жила $L1$ кабеля КБЗ. Ранее было отмечено, что разводка внутри НКУ делается гибким проводом сечением 6 мм^2 . Получается, что к клеммной колодке со стороны источника присоединяется жила сечением 6 мм^2 , а со стороны нагрузки — $q_{\text{кбз}} = 1,5 \text{ мм}^2$ (жила кабеля КБЗ). Учитывая, что верхний и нижний зажимы одинаковые, **номинальное сечение проводника** для клеммной колодки должно быть не менее 6 мм^2 . По данному условию по каталогу [12] выбрана проходная клеммная колодка с винтовыми зажимами серого цвета *IEK* серии *ARMAFIX CY6*, артикул *AF-CT30-00-K03-006-EX*. Отметим, что соединения внутри НКУ выполнены проводом поперечным сечением 6 мм^2 , что заведомо больше, чем у жил отходящих кабелей (табл. 1.1). Поэтому все клеммные

колодки в дальнейшем будут иметь **номинальное сечение проводника** не менее 6 мм^2 .

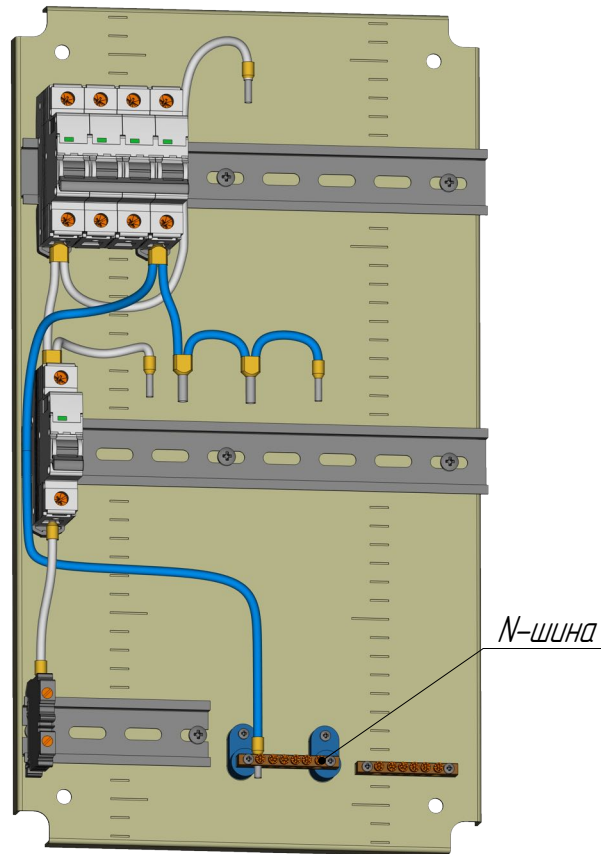


4. Для подключения *N*-жилы кабеля КБ3, как, впрочем, и кабелей КБ4 и КБ5, устанавливается *N*-шина. В отличие от *PE*-шины, она устанавливается на изоляторах, так как *N*-проводник в общем случае имеет небольшой потенциал. К *N*-шине подключается нейтральный вывод *QS1*. Так как согласно рис. В1 нейтраль после *QS1* должна приходить на *FD1*, *FD2*, *FD3*, то аналогично предыдущему пункту при помощи кабельных наконечников НШВИ2 собирается шлейф. На данном этапе он имеет три свободных вывода для последующего подключения *FD1*, *FD2* и *FD3*. При монтаже НКУ на объекте двухжильный кабель КБ3 фазной жилой подключается к клеммной колодке *XS4*, а нейтральной — к *N*-шине.

В рассматриваемом примере к *N*-шине подключен провод внутренней проводки НКУ с вывода *QS1*. Как отмечалось прежде, его сечение составляет 6 мм^2 , а диаметр по (3.1) 2,8 мм. Также к *N*-шине будут подключены отходящие кабели без дифференциальной защиты КБ3...КБ5 сечением $1,5 \text{ мм}^2$ и диаметром 1,4 мм. Таким образом, нуж-

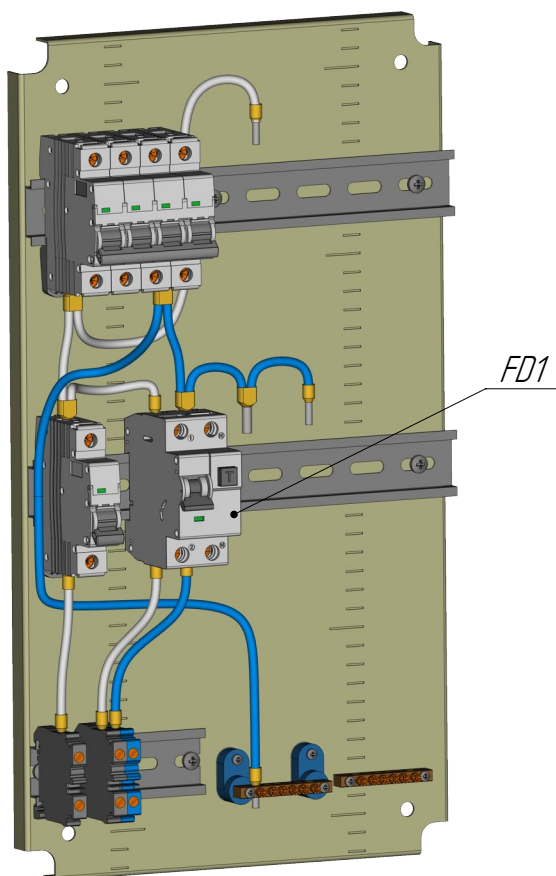
но минимум четыре зажима для подключения проводов и диаметр отверстия более 2,8 мм.

По каталогу [11] выбираем *N*-шину *IEK ШНИ-6×9-6-У2-С* с двумя угловыми изоляторами с шестью отверстиями диаметрами 4 мм (4 шт.) и 6 мм (2 шт.), артикул [YNN10-69-6C2-K07](#).

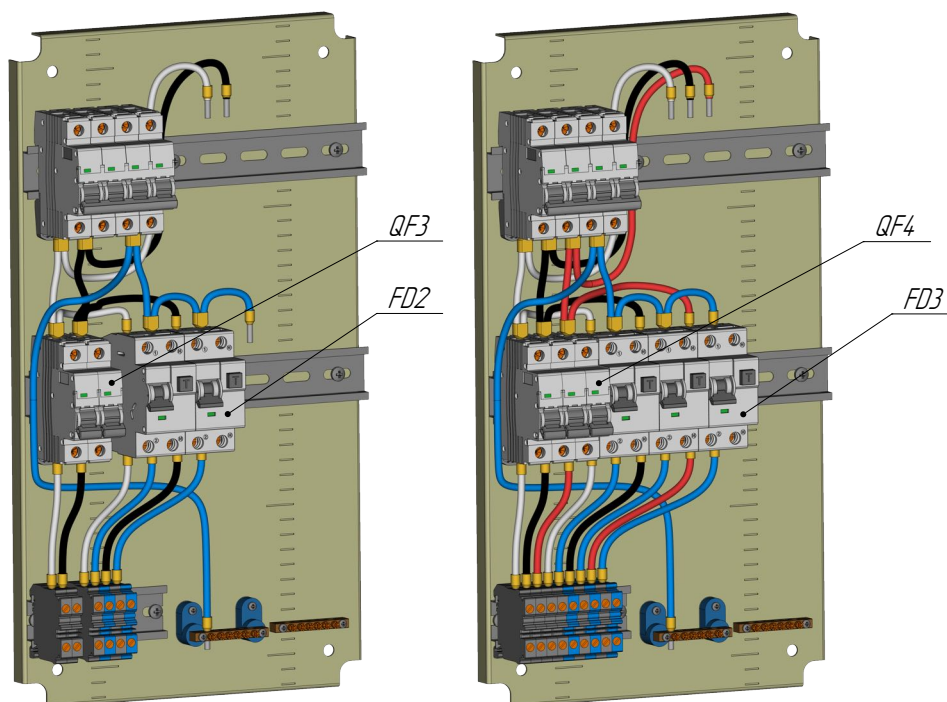


5. Продолжим подключение аппаратов к фазе *L1*. Согласно схеме на рис. В1, к выводу *L1* аппарата *QS1* помимо уже подключенного ранее *QF2* также подключается фазный вывод АВДТ *FD1*. Все устройства дифференциальной защиты в однофазном исполнении имеют два полюса — к ним подключаются фаза и нейтраль. Это связано с тем, что принцип их действия основан на сравнении токов в фазном и нейтральном проводниках. Организованный ранее шлейф для фазы *L1* образует одну точку в цепи, поэтому всё, что подключается к фазному шлейфу, присоединено к нижнему фазному выводу вводного аппарата *QS1*. Аналогично всё, что подключается к нейтральному шлейфу, подключено к нейтральному выводу *QS1*. Согласно схеме на рис. В1, *FD1* подключен к фазному и нейтральному выводу *QS1*, поэтому *FD1* подключается к фазному и нейтральному шлейфам. По аналогии с *QF2* выводы *FD1* со стороны нагрузки подключаются к клеммным колодкам. Отметим,

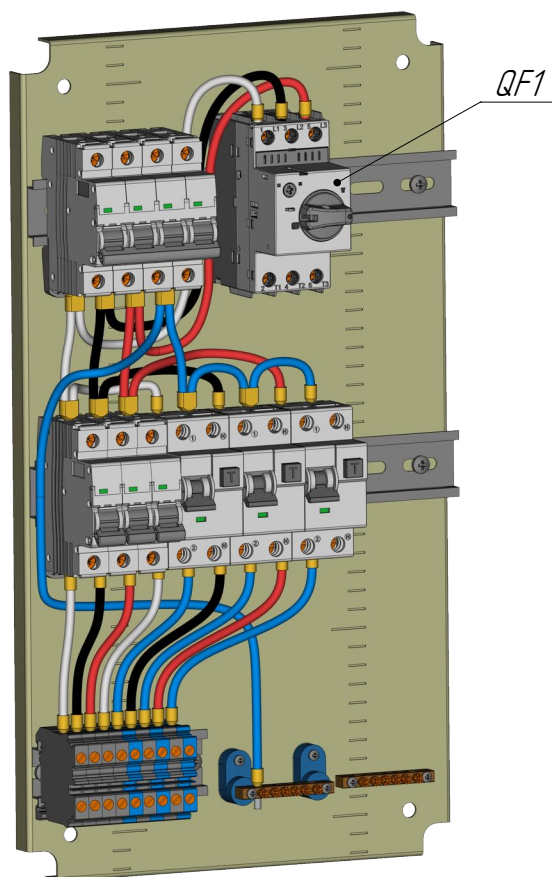
что на этот раз нельзя использовать общую N -шину для подключения N -жил отходящих кабелей, так как это будет приводить к ложным срабатываниям устройств дифференциальной защиты. В связи с этим для данной линии на DIN -рейку устанавливаются как фазная, так и нейтральная клеммные колодки. Фазная — такая же, как и выбранная ранее $IEK\ CY6$, а нейтральная такая же по параметрам, но синего цвета $CY6BU$, артикул [AF-CT30-00-K07-006-EX](#) [12].



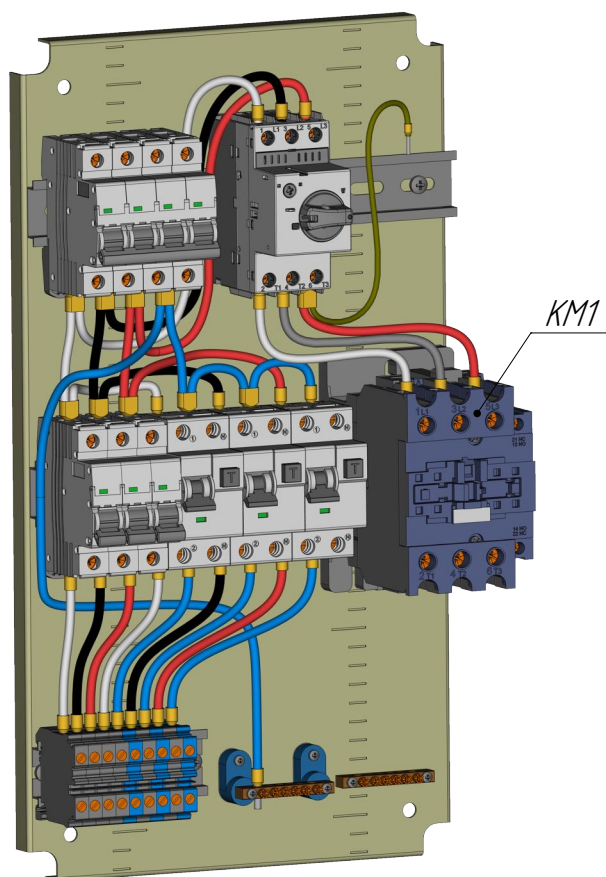
6. Аналогично к выводам $QS1$ со стороны нагрузки подключаются модульные аппараты к фазе $L2$ — $QF3$ и $FD2$, а также к фазе $L3$ — $QF4$ и $FD3$. На этом подключения модульных аппаратов для защиты однофазных линий закончено.



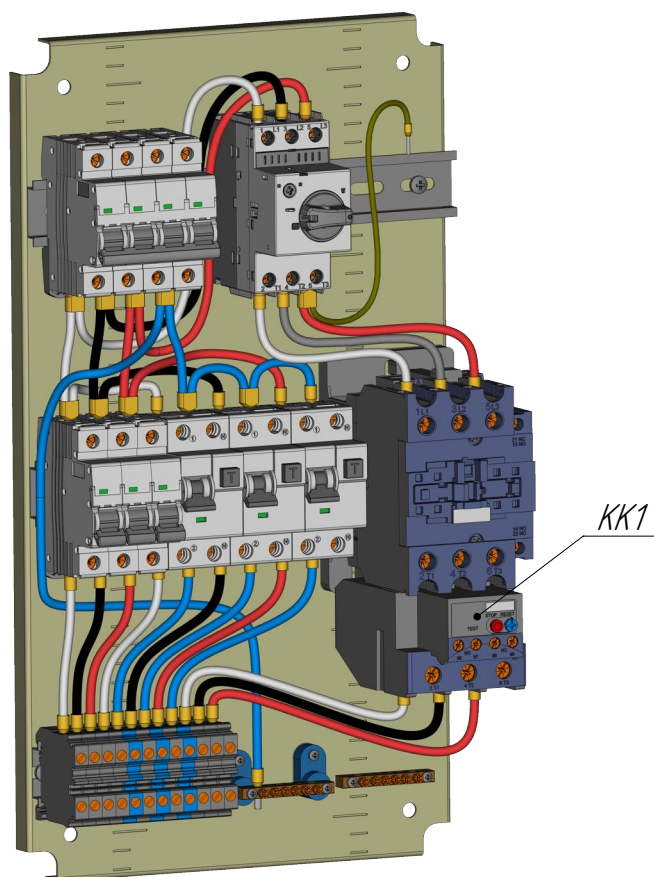
7. Далее производится подключение аппаратов защиты и управления двигателя. Согласно исходной схеме на рис. В1 помимо выполненных ранее соединений к выводу $QS1$ со стороны нагрузки также подключен АВ защиты двигателя $QF1$. На этот раз аппарат трёхфазный. Для подключения $QF1$ к выводам $QS1$ как и прежде используются организованные ранее фазные шлейфы.



8. К выводам $QF1$ со стороны нагрузки подключаются выводы главной цепи контактора $KM1$. Так как по рис. В1 к выводу $L3$ аппарата $QF1$ со стороны нагрузки также подключена цепь управления, то заранее организовано ответвление. Как и прежде, оно выполнено в виде шлейфа, полученного путём опрессовки двух проводов под один кабельный наконечник НШВИ2.

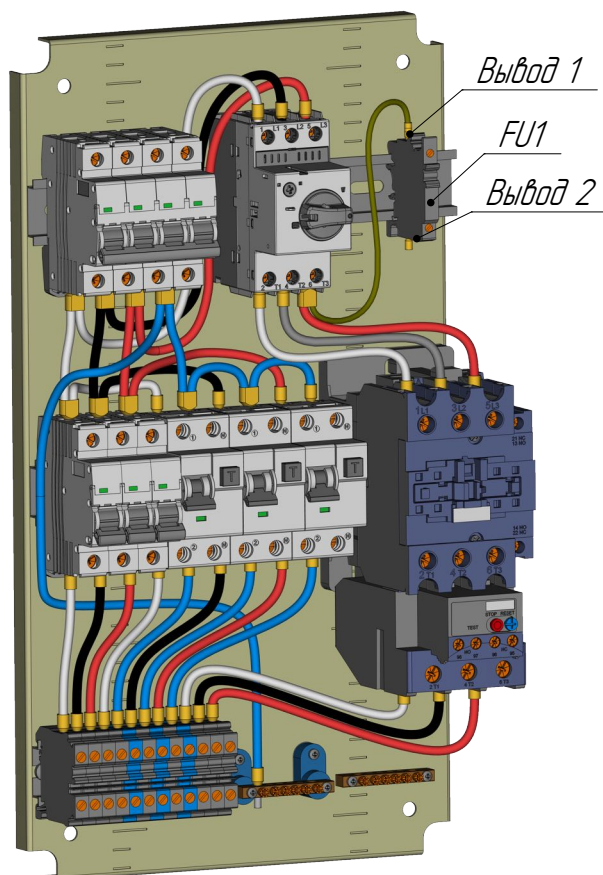
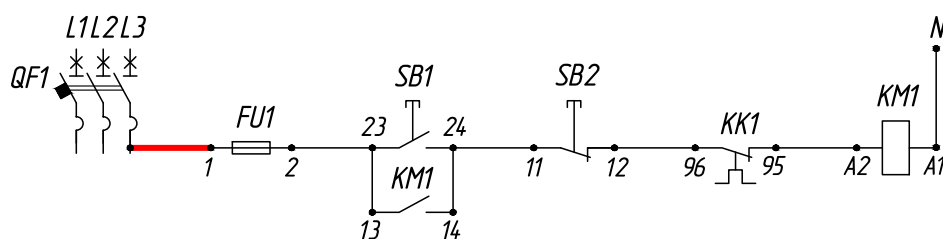


9. Последовательно с контактором *KM1* соединено тепловое реле *KK1*, которое образует с ним единую жесткую конструкцию. Другими словами, тепловое реле крепится именно к контактору, а не на *DIN*-рейку. Выводы теплового реле *KK1* со стороны нагрузки подключены к клеммным блокам, к нижним выводам которых в дальнейшем будут присоединены фазные жилы кабеля КБ2. На этом все внутренние электрические соединения силовой цепи НКУ закончены. Еще раз отметим, что так как провод для внутренней проводки внутри НКУ выбран заведомо большего сечения, чем отходящие кабели, то номинальное сечение проводника для всех клеммных колодок определяется именно установочным проводом сечением 6 мм². Поэтому в рассматриваемом примере все клеммные колодки одинаковые, за исключением цвета.

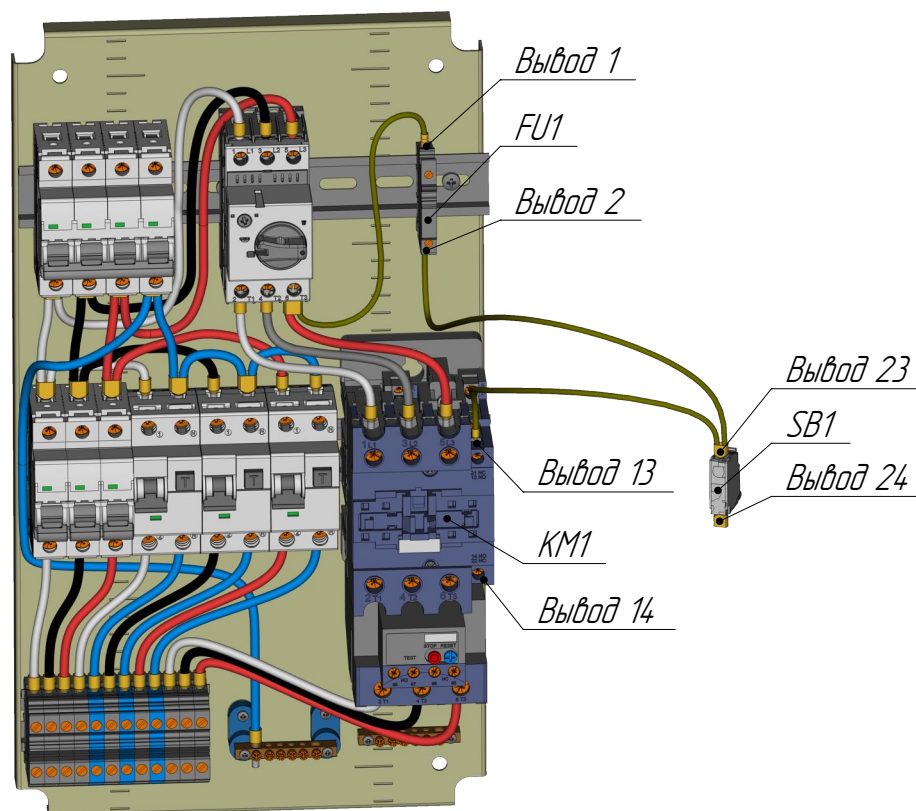
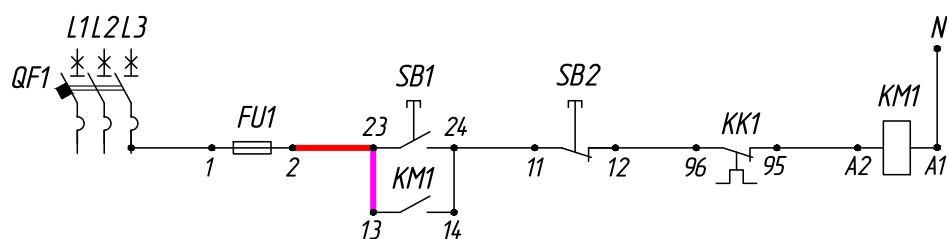


- 10.** Далее подключается цепь управления. Для более ясного понимания порядка подключения на рисунке ниже в исходной схеме на рис. В1 обозначены все выводы аппаратов, используемые для подключения цепи управления. Для удобства дальнейшего подключения выводы 95, 96 размыкающего контакта теплового реле поменяны местами слева направо. То же самое касается выводов катушки контактора $A1$ и $A2$. Это можно сделать, так как направление протекания тока в контакторе переменного тока не имеет значения.

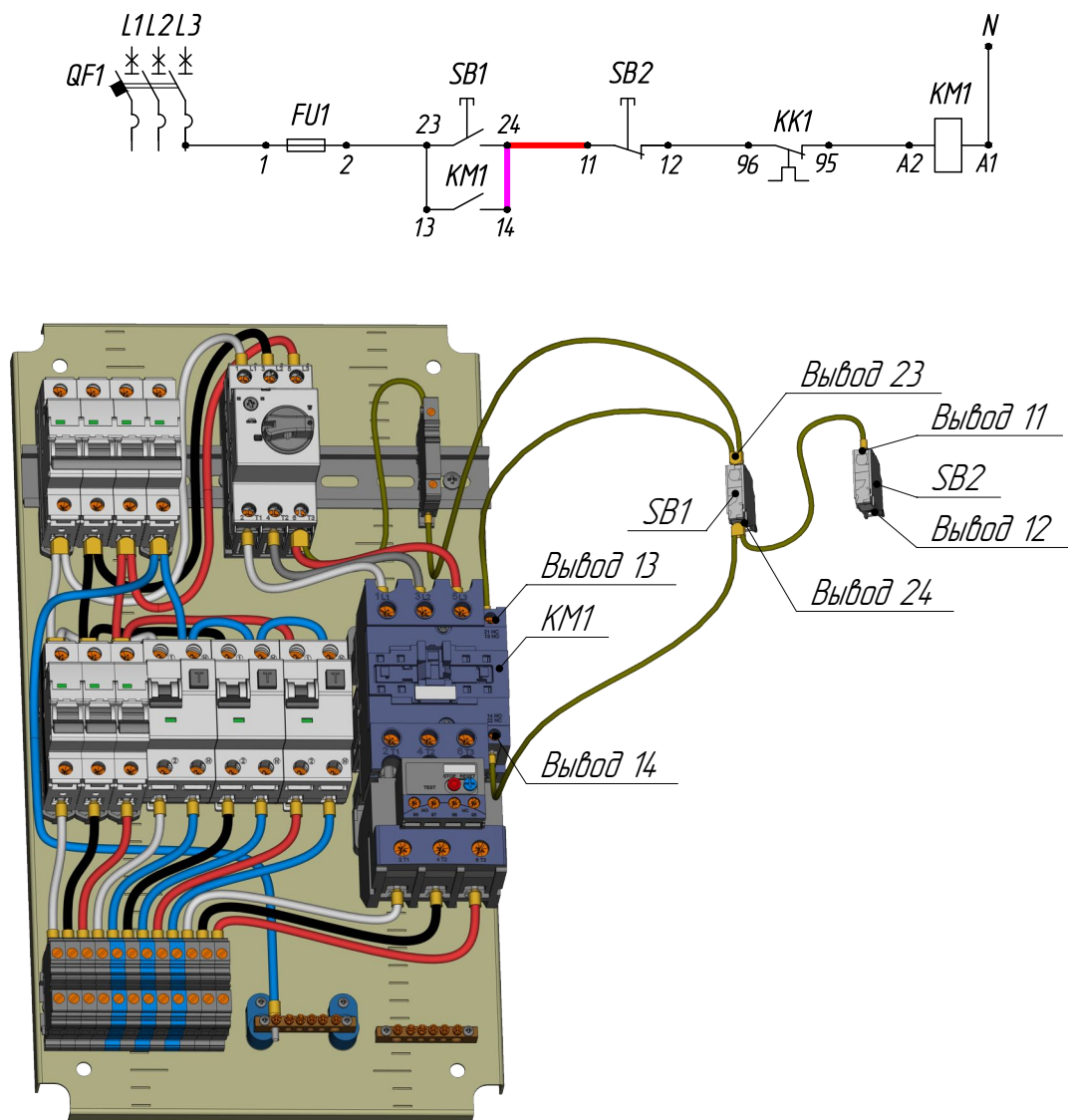
Фаза $L3$ с вывода $QF1$ со стороны нагрузки подключается к выводу 1 держателя предохранителя $FU1$. Для этого используется предварительно организованный шлейф. Ток, протекающий в цепи управления, определяется катушкой контактора и обычно составляет доли ампера — в рассматриваемом примере ток катушки при удержании $I_{с.КМ1} = 0,09$ А. В связи с малым значением тока для подключения цепи управления используется гибкий провод меньшего сечения, чем для силовой цепи — $1,5 \text{ мм}^2$. Как и прежде для его опрессовки используются кабельные наконечники типа НШВИ. В рассматриваемом примере для провода сечением $1,5 \text{ мм}^2$ это *KEAZ OptiKit T-Shv-PVC-1,5-8* артикул [278040](#) [3].



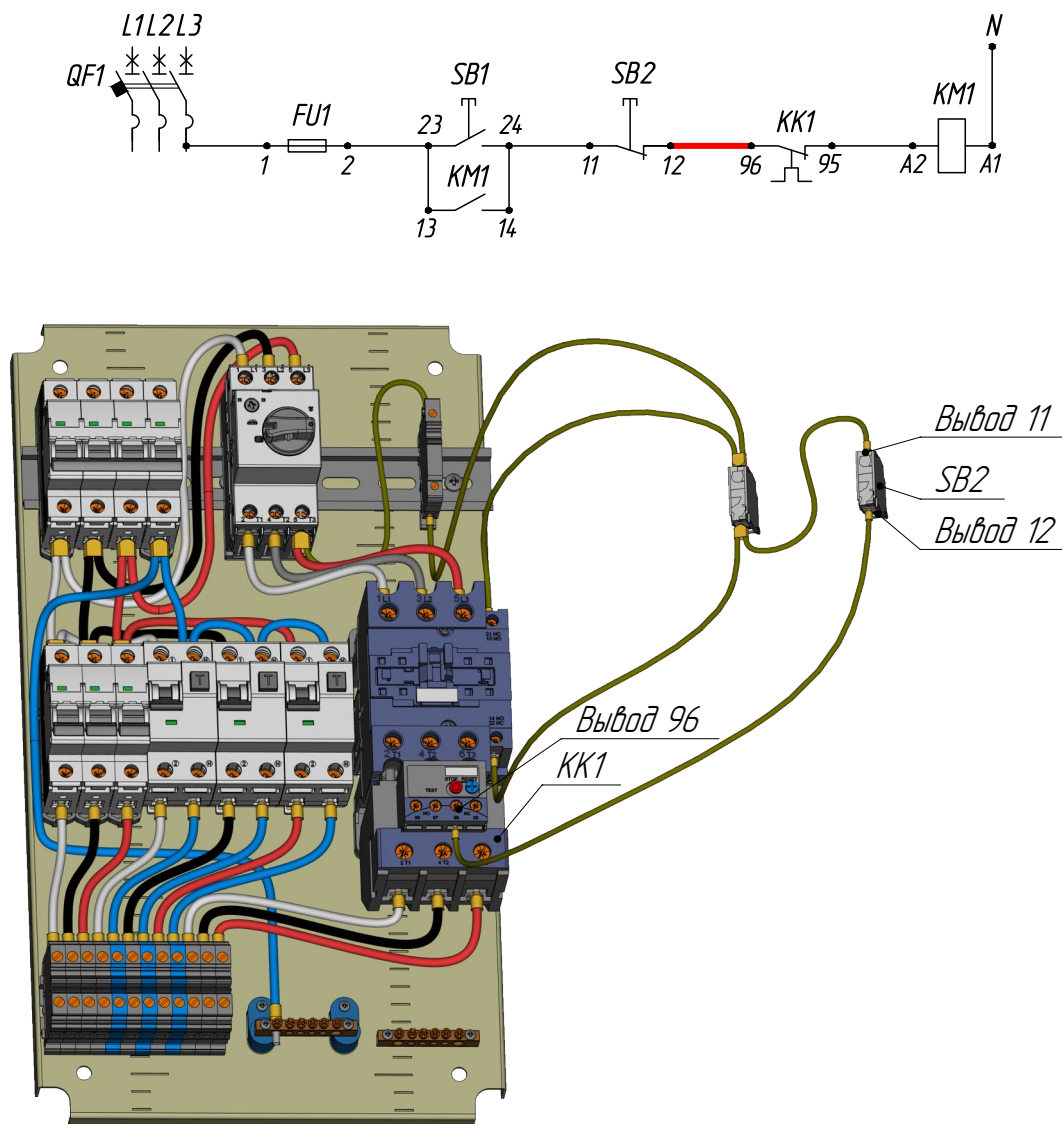
- 11.** Двигаясь дальше по цепи управления, вывод 2 предохранителя *FU1* подключается к выводу 23 контактного блока кнопочного выключателя *SB1*. По схеме вывод 23 также подключается к выводу 13 замыкающего (*NO*) контакта контактора *KM1*. Для организации разветвления, как и прежде, при помощи кабельного наконечника НШВИ2 собран шлейф. В рассматриваемом примере для провода сечением $1,5 \text{ мм}^2$ используется кабельный наконечник *KEAZ OptiKit T-Shv2-PVC-1,5-12*, артикул [278048](#) [3].



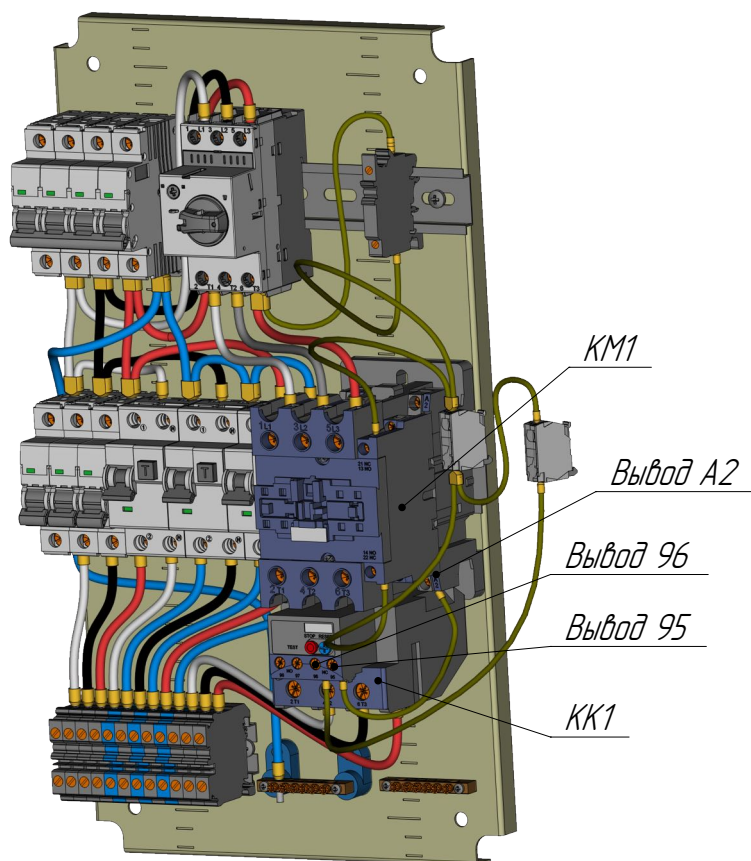
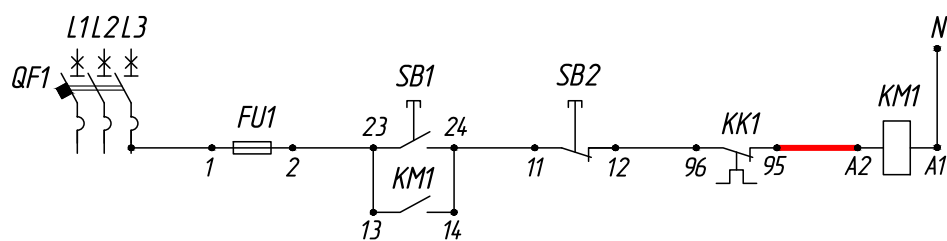
- 12.** Вывод 24 контактного блока кнопочного выключателя *SB1* подключается к выводу 11 контактного блока кнопочного выключателя *SB2*. Вывод 24 также подключается к выводу 14 замыкающего (*NO*) контакта контактора *KM1*. Для этого разветвления, как и на предыдущем шаге, при помощи кабельного наконечника НШВИ2 собран шлейф.



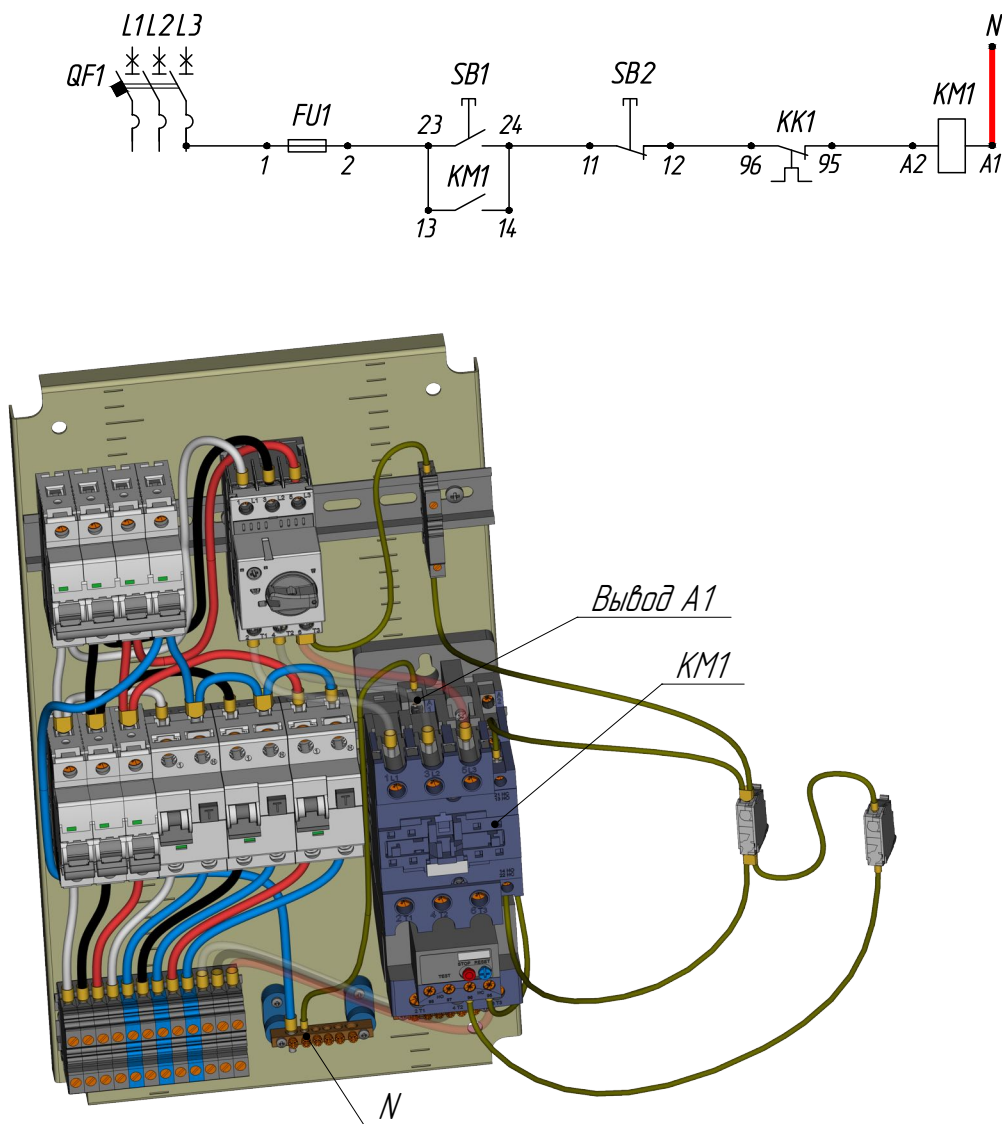
- 13.** Вывод 12 контактного блока кнопочного выключателя $SB2$ подключается к выводу 96 размыкающего (NC) контакта теплового реле $KK1$.



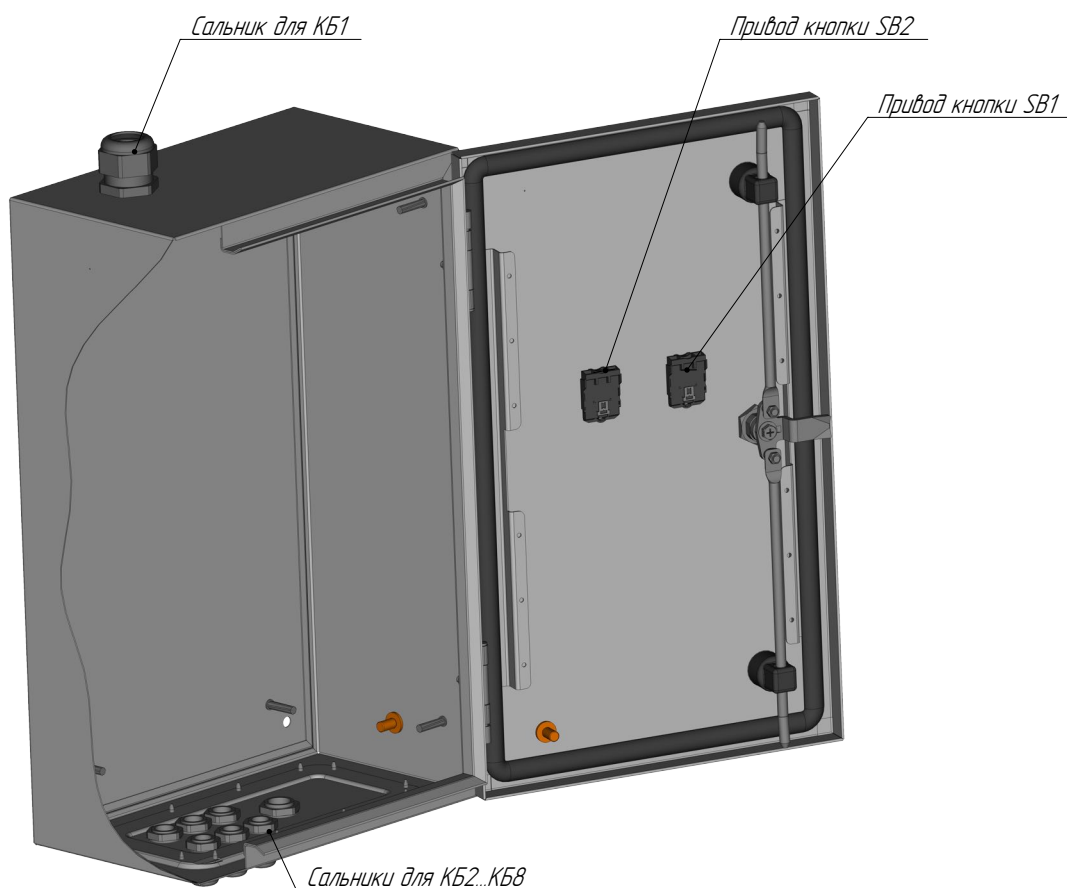
14. Вывод 95 размыкающего (NC) контакта теплового реле $KK1$ подключается к выводу $A2$ катушки контактора. Обратите внимание, что у выбранной модели контактора конец провода катушки подключен сразу к двум выводам на лицевой панели контактора. Один из выводов $A2$ расположен сверху, а другой — снизу. В данном случае удобнее подключить именно нижний вывод $A2$.



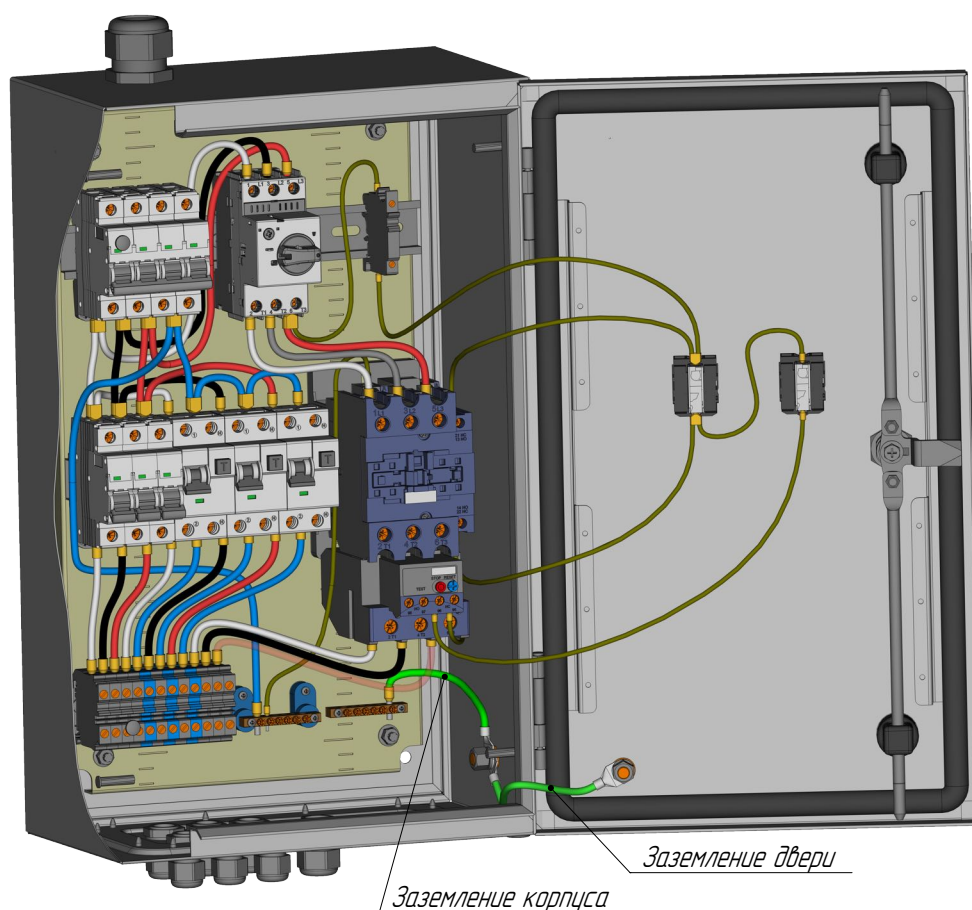
- 15.** Последним этапом соединения цепи управления является подключение вывода $A1$ катушки контактора к нейтральной шине N . На этом все электрические соединения согласно исходной схеме электроснабжения рис. **В1** выполнены.



- 16.** В оболочке выполняются отверстия, куда устанавливаются **сальники** (кабельные вводы) и управляющие устройства (приводы) кнопочных выключателей.



- 17.** Монтажная панель с установленными аппаратами возвращается в оболочку НКУ и закрепляется при помощи встроенных шпилек. Дополнительно для гарантирования непрерывности контура заземления с *РЕ*-шиной соединяются корпус и дверь шкафа при помощи встроенных в шкаф шпилек заземления *M8* и гибкого провода 6 мм^2 . Для использования резьбового соединения установочный провод опрессовывается наконечниками кольцевыми изолированными (НКИ). В рассматриваемом примере для этого используются кабельные наконечники *KEAZ OptiKit T-K-PVC-5,5-8*, артикул [278067](#) по каталогу [3]. На этом сборка НКУ закончена.



3.6. Рекомендации по оформлению чертежа

Оформление чертежа необходимо руководствоваться следующими стандартами ЕСКД: [ГОСТ Р 2.109—2023](#), [ГОСТ 2.113—75](#), [ГОСТ 2.307—2011](#), [ГОСТ 2.303—68](#), [ГОСТ 2.305—2008](#). На чертеже должен быть использован наклонный шрифт типа А в соответствии с [ГОСТ 2.304—81](#). Основная надпись оформляется согласно [ГОСТ Р 2.104—2023](#).

Предпочтительный формат чертежа А2 или А1. Если чертёж не умещается на лист таких форматов, то допускается выполнить его в масштабе 1:2, что обязательно нужно отразить в основной надписи. Важно отметить, что при использовании масштаба, отличного от 1:1, основная надпись не масштабируется. Иными словами, нельзя выполнить чертёж на А0, а распечатать его на А1, так как основная надпись при этом уменьшится пропорционально.

На чертеже должны быть проставлены позиции ко всем элементам: аппаратам, клеммным колодкам, *DIN*-рейке, монтажной панели, болтам, шкафу и д. При этом в правом верхнем углу чертежа должна быть расположена таблица с расшифровкой позиций, которая должна

содержать название аппарата, буквенно-цифровое обозначение аппарата в соответствии со схемой, а также модель аппарата.

На чертеже указываются габаритные размеры шкафа, а также установочный размер болта заземления при его наличии.

На чертеже в области шпильки или болта заземления необходимо изобразить местный разрез, для обеспечения видимости выполненных соединений.

Во избежание неточностей при печати рекомендуется экспортировать созданный в САПР чертёж в формат *PDF*, тщательно проверить получившейся результат и отдавать именно этот *PDF*-файл на печать.

3.7. Схема электрическая принципиальная

В завершение конструкторской части проекта оформляется принципиальная схема НКУ, на которую выносятся те же аппараты, что и на чертёж общего вида, но в виде условных графических обозначений. На принципиальной схеме также должна быть отражена информация о сечениях и длинах питающих и отходящих кабелей и их марках, а также параметрах нагрузки и моделях аппаратов. В рамках проекта рекомендуется выполнять линии кабелями марки ВВГнг. Принципиальная схема оформляется на формате А3. Пример оформления принципиальной схемы НКУ представлен на рис. 3.4.



Контрольные вопросы

1. Поясните, как выбирается оболочка НКУ в проекте?
2. Зачем используются *DIN*-рейки?
3. Чему равна стандартная ширина *DIN*-рейки?
4. Каково рекомендуемое расстояние между *DIN*-рейками по вертикали?
5. Каким аппаратом в проекте определяется глубина шкафа?
6. Поясните принцип выполнения электрических соединений внутри оболочки НКУ?
7. Зачем в схеме управления используются вспомогательные замыкающие контакты контактора?
8. Как поступить, если в контакторе нет встроенного вспомогательного замыкающего контакта?
9. Поясните каким образом тепловое реле включается в цепь управления? Что происходит при срабатывании теплового реле? Какой аппарат при этом отключает двигатель от сети?
10. Каково назначение плавкого предохранителя в цепи управления? Возможно ли вместо него использовать модульный автоматический выключатель?
11. Для чего на выходе НКУ устанавливаются клеммные колодки? По каким соображениям они выбираются?
12. Какие виды клеммных колодок используются в проекте и в чём их отличия?
13. К каким зажимам будет подключаться вводной кабель КБ1 при монтаже НКУ на объекте? Куда подключаются фазные, нейтральные и защитные жилы КБ1?
14. К каким зажимам будут подключаться отходящие кабели КБ2...КБ8 при монтаже НКУ на объекте? Куда подключаются фазные, нейтральные и защитные жилы этих кабелей?
15. Почему нейтраль после устройств дифференциальной защиты не может быть подключена к общей *N*-шине?
16. Каким образом в НКУ организовано параллельное соединение линий?
17. Куда в НКУ устанавливаются кнопки?
18. Как организовано заземление НКУ?
19. По каким соображениям устанавливаются аппараты внутри НКУ?
20. Возможно ли вместо четырёхполюсного *QS1* использовать трёхполюсный? Что при этом поменяется в НКУ? Каковы преимущества и недостатки такого решения?

21. Возможно ли вместо выключателя-разъединителя $QS1$ на вводе НКУ использовать модульный автоматический выключатель с тем же номинальным током? Каковы преимущества и недостатки такого решения?

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Требования к РПЗ

Расчётно-пояснительная записка должна содержать:

- задание с описанием исходных данных;
- предварительные расчёты со сводными таблицами;
- перечень аппаратуры управления и защиты, которую необходимо выбирать;
- перечень основных технических параметров, по которым выбирались аппараты с указанием их значений;
- результаты выбора электрических аппаратов, включая их проверку на соответствие критериям в табличной форме;
- карту селективности.

Графическая часть проекта должна содержать:

- конструктивное исполнение НКУ (вид спереди) с электрическими соединениями;
- принципиальную схему НКУ (формат А3).

Пояснительная записка должна быть выполнена в текстовом редакторе *MS Word* в соответствии с ГОСТ 7.32–2017. С обязательным соблюдением следующих требований:

1. Параметры страницы:

- размер страницы А4;
- поля страницы: верхнее и нижнее 2 см, левое — 3 см, правое — 1 см;
- печать односторонняя;
- номер страницы ставится в нижней части листа по центру;
- титульный лист имеет номер страницы 1, однако сама цифра на титульном листе не ставится.

2. Основной текст:

- шрифт *Times New Roman*, размер 12;
- междустрочный интервал 1,5;
- выравнивание по ширине;
- абзацный отступ 1,25 см;
- вертикальный интервал между абзацами отсутствует.

3. Заголовки и подзаголовки:

- шрифт *Times New Roman*, размер 12, полужирный;
- номер раздела без точки в конце, например «1 Раздел» или «1.1 Подраздел раздела»
- выравнивание по центру без абзацного отступа;
- между заголовком и текстом оставлять одну пустую строку.

4. Формулы:

- структура формулы: «рассчитываемая переменная» = «формула с переменными» = «формула с безразмерными числами в той же последовательности, что и переменные» = «число» «размерность»;

- размерность без скобок;
- шрифт строго *Times New Roman* или *Symbol*.
- размер шрифта 12;
- выравнивание формулы по центру;
- все формулы должны быть пронумерованы, номер формулы выравнивать по правому краю и заключать в скобки.

5. Рисунки:

- все рисунки должны быть подписаны по форме: «Рисунок 1 – Название»;

- рисунки вместе с подрисуночной надписью выравниваются по центру страницы без абзацного отступа;

- на все рисунки должна быть ссылка в тексте, например «...на рисунке 1 изображено...».

6. Таблицы:

- все таблицы должны быть подписаны по форме: «Таблица 1 – Название»;

- таблицы выравниваются по центру;

- названия таблиц располагаются над таблицей и выравниваются по левому краю страницы без абзацного отступа.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Справочные данные

Таблица Б.1

Приближенные значения сопротивлений двух- и трёхжильных кабелей на единицу длины¹

Площадь поперечного сеч. жилы кабеля $q_{кб}$, мм ²	Удельное активное сопротивление $r_{у.кб}$, мОм/м	Удельное индуктивное сопротивление $x_{у.кб}$, мОм/м
1,5	15,1	0,118
2,5	9,08	0,109
4	5,68	0,101
6	3,78	0,0955
10	2,27	0,0861
16	1,43	0,0817
25	0,907	0,0813
35	0,654	0,0783
50	0,483	0,0779
70	0,334	0,0751
95	0,241	0,0762
120	0,191	0,0740
150	0,157	0,0745
185	0,125	0,0742
240	0,0966	0,0752
300	0,078	0,0750

¹Значения сопротивлений в соответствии со справочником [13, с. 294].

**Приближенные значения активных сопротивлений
коммутационных аппаратов¹**

Номинальный ток I_n , А	Сопротивление полюса r_a , мОм
0,5	5500
1	1440
1,6	630
2	460
3	150
4	110
6	55
8	23
10	19
13	14
16	8,5
20	6,25
25	5,0
32	3,6
40	3,0
50	1,3
63	1,2
160	0,42
250	0,26
320	0,23
400	0,1
630	0,1
800	0,05
1000	0,05
1250	0,03
1600	0,03

¹Значения активных сопротивлений для номинальных токов до 63 А приведены в соответствии с [14, с. 10/104]. Для номинальных токов от 160 А в соответствии со значениями рассеиваемой мощности автоматических выключателей в литом корпусе с электронными расцепителями [15, с. 4/34], [16, с. 4/43].

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Листы проверки

Лист проверки раздела 1 Предварительные расчёты

Вариант по БАРС

Группа

Фамилия Имя

Расчётные токи, А							Сечения кабелей, мм ²			
$I_{n.T1}$	$I_{n.M1}$	$I_{s.M1}$	$I_{p.M1}$	$I_{B.к63}$	$I_{B.к66}$	$I_{B.к61}$	$q_{к61}$	$q_{к62}$	$q_{к63}$	$q_{к66}$

Примечание — При отсутствии КБ6 в соответствующих ячейках ставится «—»

Сопротивления кабелей, мОм								Падение напр., %			
$r_{к61}$	$x_{к61}$	$r_{к62}$	$x_{к62}$	$r_{к63}$	$x_{к63}$	$r_{к66}$	$x_{к66}$	Δu_2	Δu_3	Δu_4	$\Delta u_{s.2}$

Сопротивления КЗ до расчётной точки, мОм									
0		1		2		3		4	
$r_{\Sigma 0}$	$x_{\Sigma 0}$	$r_{\Sigma 1}$	$x_{\Sigma 1}$	$r_{\Sigma 2}$	$x_{\Sigma 2}$	$r_{\Sigma 3}$	$x_{\Sigma 3}$	$r_{\Sigma 4}$	$x_{\Sigma 4}$

Токи короткого замыкания в расчётной точке, кА					
0	1		2	3	4
$I_{к0}^{(1)}$	$I_{к1}^{(1)}$	$I_{к1}^{(3)}$	$I_{к2}^{(1)}$	$I_{к3}^{(1)}$	$I_{к4}^{(1)}$

Лист проверки раздела 2

Выбор электрических аппаратов

Вариант по БАРС

Группа

Фамилия Имя

$QF2$			$FD1$				$FD4$			
I_n	I_{cn}	Тип ¹	I_n	I_{cn} ²	$I_{\Delta n}$	Тип ^{1,2}	I_n	I_{cn}	$I_{\Delta n}$	Тип ¹
A	кА	—	A	кА	мА	—	A	кА	мА	—

¹Указывается тип характеристик мгновенного расцепления B , C или D .

²В вариантах схем однофазной нагрузки, в которых $FD1$ — это ВДТ, ставится «—».

$QF1$				КМ1	$KK1$ ²				QS1
$I_{n.M1}$	$I_{r.min}$ ¹	$I_{r.max}$ ¹	I_r ^{1,3}	I_n	I_n	$I_{r.min}$	$I_{r.max}$	I_r ³	I_n
A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

¹Если в варианте задания $QF1$ не снабжён тепловым расцепителем, то в ячейке ставится «—».

²Если в варианте задания $KK1$ отсутствует, то в ячейках ставятся «—».

³Указывается конкретное значение настройки I_r , входящие в диапазон $I_{r.min} \dots I_{r.max}$ и равное или немного меньшее $I_{n.M1}$.

$QF10$							$QF11$						
I_n	I_r	t_r	X ¹	I_{sd}	t_{sd}	I_i ²	I_n	I_r	t_r	X ¹	I_{sd}	t_{sd}	I_i ²
A	A	с	—	кА	мс	кА	A	A	с	—	кА	мс	кА

¹Кратность тока, соответствующая времени срабатывания t_r (см. рис. 2.11 и табл. 2.10 на стр. 92).

²Указывается при активированной функции I , если у функция I не активирована, то в ячейке указывается «—».

Чек-лист для самопроверки раздела 3 Чертёж общего вида НКУ

1	Все аппараты на чертеже соответствуют выбранным в РПЗ	
2	Все линии чертежа 100 % чёрные и имеют достаточную толщину. Всего на чертеже применяется не более двух толщин линий (толстая и тонкая)	
3	Указаны габаритные размеры шкафа	
4	При наличии болта заземления указан его установочный размер	
5	Корректно показан местный разрез у болта или шпильки заземления	
6	Цепь управления собрана в соответствии с заданием. Все соединения в ней понятны и легко различимы	
7	Подписаны контакты теплового реле и вспомогательные контакты контактора, и их расположение соответствует реальному	
8	Соединительные провода внутри НКУ расположены чётко по центру тех клемм, к которым они подключаются	
9	Проставлены позиции ко всем элементам чертежа, кроме повторяющихся	
10	На чертеже имеется таблица с позициями и их расшифровкой, включающей буквенно-цифровое обозначение аппарата в соответствии с однолинейной схемой и его модель	
11	Шрифты соответствуют ГОСТ и все надписи чётко различимы	
12	В основной надписи указана Ваша фамилия и фамилия ведущего КП преподавателя, указана учебная группа, название чертежа, корректно указан масштаб. Размеры основной надписи в напечатанном виде соответствуют ГОСТ	

Вариант по БАРС

Группа

Фамилия Имя

Подпись

В пособии использовались термины согласно следующим действующим стандартам:

[ГОСТ 15845—2024](#) Изделия кабельные. Термины и определения.

[ГОСТ IEC 60947-3—2022](#) Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 3. Выключатели, разъединители, выключатели-разъединители и их комбинации с предохранителями.

[ГОСТ IEC 60947-2—2021](#) Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 2. Автоматические выключатели.

[ГОСТ IEC 60947-4-1—2021](#) Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 4-1. Контактторы и пускатели. Электромеханические контакторы и пускатели.

[ГОСТ IEC 60898-1—2020](#) Аппаратура малогабаритная электрическая. Автоматические выключатели для защиты от сверхтоков бытового и аналогичного назначения. Часть 1. Автоматические выключатели для переменного тока.

[ГОСТ IEC 61008-1—2020](#) Выключатели автоматические, управляемые дифференциальным током, бытового и аналогичного назначения без встроенной защиты от сверхтоков. Часть 1. Общие требования и методы испытаний.

[ГОСТ IEC 61009-1—2020](#) Выключатели автоматические, срабатывающие от остаточного тока, со встроенной защитой от тока перегрузки, бытовые и аналогичного назначения. Часть 1. Общие правила.

[ГОСТ IEC 60947-1—2017](#) Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 1. Общие правила.

[ГОСТ IEC 60269-1—2016](#) Предохранители плавкие низковольтные. Часть 1. Общие требования.

[ГОСТ IEC 60309-1—2016](#) Вилки, штепсельные розетки и соединительные устройства промышленного назначения. Часть 1. Общие требования.

[ГОСТ ИЕС 60947-7-1—2016](#) Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 7-1. Электрооборудование вспомогательное. Колодки клеммные для медных проводников.

[ГОСТ Р 57190—2016](#) Заземлители и заземляющие устройства различного назначения. Термины и определения.

[ГОСТ 14254—2015](#) Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP).

[ГОСТ ИЕС 60050-441—2015](#) Международный электротехнический словарь. Часть 441. Аппаратура коммутационная, аппаратура управления и плавкие предохранители.

[ГОСТ ИЕС 60050-442—2015](#) Международный электротехнический словарь. Часть 442. Электрические аксессуары.

[ГОСТ ИЕС 60050-447—2014](#) Международный электротехнический словарь. Часть 447. Измерительные реле.

[ГОСТ ИЕС 61082-1—2014](#) Документы, используемые в электротехнике. Подготовка. Часть 1. Правила.

[ГОСТ ИЕС 61439-1—2013](#) Устройства комплектные низковольтные распределения и управления. Часть 1. Общие требования.

[ГОСТ ИЕС 62208—2013](#) Оболочки для низковольтных комплектных устройств распределения и управления. Общие требования.

[ГОСТ 30331.1—2013](#) Электроустановки низковольтные. Часть 1. Основные положения, оценка общих характеристик, термины и определения.

[ГОСТ Р 50571.4.43—2012](#) Электроустановки низковольтные. Часть 4-43. Требования по обеспечению безопасности. Защита от сверхтока.

[ГОСТ Р 50571.5.52—2011](#) Электроустановки низковольтные. Часть 5-52. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки.

[ГОСТ Р 50030.2—2010](#) Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 2. Автоматические выключатели.

[ГОСТ Р МЭК 60050-826—2009](#) Установки электрические. Термины и определения.

[ГОСТ Р МЭК 60050-195—2005](#) Заземление и защита от поражения электрическим током. Термины и определения.

[ГОСТ Р 52002—2003](#) Электротехника. Термины и определения основных понятий.

[ГОСТ 30830—2002](#) Трансформаторы силовые. Часть 1. Общие положения.

[ГОСТ Р МЭК 60073—2000](#) Интерфейс человекомашинный. Маркировка и обозначения органов управления и контрольных устройств. Правила кодирования информации.

ГОСТ 24291—90 Электрическая часть электростанции и электрической сети. Термины и определения.

ГОСТ 12139—84 Машины электрические вращающиеся. Ряды номинальных мощностей, напряжений и частот.

ГОСТ 4860.1—83 Сальники для электрических кабелей и проводов. Технические условия.

ГОСТ 16110—82 Трансформаторы силовые. Термины и определения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрические и электронные аппараты: учебник и практикум для академического бакалавриата / под ред. П. А. Курбатова. — М.: Издательство Юрайт, 2025. — ISBN 978-5-534-00953-8. — URL: <https://urait.ru/bcode/560567> (дата обр. 24.09.2025).
2. ЕКФ. Мастер каталог. — 2025. — URL: <https://cloud.mail.ru/public/KUTM/QFNjkakHT> (дата обр. 17.09.2025).
3. KEAZ Optima. Каталог электротехнической продукции. — 2025. — URL: <https://cloud.mail.ru/public/Ee41/b53c77tXS> (дата обр. 17.09.2025).
4. TDM ELECTRIC. — 2023. — URL: <https://cloud.mail.ru/public/ycue/KSQwe8iQz> (дата обр. 17.09.2025).
5. IEK. Колодки клеммные ARMAFIX. — 2023. — URL: <https://cloud.mail.ru/public/SANt/dPTqARVmU> (дата обр. 17.09.2025).
6. КЭАЗ. Каталог электротехнической продукции. — 2025. — URL: <https://files.keaz.ru/f/5134/katalog-keaz.pdf> (дата обр. 17.09.2025).
7. IEK. Модульное оборудование ARMAT. — URL: <https://cloud.mail.ru/public/NYWA/oCByWEdAT> (дата обр. 17.09.2025).
8. Systeme electric. SystemePact ССВ Автоматические выключатели в литом корпусе на токи до 630 А. — URL: <https://cloud.mail.ru/public/ysym/HZZwhJXam> (дата обр. 17.09.2025).
9. Systeme electric. Воздушные автоматические выключатели на токи от 400 до 4000 А SystemePact АСВ. — 2025. — URL: <https://cloud.mail.ru/public/1QfU/k6DA6TqEY> (дата обр. 17.09.2025).
10. IEK. Металлические корпуса с монтажной панелью TITAN. — URL: <https://cloud.mail.ru/public/yBqU/aMgSxrVXW>.
11. IEK. Каталог электротехнической продукции. — 2022. — URL: <https://cloud.mail.ru/public/yoRi/F8nHXgN1w> (дата обр. 22.09.2025).

12. IEK. Клеммные колодки CY. ARMAFIX. — 2025. — URL: <https://cloud.mail.ru/public/oVUg/mHrNXkZcY>.
13. Оборудование для автоматизации. Справочник по электрооборудованию Устройства защиты и управления. Электрические устройства. — АBB, 2014. — URL: <https://cloud.mail.ru/public/4Zam/TQa9zYCNo> (дата обр. 06.10.2025).
14. System pro M compact и другие модульные устройства. Технический каталог. — АBB, 2016. — URL: <https://cloud.mail.ru/public/nCQj/Wvonxiulg> (дата обр. 06.10.2025).
15. Tmax XT. Низковольтные автоматические выключатели на номинальный ток до 250 А. Технический каталог. — АBB, 2017. — URL: <https://cloud.mail.ru/public/nYoF/SgNePpGSf> (дата обр. 06.10.2025).
16. Tmax. Низковольтные автоматические выключатели на номинальный ток до 1600 А. Технический каталог. — АBB, 2016. — URL: <https://cloud.mail.ru/public/Aabv/JX2kqeEYV> (дата обр. 06.10.2025).

Учебное электронное издание

Молоканов Олег Николаевич
Кузнецова Екатерина Александровна

Редактор Т. А. Феокистова

Для создания электронного издания применялись операционные системы *macOS* и *Windows*, а также следующее специализированное программное обеспечение: система компьютерной вёрстки $\text{\LaTeX}$ в составе дистрибутива *Tex Live*, текстовые редакторы *TeXstudio* и *Sublime Text*, библиотеки *Matplotlib* и *NumPy* для *Python*, а также *T-FLEX CAD*.

Для оформления пояснительной записки по проекту, разработанному по учебному пособию, рекомендуется использовать *Microsoft Word* или *LibreOffice Writer*. Для выполнения конструкторской части проекта целесообразно применять специализированные системы автоматизированного проектирования, такие как *T-FLEX CAD*, *nanoCAD* и КОМПАС-3D. Для построения карт селективности рекомендуется использовать *Microsoft Excel* или *LibreOffice Calc*.

Вёрстку в системе $\text{\LaTeX}$ выполнил канд. техн. наук. О. Н. Молоканов.

Дата подписания — 20.02.2026

Объём издания — 9,4 МБ

Тираж — 10 электронных оптических дисков *DVD-R*

Издательство МЭИ
111250, Москва, Красноказарменная, д. 14, стр. 1
izdatmpei@gmail.com