

**ОРГАНИЗАЦИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ  
(ОСЖД)**

I издание

Разработано экспертами Комиссии ОСЖД  
по инфраструктуре и подвижному составу  
23-25 мая 2016 г., Республика Польша, г. Варшава

Утверждено совещанием Комиссии ОСЖД  
по инфраструктуре и подвижному составу  
18-21 октября 2016 г., Комитет ОСЖД, г. Варшава

Дата вступления в силу: 21 октября 2016 г.

**P 641**

**МЕТОДИКА  
ВЫБОРА И ПРОВЕРКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ  
ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ И ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ В  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В**

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ЦЕЛЬ РЕКОМЕНДАЦИЙ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ.....	3
2. ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....	3
3. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	3
4. ВЫБОР ЗАЩИТНЫХ АППАРАТОВ В СЕТЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА....	3
4.2. Предварительный выбор защитного аппарата .....	4
4.3. Выбор защитной характеристики аппарата.....	5
4.4. Проверка отстройки от пусковых токов нагрузки.....	5
4.5. Проверка селективности срабатывания защитных аппаратов.....	5
4.6. Проверка чувствительности защитных аппаратов .....	6
4.7. Проверка быстродействия защитных аппаратов. ....	8
4.8. Проверка защитных аппаратов на отключающую способность и коэффициент мощности.....	10
5. ВЫБОР ЗАЩИТНЫХ АППАРАТОВ В СЕТЯХ ПОСТОЯННОГО И ВЫПРЯМЛЕННОГО ОПЕРАТИВНОГО ТОКА.....	10
5.2. Предварительный выбор защитного аппарата .....	11
5.3. Выбор защитной характеристики аппарата.....	11
5.4. Проверка отстройки от токов кратковременной нагрузки.....	11
5.5. Проверка селективности срабатывания защитных аппаратов.....	12
5.6. Проверка чувствительности защитных аппаратов .....	12
5.7. Проверка быстродействия защитных аппаратов .....	13
5.8. Проверка защитных аппаратов на отключающую способность и постоянную времени.....	14
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	14
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ПРИМЕР ВЫБОРА ЗАЩИТНЫХ АППАРАТОВ В ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ .....	15
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПРИМЕР ВЫБОРА ЗАЩИТНЫХ АППАРАТОВ В ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СИСТЕМЫ СИГНАЛИЗАЦИИ, ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ И БЛОКИРОВКИ .....	50
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПРИМЕР ВЫБОРА ЗАЩИТНЫХ АППАРАТОВ В СЕТИ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ .....	67

## **1. Цель рекомендаций и область применения**

1.1. Целью настоящей памятки является выработка единых рекомендаций выбора и проверки автоматических выключателей и предохранителей в следующих электроустановках:

- однофазных и трехфазных электрических сетях переменного тока напряжением до 1000 В;
- сетях постоянного и выпрямленного оперативного тока напряжением 220 В.

1.2. Областью применения настоящей памятки являются электрические сети напряжением до 1000 В.

## **2. Определения**

2.1. Защитный аппарат (ЗА) – аппарат, автоматически отключающий защищаемую электрическую цепь при ненормальных режимах.

2.2. Автоматический выключатель – механический коммутационный аппарат, способный включать, проводить и отключать токи при нормальных условиях цепи, включать и проводить токи в течение определенного промежутка времени и прерывать их при определенных аномальных условиях цепи, например, при коротких замыканиях.

2.3. Плавкий предохранитель – аппарат, который вследствие расплавления одного или нескольких специально спроектированных и рассчитанных элементов размыкает цепь, в которую он включен, отключая ток, превышающий заданное значение в течение достаточно продолжительного времени.

## **3. Общие рекомендации**

Выбор и проверка автоматических выключателей и плавких предохранителей осуществляется согласно следующим принципам:

- соответствие параметров ЗА и электроустановки по роду тока, номинальной частоте, числу полюсов, номинальному напряжению, номинальному току;
- несрабатывание ЗА в допустимых режимах работы электроустановки;
- отключение защищаемой цепи во всем диапазоне ожидаемых токов короткого замыкания;
- отключение повреждений в пределах защищаемой зоны;
- селективность отключения поврежденного участка сети;
- обеспечение термической стойкости и невозгораемости кабелей;
- обеспечение быстрого действия при отключении коротких замыканий.

## **4. Выбор защитных аппаратов в сетях переменного тока**

4.1.1. Выбор защитных аппаратов осуществляют в следующем порядке:

- производят предварительный выбор защитного аппарата по наибольшему рабочему напряжению, номинальному току, климатическому исполнению, категории размещения, категории вибростойкости; кроме перечисленного, автоматические выключатели выбирают по числу полюсов;
- выбирают защитную характеристику аппарата;
- проверяют отстройку от пусковых токов нагрузки;
- проверяют селективность защитных аппаратов;
- проверяют чувствительность защитных аппаратов;
- проверяют быстродействие защитных аппаратов;
- проверяют отключающую способность аппаратов и коэффициент мощности тока отключаемой цепи.

## 4.2. Предварительный выбор защитного аппарата

4.2.1. Выбор по наибольшему рабочему напряжению проводят по условию:

$$U_{\text{нб}} \geq U_{\text{нб.с}} \quad (4.1)$$

где  $U_{\text{нб}}$  – наибольшее допустимое напряжение защитного аппарата;

$U_{\text{нб.с}}$  – наибольшее рабочее напряжение сети.

4.2.2. Выбор номинального тока защитного аппарата,  $I_{\text{ном}}$ , проводят по условию:

$$I_{\text{н}} \geq I_{\text{р}} \quad (4.2)$$

где  $I_{\text{р}}$  – продолжительный расчетный ток, рассчитываемый по суммарной продолжительной нагрузке рассматриваемой цепи.

4.2.3. Продолжительный расчетный ток определяют по выражению:

$$I_{\text{р}} = I_{\text{пт.н}} + I_{\text{вр.н}} + 0,4 \cdot I_{\text{кр.н}} \quad (4.3)$$

где  $I_{\text{пт.н}}$  – суммарный ток постоянной нагрузки, протекающий через защитный аппарат, А;

$I_{\text{вр.н}}$  – суммарный ток временной нагрузки, протекающий через защитный аппарат, А;

$I_{\text{кр.н}}$  – ток наиболее мощной кратковременной нагрузки, протекающий через защитный аппарат, А.

4.2.4. Номинальный ток защитного аппарата должен удовлетворять условию:

$$I_{\text{н}} \leq I_{\text{д}} \quad (4.4)$$

где  $I_{\text{д}}$  – длительного допустимый ток проводника, находящегося в основной зоне защиты аппарата.

4.2.5. Если условие (4.4) не выполняется, то выбирают сечение проводника с большим значением длительно допустимого тока либо уменьшают номинальный ток аппарата путем снижения продолжительного расчетного тока за счет перераспределения нагрузки по цепям питания.

4.2.6. Климатическое исполнение, категорию размещения, категорию вибростойкости и другие параметры защитных аппаратов, обусловленные

местом установки защитного аппарата, выбирают в соответствии с требованиями нормативных документов.

### **4.3. Выбор защитной характеристики аппарата**

4.3.1. Защитную характеристику предохранителя предварительно принимают в соответствии с характером нагрузки защищаемой цепи:

- для статической нагрузки выбирают предохранители типа «*gG*»;
- для двигательной нагрузки выбирают предохранители типа «*gM*» или «*aM*».

4.3.2. Защитную характеристику автоматического выключателя предварительно выбирают по току срабатывания мгновенного расцепителя следующим образом: кратность тока срабатывания 10 и более раз при наличии в защищаемой цепи двигательной нагрузки, кратность тока срабатывания 5 и более раз в остальных случаях.

4.3.3. На первом и втором от источника уровнях защит возможно применение селективных автоматических выключателей с полупроводниковыми или микропроцессорными расцепителями.

### **4.4. Проверка отстройки от пусковых токов нагрузки**

4.4.1. Отстройку аппарата от пусковых токов нагрузки производят графическим способом путем сопоставления на диаграмме характеристик электроприемников и защитной характеристики защитного аппарата. При наличии в защищаемой цепи разделительных или повышающих трансформаторов графических построений не выполняют, а отстройку аппарата от пусковых токов выполняют с учетом отстройки от броска тока намагничивания трансформатора.

4.4.2. Отстройка обеспечивается, если характеристики электроприемников располагаются ниже и левее защитной характеристики аппарата с учетом её разброса.

4.4.3. Если отстройка не обеспечивается, то выполняют следующие мероприятия:

- выбирают предохранитель с большим номинальным током;
- увеличивают ток срабатывания мгновенного расцепителя автоматического выключателя;
- выбирают автоматический выключатель с большим номинальным током.

### **4.5. Проверка селективности срабатывания защитных аппаратов**

4.5.1. Проверку селективности защитных аппаратов, установленных последовательно, проводят попарно.

4.5.2. Селективность проверяют в общей для двух аппаратов зоне защиты; для нижестоящего аппарата общая зона защиты является основной, для вышестоящего – резервной.

4.5.3. Селективность защитных аппаратов обеспечивается, если защитная характеристика нижестоящего аппарата, расположена ниже и левее

защитной характеристики вышестоящего аппарата и не имеет пересечений с ней в диапазоне возможных токов короткого замыкания.

4.5.4. Расчетные условия для определения максимального тока короткого замыкания в трехфазных сетях переменного тока приведены в таблице 4.2, а для однофазных сетей переменного тока – в таблице 4.3.

4.5.5. Если селективность не обеспечивается, то изменяют расположение защитной характеристики вышестоящего аппарата увеличением тока срабатывания мгновенного расцепителя. Менее предпочтительным мероприятием является увеличение номинального тока аппарата, при этом, соблюдают условие (4.4).

4.5.6. Если одновременно обеспечить селективность и чувствительность защитного аппарата не удается, то селективностью пренебрегают, при условии, что для неселективно отключаемых электроприемников предусмотрены резервные цепи питания, АВР или на объектах постоянно находится дежурный персонал.

Таблица 4.2 – Расчетные условия для определения токов короткого замыкания для проверки селективности защитных аппаратов в трехфазных сетях

Расчетное условие	Максимальный ток КЗ
Расчетная точка КЗ	Начало зоны защиты
Расчетный вид КЗ	Трехфазное металлическое
Продолжительность КЗ	Начальный момент времени

Таблица 4.3 – Расчетные условия для определения токов короткого замыкания для проверки селективности защитных аппаратов в однофазных сетях

Расчетное условие	Максимальный ток КЗ
Расчетная точка КЗ	Начало зоны защиты
Расчетный вид КЗ	Металлическое
Продолжительность КЗ	Начальный момент времени

#### 4.6. Проверка чувствительности защитных аппаратов

4.6.1. Чувствительность плавкого предохранителя обеспечивается, если выполняются условия термической стойкости и невозгораемости защищаемых им проводников.

4.6.2. Чувствительность автоматического выключателя обеспечивается, если коэффициент чувствительности аппарата превышает 1,1. Коэффициент чувствительности рассчитывают по выражению:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.нм}}}{I_{\text{с.з.нб}}} \quad (4.5)$$

где  $I_{\text{кз.мин}}$  – минимальный ток короткого замыкания, А;

$I_{\text{ср.макс}}$  – максимальный ток срабатывания автоматического выключателя с учетом разброса его защитной характеристики, А.

4.6.3. Если задана кратность тока срабатывания мгновенного расцепителя  $k_{ср}$ , то максимальное значение тока срабатывания определяют по выражению:

$$I_{с.з.нб} = k_p \cdot k_{ср} \cdot I_H \quad (4.6)$$

где  $k_p$  – коэффициент, учитывающий разброс защитной характеристики аппарата, принимаемый равным 1,2.

4.6.4. Расчетные условия для определения минимального тока короткого замыкания приведены: для трехфазных сетей переменного тока – в таблице 4.4, для однофазных сетей переменного тока – в таблице 4.5.

4.6.5. Основная зона защиты автоматического выключателя и предохранителя начинается от выходных клемм аппарата и заканчивается на входных клеммах нижестоящего защитного аппарата или на клеммах электроприемника. Резервная зона защиты аппарата начинается от выходных клемм нижестоящего автоматического выключателя и заканчивается на входных клеммах защитного аппарата, следующего за нижестоящим уровнем или на клеммах электроприемника. Резервирование плавких предохранителей не требуется. Если нижестоящим аппаратом является предохранитель, то основная и резервная зоны проверяемого аппарата совпадают.

Таблица 4.4 – Расчетные условия для определения токов короткого замыкания для проверки чувствительности защитных аппаратов в трехфазных сетях

Расчетное условие	Минимальный ток КЗ
Расчетная точка КЗ	Конец зоны защиты
Расчетный вид КЗ	Однофазное дуговое
Продолжительность КЗ	Начальный момент времени

Таблица 4.5 – Расчетные условия для определения токов короткого замыкания для проверки чувствительности защитных аппаратов в однофазных сетях

Расчетное условие	Минимальный ток КЗ
Расчетная точка КЗ	Конец зоны защиты
Расчетный вид КЗ	Дуговое
Продолжительность КЗ	Начальный момент времени

4.6.6. Если чувствительность автоматического выключателя не обеспечивается, то выполняют следующие мероприятия, в порядке приоритетности:

- выбирают аппарат с меньшим током срабатывания;
- выбирают аппарат с меньшим номинальным током;
- увеличивают минимальный ток КЗ путем увеличения сечения кабелей в основной или резервной зонах защиты.

4.6.7. Если одновременно обеспечить селективность и чувствительность автоматического выключателя не удастся, то допускают отключение коротких замыканий в конце основной или резервной зонах защиты тепловым расцепителем аппарата, при отсутствии электроприемников, чувствительных к продолжительным провалам напряжения.

#### 4.7. Проверка быстродействия защитных аппаратов

4.7.1. Проверка быстродействия автоматических выключателей и предохранителей состоит из двух частей:

- проверки термической стойкости и невозгораемости проводников в зонах защит;
- проверки по провалам напряжения.

4.7.2. Термическая стойкость и невозгораемость проводников обеспечена, если расчетные температуры проводников к моменту отключения короткого замыкания не превышают предельно допустимых значений.

4.7.3. Предельно допустимые температуры по условиям термической стойкости проводников:

- 160 °С для проводников с поливинилхлоридной изоляцией;
- 200 °С для проводников с бумажно-масляной изоляцией;
- 250°С для проводников с изоляцией из сшитого полиэтилена.

4.7.4. Предельно допустимые температуры по условиям невозгораемости проводников:

- 350 °С для проводников с поливинилхлоридной изоляцией;
- 400 °С для проводников с бумажно-масляной и изоляцией из сшитого полиэтилена.

4.7.5. Температуру нагрева проводников при протекании тока короткого замыкания определяют при расчетных условиях, таблицы 4.6 – 4.9. Для проверки выбирают большее значение температуры.

Таблица 4.6 – Расчетные условия для проверки проводников трехфазных сетей переменного тока на термическую стойкость

Расчетное условие	Набор 1	Набор 2
Расчетная точка КЗ	Начало КЛ	Конец КЛ
Расчетный вид КЗ	Трехфазное дуговое	Трехфазное металлическое
Продолжительность КЗ	Максимальное время срабатывания основного защитного аппарата	

Таблица 4.7 – Расчетные условия для проверки проводников трехфазных сетей переменного тока на невозгораемость

Расчетные условия	Набор 1	Набор 2
Расчетная точка КЗ	Начало КЛ	Конец КЛ
Расчетный вид КЗ	Трехфазное дуговое	Трехфазное металлическое
Продолжительность КЗ	Максимальное время срабатывания резервного защитного аппарата	

Таблица 4.8 – Расчетные условия для проверки проводников однофазных сетей переменного тока на термическую стойкость

Расчетное условие	Набор 1	Набор 2
Расчетная точка КЗ	Начало КЛ	Конец КЛ
Расчетный вид КЗ	Дуговое	Металлическое

Продолжительность КЗ	Максимальное время срабатывания основного защитного аппарата
----------------------	--------------------------------------------------------------

Таблица 4.9 – Расчетные условия для проверки проводников однофазных сетей переменного тока на невозгораемость

Расчетные условия	Набор 1	Набор 2
Расчетная точка КЗ	Начало КЛ	Конец КЛ
Расчетный вид КЗ	Дуговое	Металлическое
Продолжительность КЗ	Максимальное время срабатывания резервного защитного аппарата	

4.7.6. Времена срабатывания основного и резервного защитных аппаратов определяют по защитной характеристике аппарата с учетом разброса в сторону больших продолжительностей срабатывания.

4.7.7. Если термическая стойкость или невозгораемость проводников не обеспечивается, то увеличивают сечение проводника на одну ступень и повторяют процедуры выбора.

4.7.8. Если увеличение сечения проводника более чем на две ступени относительно предварительно выбранного значения не обеспечивает термическую стойкость или невозгораемость проводника, то уменьшают время срабатывания защитного аппарата или рассматривают другое место подключения проводника с меньшим уровнем токов короткого замыкания.

4.7.9. Проверку по провалам напряжения производят сопоставлением расчетных значений остаточного напряжения и продолжительности провала напряжения с нормативно допустимыми значениями. Провалы напряжения считают удовлетворительными, если остаточное напряжение на клеммах электроприемников неповрежденных присоединений составляет не менее 0,7 номинального напряжения при продолжительности провала не более 1 с и не менее 0,4 номинального напряжения при продолжительности провала не более 0,02 с. Могут применяться другие допустимые параметры провалов напряжения, соответствующие технической документации на электроприемники.

4.7.10. Остаточное напряжение на клеммах электроприемников неповрежденных присоединений рассчитывают по выражению:

$$U_{\text{ост}} = U_{\text{н}} - I_{\text{кз}} \cdot Z_{\text{кз}} \quad (4.7)$$

где  $U_{\text{н}}$  – номинальное напряжение электроустановки, В

$I_{\text{кз}}$  – ток короткого замыкания, А;

$Z_{\text{кз}}$  – сопротивление цепи от питающих шин до места КЗ, Ом.

4.7.11. Ток короткого замыкания, для определения провалов напряжения, рассчитывают в соответствии с действующими нормативными методиками, при расчетных условиях, приведенных в таблицах 4.6 и 4.8.

4.7.12. Продолжительность провала напряжения принимают по среднему значению продолжительности короткого замыкания, определенному по защитной характеристике защитного аппарата.

#### **4.8. Проверка защитных аппаратов на отключающую способность и коэффициент мощности**

4.8.1. Проверка на отключающую способность состоит в сопоставлении паспортного значения отключающей способности защитного аппарата и расчетного максимального сквозного тока короткого замыкания. Если расчетный ток короткого замыкания превышает отключающую способность, то выбирают аппарат с большей отключающей способностью.

4.8.2. Максимальный сквозной ток короткого замыкания рассчитывают по металлическому короткому замыканию на вводных, со стороны источника, клеммах проверяемого аппарата.

4.8.3. Проверка коэффициента мощности короткозамкнутой цепи производит сопоставлением расчетного с нормированным допустимым значением коэффициента мощности отключаемого тока. Если расчетное значение ниже нормированного, то выбирают аппарат с большей отключающей способностью, характеризующийся меньшим нормированным коэффициентом мощности.

4.8.4. Расчетное место КЗ для проверки коэффициента мощности отключаемого тока расположено на входных клеммах проверяемого аппарата.

4.8.5. Расчетный коэффициент мощности отключаемого тока определяют по выражению:

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (4.8)$$

где  $R$  – активное сопротивление цепи от питающих сборок до клемм проверяемого аппарата, Ом;

$X$  – индуктивное сопротивление цепи от питающих сборок до клемм проверяемого аппарата, Ом.

4.8.6. При расчете сопротивлений питающей сети учитывают эквивалентное сопротивления системы, трансформаторов собственных нужд и распределительной сети.

### **5. Выбор защитных аппаратов в сетях постоянного и выпрямленного оперативного тока**

5.1.1. Выбор защитных аппаратов осуществляют в следующем порядке:

- производят предварительный выбор защитного аппарата по наибольшему рабочему напряжению, номинальному току, числу полюсов автоматического выключателя, климатическому исполнению, категории размещения, категории виброустойчивости;
- выбирают защитную характеристику аппарата;
- проверяют отстройку от пусковых токов нагрузки;
- проверяют селективность защитных аппаратов;
- проверяют чувствительность защитных аппаратов;
- проверяют быстрдействие защитного аппарата;
- проверяют отключающую способность и постоянную времени защищаемой цепи.

## 5.2. Предварительный выбор защитного аппарата

5.2.1. Рассматриваемые защитные аппараты должны быть предназначены для работы в сети постоянного тока.

5.2.2. Выбор по наибольшему рабочему напряжению проводят по условию (4.1).

5.2.3. Выбор номинального тока защитного аппарата,  $I_n$ , проводят по условию (4.2).

5.2.4. Для защитного аппарата в цепи зарядного устройства в системах оперативного постоянного тока тяговых подстанций продолжительный расчетный ток определяют по выражению:

$$I_p = 1,15 \cdot I_{нзу} \quad (4.9)$$

где  $I_{нзу}$  – номинальный ток на выходе зарядного устройства.

5.2.5. Номинальный ток защитного аппарата  $I_n$  должен удовлетворять условию (4.4). Если условие (4.4) не выполняется, то выбирают сечение проводника с большим значением длительно допустимого тока либо уменьшают номинальный ток аппарата путем снижения продолжительного расчетного тока за счет перераспределения нагрузки по цепям питания.

5.2.6. Климатическое исполнение, категорию размещения, категорию вибростойкости и другие параметры защитных аппаратов, обусловленные местом установки защитного аппарата, выбирают в соответствии с требованиями действующих нормативных документов.

## 5.3. Выбор защитной характеристики аппарата

5.3.1. Для плавких вставок предохранителей предварительно выбирают защитную характеристику типа «gG», соответствующую номинальному току плавкой вставки.

5.3.2. Защитную характеристику автоматического выключателя предварительно выбирают по току срабатывания мгновенного расцепителя следующим образом: кратность тока срабатывания 10 и более раз при наличии в защищаемой цепи двигательной нагрузки, кратность тока срабатывания 5 и более раз в остальных случаях.

5.3.3. На втором от источника уровне защиты в СОПТ тяговых подстанций и на первом уровне защиты систем выпрямленного оперативного тока возможно применение селективных автоматических выключателей с полупроводниковым или микропроцессорным расцепителем.

## 5.4. Проверка отстройки от токов кратковременной нагрузки

5.4.1. Проверку отстройки аппарата от пусковых токов нагрузки производят графическим способом путем сопоставления характеристик электроприемников и защитной характеристики аппарата.

5.4.2. Отстройка обеспечивается, если характеристики электроприемников располагаются ниже и левее защитной характеристики аппарата.

5.4.3. Если проверка не выполняется, выполняют мероприятия, приведенные в п. 4.4.3.

## **5.5. Проверка селективности срабатывания защитных аппаратов**

5.5.1. Проверку селективности защитных аппаратов, установленных последовательно, проводят попарно.

5.5.2. Селективность проверяют в общей для двух аппаратов зоне защиты; для нижестоящего аппарата общая зона защиты является основной, для вышестоящего – резервной.

5.5.3. Проверка селективности защитных аппаратов выполняется в случае, если защитная характеристика нижестоящего аппарата, с учетом разброса, расположена ниже и левее характеристики вышестоящего аппарата и не имеет пересечений с ней в диапазоне возможных токов короткого замыкания.

5.5.4. Расчетные условия для определения максимального тока короткого замыкания аналогичны расчетным условиям для однофазной сети переменного тока и приведены в таблице 4.3.

5.5.5. Если селективность не обеспечивается, то изменяют расположение защитной характеристики вышестоящего аппарата увеличением тока срабатывания мгновенного расцепителя. Менее предпочтительным мероприятием является увеличение номинального тока аппарата, при этом, соблюдают условие (4.4).

5.5.6. Если одновременно обеспечить селективность и чувствительность защитного аппарата не удастся, то селективностью пренебрегают, при условии, что для неселективно отключаемых электроприемников предусмотрены резервные цепи питания, АВР или на объектах постоянно находится дежурный персонал.

## **5.6. Проверка чувствительности защитных аппаратов**

5.6.1. Чувствительность плавкого предохранителя обеспечивается, если выполняются условия обеспечена термической стойкости и невозгораемости защищаемых им проводников.

5.6.2. Чувствительность автоматического выключателя обеспечивается, если коэффициент чувствительности превышает 1,1. Коэффициент чувствительности рассчитывают согласно (4.5).

5.6.3. При определении минимальных токов КЗ в СОПТ тяговых подстанций вводят следующие дополнения в расчетные условия:

- увеличивают внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи в 1,5 раза для учета минимальной температуры помещений с аккумуляторной батареей, старения характеристик и разряженного состояния аккумуляторной батареи;
- отключают все выпрямители СОПТ, подпитывающие место короткого замыкания.

5.6.4. Если проверка на чувствительность автоматического обеспечивается, то выполняют мероприятия в соответствии с п. 4.6.6.

5.6.5. Если одновременно обеспечить селективность и чувствительность автоматического выключателя не удастся, то допускают отключение коротких замыканий в конце основной или резервной зонах защиты тепловым

расцепителем аппарата, при отсутствии электроприемников, чувствительных к продолжительным провалам напряжения.

## **5.7. Проверка быстродействия защитных аппаратов**

5.7.1. Проверка быстродействия автоматических выключателей и предохранителей состоит из двух частей:

- проверки термической стойкости и невозгораемости защищаемых ими проводников;
- проверки по провалам напряжения.

5.7.2. Проверка термической стойкости и невозгораемости проводников выполняется, если расчетные температуры проводников к моменту отключения короткого замыкания не превышают предельно допустимых значений.

5.7.3. Предельно допустимые температуры по условиям термической стойкости и невозгораемости проводников приведены в п. 4.7.5.

5.7.4. Температуру нагрева проводников при протекании тока короткого замыкания рассчитывают при двух наборах расчетных условий, таблицы 4.6, 4.7. Для проверки выбирают большее значение температуры.

5.7.5. Времена срабатывания основного и резервного защитных аппаратов принимают по защитной характеристике аппарата с учетом разброса в сторону больших продолжительностей.

5.7.6. Если проверки на термическую стойкость или невозгораемость проводников не выполняются, то увеличивают сечение проводника на одну ступень и повторяют процедуры выбора.

5.7.7. Если увеличение сечения проводника более чем на две ступени относительно предварительно выбранного значения не обеспечивает термическую стойкость или невозгораемость проводника, то уменьшают время срабатывания защитного аппарата или рассматривают другое место подключения проводника с меньшим уровнем токов короткого замыкания.

5.7.8. Проверку по провалам напряжения производят сопоставлением расчетных значений остаточного напряжения и продолжительности провала напряжения с нормативно допустимыми значениями. Провалы напряжения считают удовлетворительными, если остаточное напряжение на клеммах электроприемников неповрежденных присоединений составляет не менее 0,7 номинального напряжения при продолжительности провала не более 1 с и не менее 0,4 номинального напряжения при продолжительности провала не более 0,1 с. Могут применяться другие допустимые параметры провалов напряжения, соответствующие технической документации на электроприемники.

5.7.9. Остаточное напряжение на клеммах электроприемников неповрежденных присоединений рассчитывают по выражению (4.7).

5.7.10. Ток короткого замыкания для определения провалов напряжения рассчитывают действующим нормативным методикам при расчетных условиях, аналогичных расчетным условиям для проверки термической стойкости проводников в однофазных сетях и приведенных в таблице 4.6.

5.7.11. Продолжительность провала напряжения принимают по среднему значению продолжительности короткого замыкания, определенному по защитной характеристике защитного аппарата.

## 5.8. Проверка защитных аппаратов на отключающую способность и постоянную времени

5.8.1. Проверка защитных аппаратов на отключающую способность состоит в сопоставлении паспортного значения отключающей способности защитного аппарата и расчетного максимального сквозного тока короткого замыкания. Если расчетный ток короткого замыкания превышает отключающую способность, то выбирают аппарат с большей отключающей способностью.

5.8.2. Максимальный сквозной ток короткого замыкания рассчитывают по металлическому короткому замыканию на входных клеммах проверяемого аппарата.

5.8.3. Проверка постоянной времени короткозамкнутой цепи производят сопоставлением расчетного с нормированным значением коэффициента мощности отключаемого тока. Если расчетное значение ниже нормированного, то выбирают аппарат с большей отключающей способностью, характеризующийся меньшим нормированным коэффициентом мощности.

5.8.4. Расчетную постоянную времени короткозамкнутой цепи определяют по выражению:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (4.10)$$

где  $L$  – индуктивность цепи от питающих сборок до клемм проверяемого аппарата, Гн;

$R$  – активное сопротивление цепи от питающих сборок до клемм проверяемого аппарата, Ом.

5.8.5. При расчете активного сопротивления и индуктивности учитывают проводники от АБ до входных клемм проверяемого аппарата.

## 6. Заключение

На основании формализованных принципов разработаны рекомендации по выбору автоматических выключателей и плавких предохранителей в электрических сетях напряжением до 1000 В. Учтены факторы, влияющие на параметры защитных аппаратов, на основе анализа режимов работы электроустановок определены расчетные условия, сформулированы критерии выбора и проверки защитных аппаратов.

**Приложение 1. Пример выбора защитных аппаратов в трехфазной сети переменного тока собственных нужд тяговой подстанции**

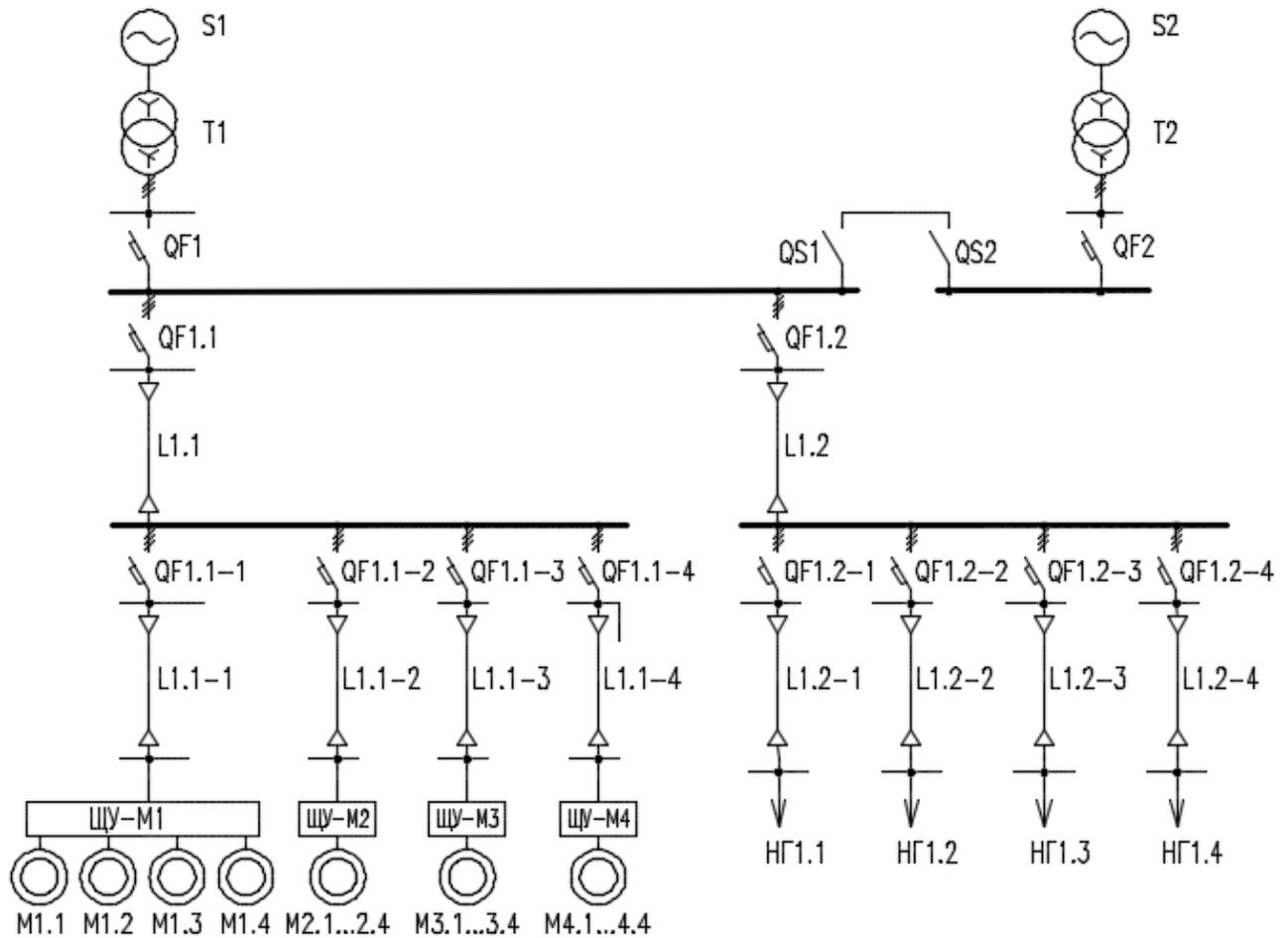


Рисунок П1.1 – Расчетная схема электроустановки

**Исходные данные:**

Сетевые источники:

$S1$	$U_{\text{ср.ном}} = 10,5 \text{ кВ}; I_{\text{откл.ном}} = 11 \text{ кА}; X_1/R_1 = 20.$
$S2$	$U_{\text{ср.ном}} = 10,5 \text{ кВ}; I_{\text{откл.ном}} = 6 \text{ кА}; X_1/R_1 = 20.$

Трансформаторы:

$T1$	ТСЗ – 250/10; схема соединения обмоток Y/Y <sub>0</sub> ; $S_{\text{ном}} = 250 \text{ кВ}\cdot\text{А}; U_{\text{ВН}} = 10,0 \text{ кВ}; U_{\text{НН}} = 0,4 \text{ кВ};$ $\Delta P_{\text{к}} = 3,8 \text{ кВт}; U_{\text{к}} = 5,5 \text{ \%}.$
------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

$T2$	ТСЗ – 250/10; схема соединения обмоток $\Delta/Y_0$ ; $S_{\text{ном}} = 250 \text{ кВ}\cdot\text{А}; U_{\text{ВН}} = 10,0 \text{ кВ}; U_{\text{НН}} = 0,4 \text{ кВ};$ $\Delta P_{\text{к}} = 3,8 \text{ кВт}; U_{\text{к}} = 5,5 \text{ \%}.$
------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Кабельные линии:

$L1.1-1,$	ВВГнг-LS – 5×1,5; $R_{\text{лиог}} = 11,76 \text{ мОм/м}; X_{\text{лиог}} = 0,12 \text{ мОм/м};$
$L1.1-2,$	изоляция поливинилхлоридная

- L1.1-3,  $L_1 = 5$  м;  $L_2 = 10$  м;  $L_3 = 15$  м;  $L_4 = 20$  м  
L1.1-4
- L1.1 ВВГнг-LS – 5×2,5;  $R_{\text{пог}} = 7,05$  мОм/м;  $X_{\text{пог}} = 0,12$  мОм/м;  
 $L = 50$  м; изоляция поливинилхлоридная
- L1.2-1, ВВГнг-LS – 5×1,5;  $R_{\text{пог}} = 11,76$  мОм/м;  $X_{\text{пог}} = 0,12$  мОм/м;  
L1.2-2, изоляция поливинилхлоридная  
L1.2-3,  $L_1 = 5$  м;  $L_2 = 10$  м;  $L_3 = 15$  м;  $L_4 = 20$  м  
L1.2-4
- L1.2 ВВГнг-LS – 5×6;  $R_{\text{пог}} = 2,93$  мОм/м;  $X_{\text{пог}} = 0,11$  мОм/м;  
 $L = 50$  м; изоляция поливинилхлоридная

Группы асинхронных двигателей  $M1, M2, M3, M4$ :

4 группы по 4 асинхронных двигателя

$P_{\text{ном}} = 600$  Вт;  $U_{\text{ном}} = 380$  В;  $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,85$ ;  $I_{\text{п}}/I_{\text{ном}} = 7,0$ ;

$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}} = 2$ ;  $\eta_{\text{ном}} = 93,5$  %;  $s_{\text{ном}} = 1,7$  %.

Комплексная нагрузка:

НГ1.1, НГ1.2,  $P_{\text{ном}} = 5,0$  кВт;  $U_{\text{ном}} = 380$  В;  $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,85$ ;  $I_{\text{п}}/I_{\text{ном}} = 1,5$   
НГ1.3, НГ1.4

## П1.1 Выбор защитных аппаратов

П1.1.1 Выбор автоматических выключателей третьего уровня защиты:  
 $QF1.1-1 - QF1.1-4$

Продолжительный расчетный ток щита управления ЩУ-М1 двигателями  $M1.1, M1.2, M1.3, M1.4$  рассчитывают по выражению:

$$I_{\text{рМ1}} = \frac{P_{\text{НМ1}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НМ1}} \cdot \cos\varphi_{\text{НМ1}}} = \frac{4 \cdot 0,6}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85} = 4,3 \text{ А.}$$

Определяют номинальный ток автоматического выключателя  $QF1.1-1$ .

$$I_{\text{н}QF1.1-1} = 6 \text{ А} \geq I_{\text{рМ1}}.$$

Номинальный ток автоматического выключателя не должен превышать длительно допустимый ток защищаемого проводника  $L1.1-1$  который составляет 19 А и соответствует кабелю типа ВВГнг-LS-5х1,5.

Предварительно выбирают автоматический выключатель  $QF1.1-1$  с номинальным током 6 А и защитной характеристикой «D». Мощности групп двигателей  $M1, M2, M3, M4$  одинаковы, поэтому автоматические выключатели  $QF1.1-2, QF1.1-3$  и  $QF1.1-4$  принимают такими же, как и  $QF1.1-1$ .

П1.1.2 Выбор автоматического выключателя  $QF1.1$

Вычисляют продолжительный расчетный ток присоединения  $L1.1$  щита собственных нужд:

$$I_{\text{рL1.1}} = 4 \cdot I_{\text{рМ1}} = 4 \cdot 4,3 = 17,2 \text{ А.}$$

Определяют номинальный ток автоматического выключателя  $QF1.1$ .

$$I_{нQF1.1} = 20 \text{ А} \geq I_{рL1.1}.$$

Номинальный ток автоматического выключателя не должен превышать длительно допустимый ток защищаемого проводника  $L1.1$ , который составляет 25 А и соответствует кабелю типа ВВГнг-LS-5х2,5.

Предварительно выбирают автоматический выключатель  $QF1.1$  с номинальным током 20 А и защитной характеристикой «D».

П1.1.3 Выбор автоматических выключателей третьего уровня защиты:  $QF1.2-1 - QF1.2-4$

Вычисляют продолжительный расчетный ток комплексной нагрузки НГ1.1:

$$I_{рНГ1.1} = \frac{P_{нНГ1.1}}{\sqrt{3} \cdot U_{нНГ1.1} \cdot \cos \varphi_{нНГ1.1}} = \frac{5,0}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9} = 8,4 \text{ А}.$$

Определяют номинальный ток автоматического выключателя  $QF1.2-1$ .

$$I_{нQF1.2-1} = 10 \text{ А} \geq I_{рM1}.$$

Номинальный ток автоматического выключателя не должен превышать длительно допустимый ток защищаемого проводника  $L1.2-1$ , который составляет 19 А и соответствует кабелю типа ВВГнг-LS-5х1,5.

Предварительно выбирают автоматический выключатель  $QF1.2-1$  с номинальным током 10 А и защитной характеристикой «С». Мощности электроприемников НГ1.1 - НГ1.4 одинаковы, поэтому автоматические выключатели  $QF1.2-2$ ,  $QF1.2-3$ ,  $QF1.2-4$  принимают такими же, как и  $QF1.2-1$ .

П1.1.4 Выбор автоматического выключателя второго уровня защиты  $QF1.2$

Вычисляют продолжительный расчетный ток присоединения  $L1.2$  щита собственных нужд:

$$I_{рL1.2} = 4 \cdot I_{рНГ1.1} = 4 \cdot 8,4 = 33,6 \text{ А}.$$

Определяют номинальный ток автоматического выключателя  $QF1.2$ .

$$I_{нQF1.1} = 40 \text{ А} \geq I_{рНГ1.1}.$$

Номинальный ток автоматического выключателя не должен превышать длительно допустимый ток защищаемого проводника  $L1.2$ , который составляет 42 А, что соответствует кабелю типа ВВГнг-LS-5х6.

Предварительно выбирают автоматический выключатель  $QF1.2$  с номинальным током 40 А и защитной характеристикой «С».

П1.1.5 Выбор автоматических выключателей первого уровня защиты:  $QF1$ ,  $QF2$

Вычисляют наибольший рабочий ток, который можно протекать через аппараты, исходя из номинальной мощности трансформатора

$$I_{с1} = \frac{S_{нТ1}}{\sqrt{3}U_{нТ1}} = \frac{250кВА}{\sqrt{3} \cdot 380В} = 380,3 \text{ А}.$$

Предварительно выбраны автоматические выключатели  $QF1$ ,  $QF2$  с номинальным током 400 А и регулируемым током срабатывания.

## П1.2 Проверка отстройки аппаратов от пусковых токов

Для проверки следует построить характеристики пусковых токов электроприемников и защитную характеристику аппаратов.

### П1.2.1 Проверка автоматических выключателей $QF1.1-1 - QF1.1-4$

Кратность срабатывания электромагнитного расцепителя автоматического выключателя с защитной характеристикой «D» составляет от 10 до  $20 \cdot I_{ном}$ .

$$I_{ср.мин} = 60 \text{ A}; I_{ср.макс.} = 120 \text{ A}.$$

Значение пускового тока группы двигателей и защитная характеристика аппарата приведены на рисунке П1.2.

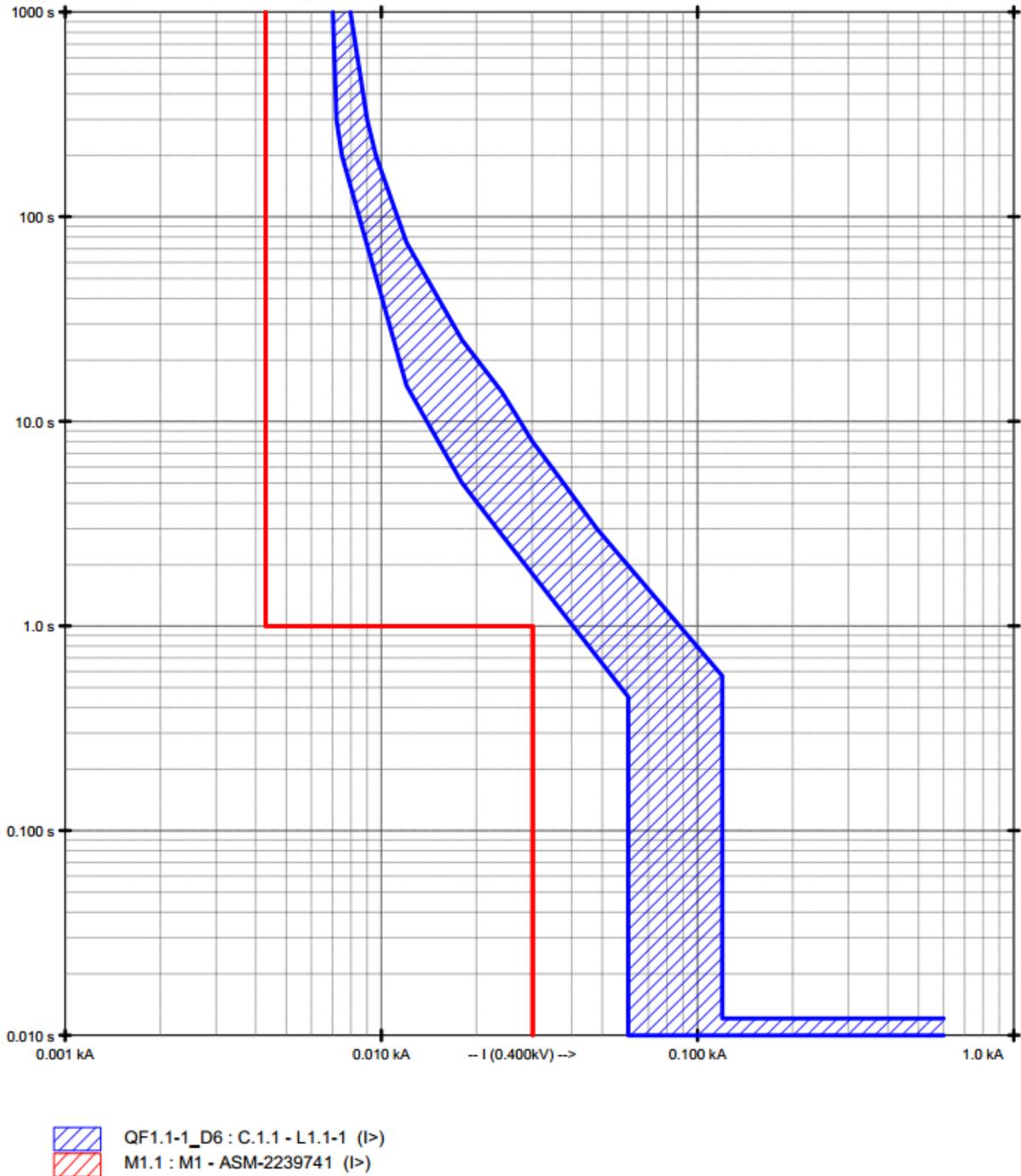


Рисунок П1.2 – Защитная характеристика автоматического выключателя QF1.1-1 типа «D» и график пускового тока группы асинхронных двигателей M1.1

Пусковой ток не превышает тока срабатывания автоматического выключателя. Разворот двигателей приведет к снижению потребляемого тока, что предотвратит срабатывание теплового расцепителя. Условия проверки отстройки от пусковых токов выполнены.

### П1.2.2 Выбор автоматического выключателя QF1.1

Кратность срабатывания электромагнитного расцепителя автоматического выключателя с защитной характеристикой «D» составляет от 10 до  $20 \cdot I_{\text{ном}}$ .

$$I_{\text{ср.мин}} = 200 \text{ А}; I_{\text{ср.макс.}} = 400 \text{ А.}$$

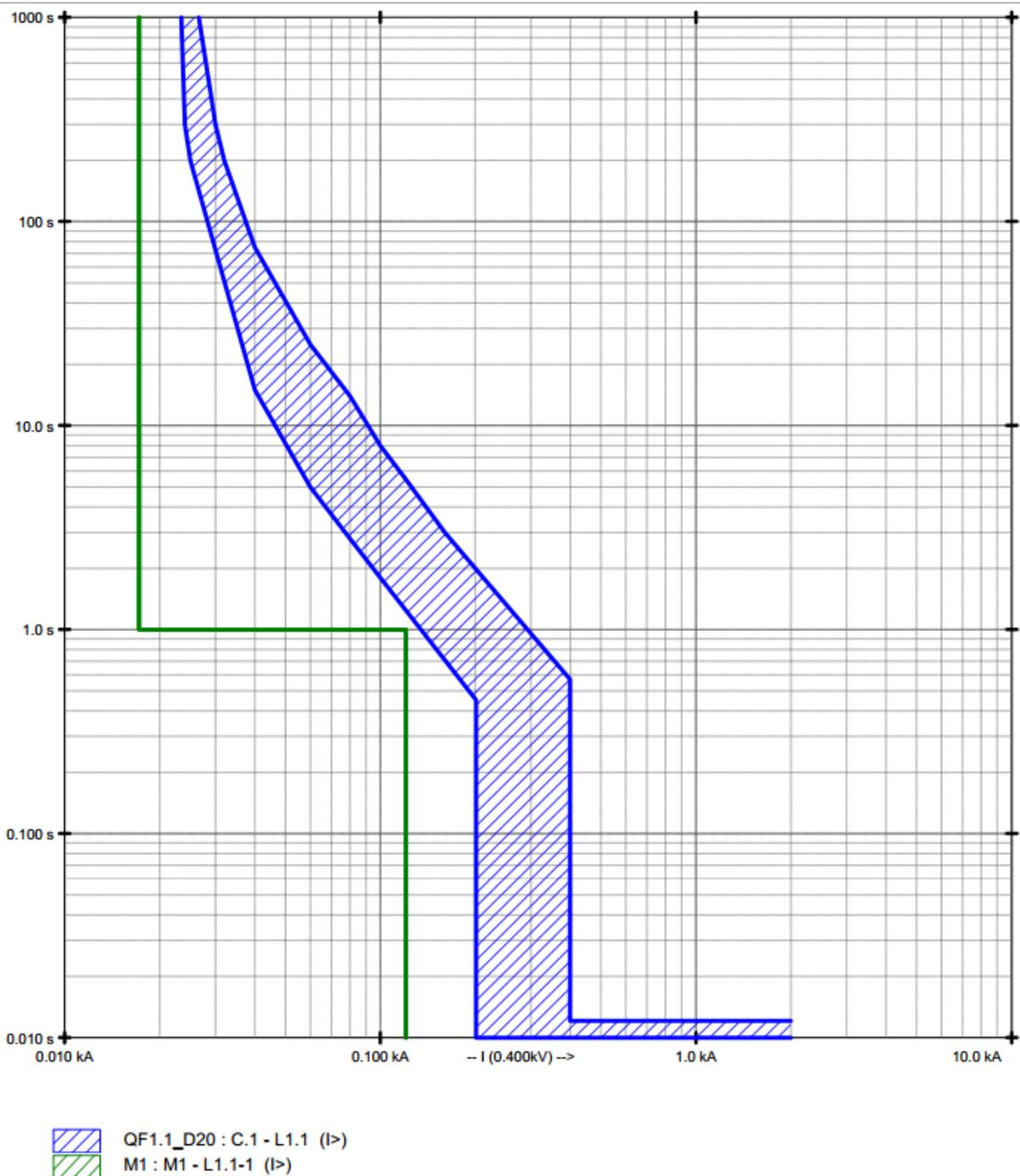


Рисунок П1.3 – Защитная характеристика автоматического выключателя  $QF1.1$  типа «D» и график пускового тока групп асинхронных двигателей М1.1-1.4

Условия проверки отстройки от пусковых токов выполнены.

### П1.2.3 Проверка автоматических выключателей $QF1.2-1 - QF1.2-4$

Кратность срабатывания электромагнитного расцепителя автоматического выключателя с защитной характеристикой «С» составляет от 5 до  $10 \cdot I_{\text{ном}}$ . Номинальный ток аппарата 10 А.

$$I_{\text{ср.мин.}} = 50 \text{ А}; I_{\text{ср.макс.}} = 100 \text{ А.}$$



 QF1.2-1\_C10 : C.1.2 - L1.2-1 (I>)
   
 НГ1.1 : Load1 - L-205 (I>)

Рисунок П1.4 – Защитная характеристика автоматического выключателя  $QF1.2-1$ , типа «С» и характеристика электроприемников пускового тока комплексной нагрузки НГ1.1

Условия проверки отстройки от пусковых токов выполнены.

#### П1.2.4 Проверка автоматического выключателя QF1.2

Кратность срабатывания электромагнитного расцепителя автоматического выключателя с защитной характеристикой «С» составляет от 5 до  $10 \cdot I_{\text{ном}}$ . Номинальный ток аппарата 40 А.

$$I_{\text{ср.мин.}} = 200 \text{ А}; I_{\text{ср.макс.}} = 400 \text{ А.}$$

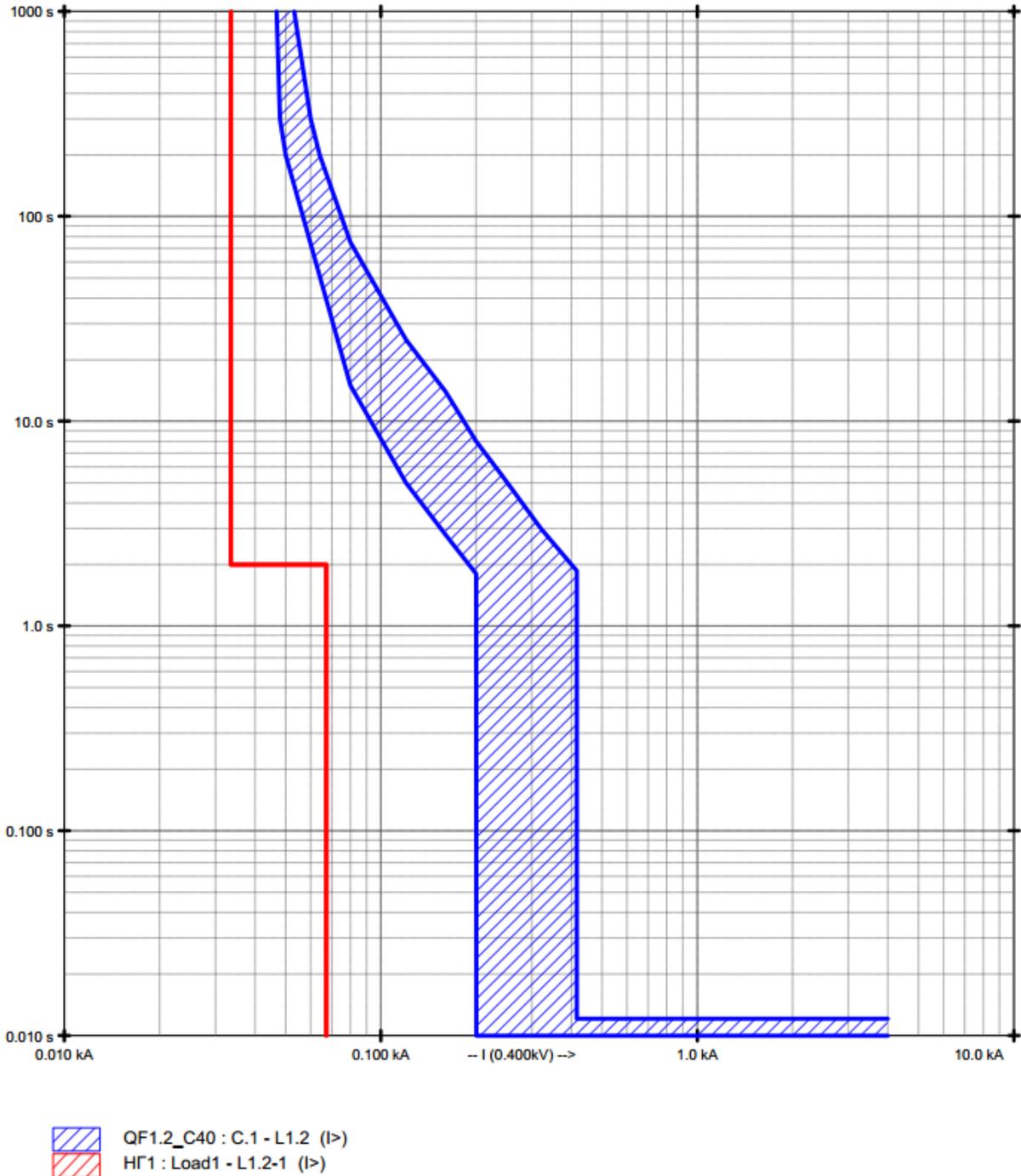


Рисунок П1.5 – Времятоковая характеристика автоматического выключателя QF1.2 типа «С» и характеристика электроприемников комплексных нагрузок НГ1.1 - НГ1.4

Условия проверки отстройки от пусковых токов выполнены.

### П1.2.5 Выбор автоматических выключателей $QF1, QF2$

Номинальный ток аппарата 400 А. Т.к. нагрузка комплексная, и автоматический выключатель имеет регулируемый комбинированный электронный расцепитель, уставку срабатывания мгновенного расцепителя с выдержкой времени предварительно выбирают равной  $5 \cdot I_{ном.}$ , уставку срабатывания мгновенного расцепителя без выдержки времени нерегулируемая и составляет 7500 А. Условия проверки автоматического выключателя  $QF2$  и  $QF1$  аналогичны.

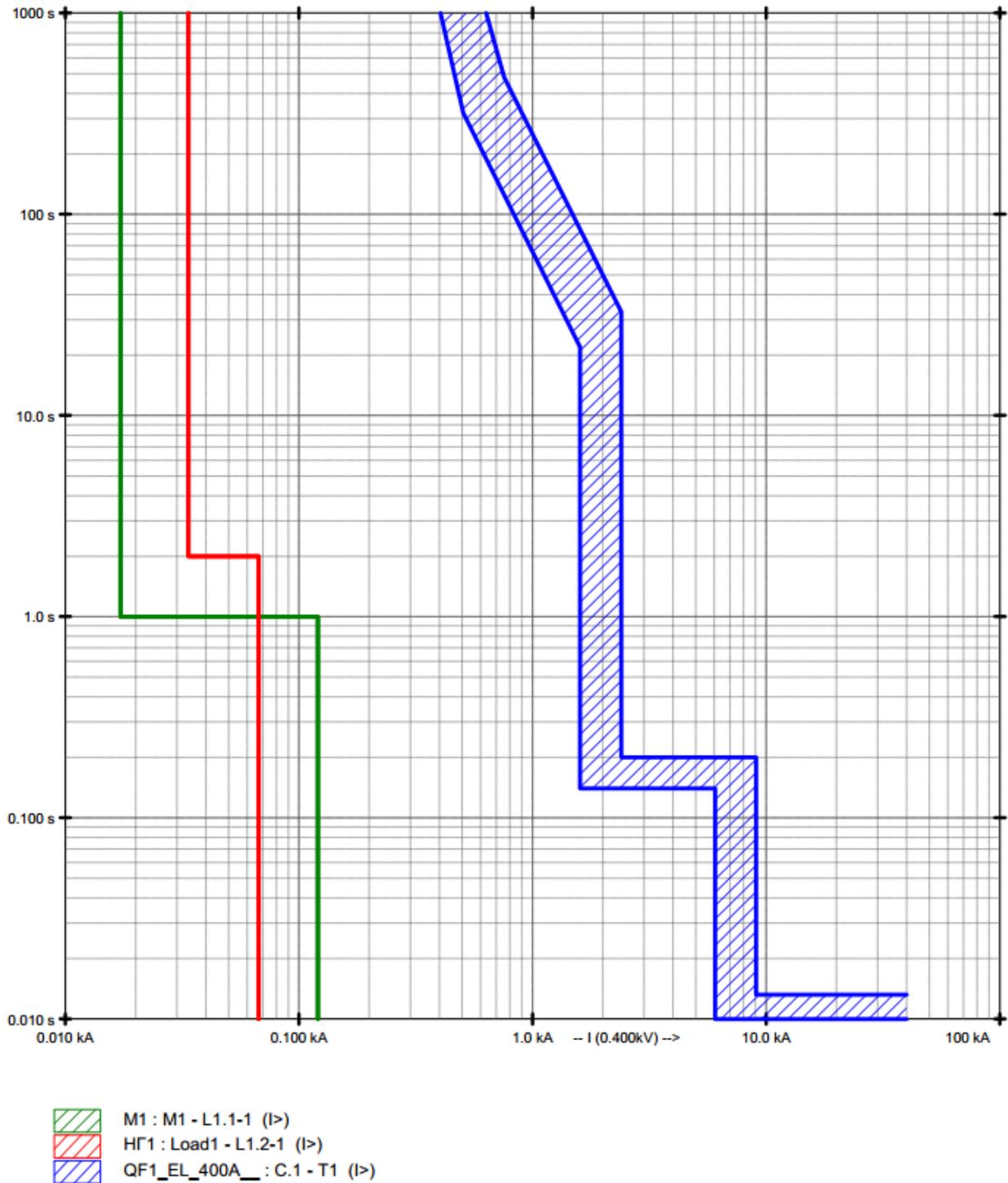


Рисунок П1.6 – Защитная характеристика автоматического выключателя  $QF1$  и характеристики электроприемников групп асинхронных двигателей М1-4 и комплексных нагрузок НГ1.1 - НГ1.4

Условия проверки отстройки от пусковых токов выполнены.

### П1.3 Проверка аппаратов на селективность

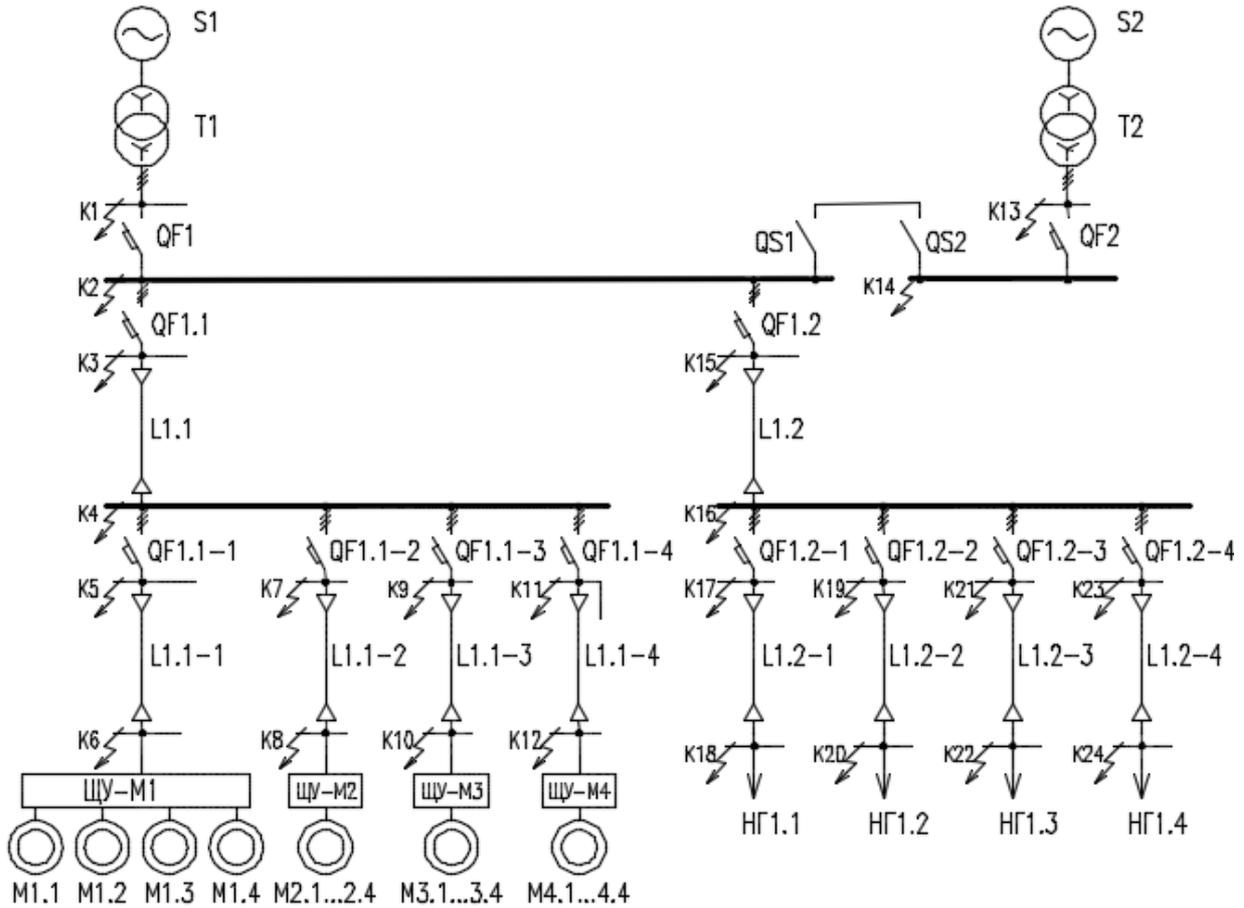


Рисунок П1.7 – Расчетная схема для расчета токов КЗ

Область ожидаемых токов КЗ ограничивается расчетным максимальным током КЗ, определенным в П1.3 при проверке отключающей способности нижестоящих аппаратов.

Защитных характеристики  $QF1.1$ ,  $QF1.2$  и нижестоящих автоматических выключателей представлены на рисунках П1.8, П1.9.

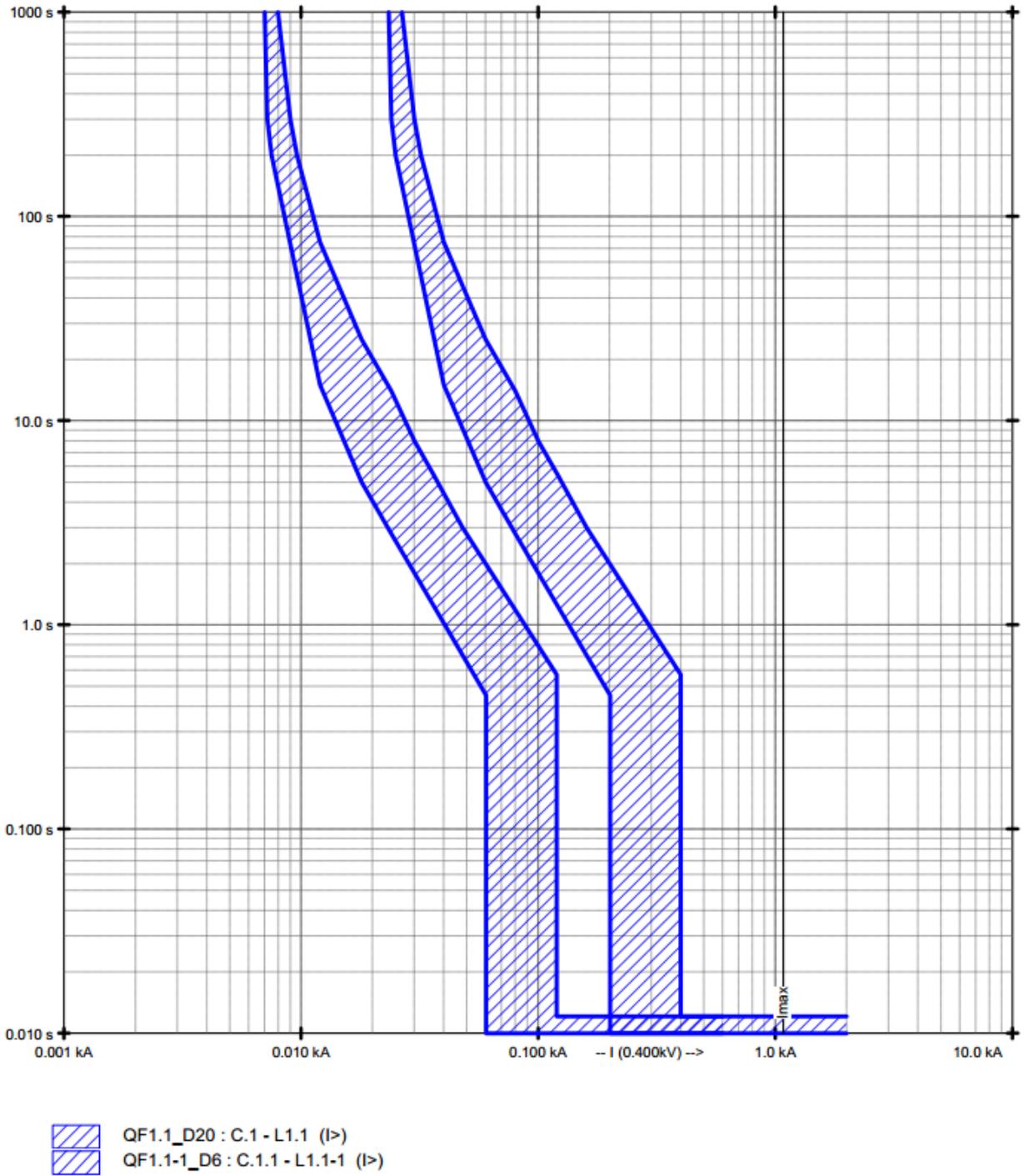


Рисунок П1.8 – Карта селективности автоматических выключателей  $QF1.1-1$  -  $QF1.1-4$  (тип D 6A) и автоматического выключателя  $QF1.1$ (тип D 20A)

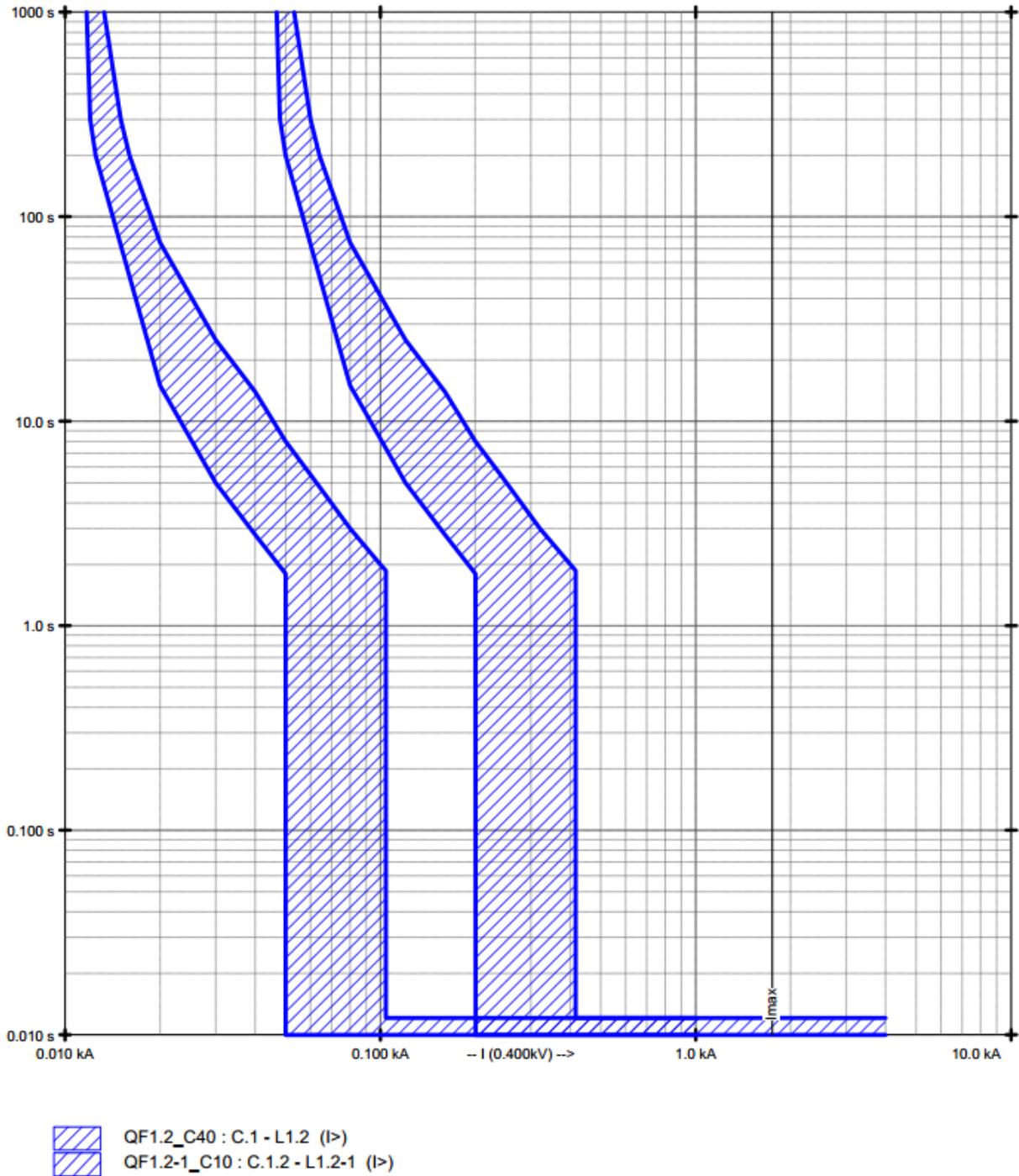
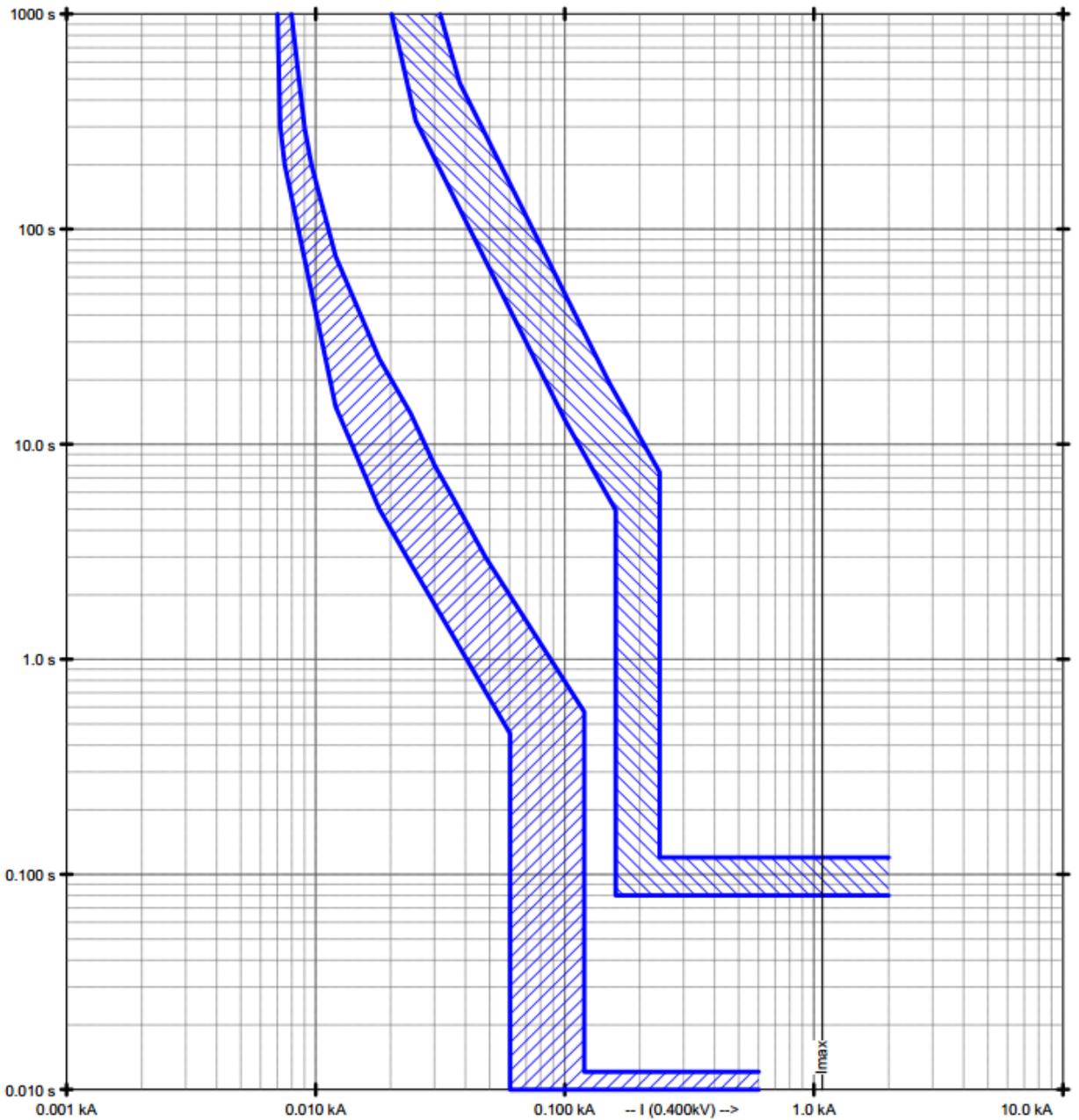


Рисунок П1.9 – Карта селективности автоматических выключателей  $QF1.2-1$  -  $QF1.2-4$  (тип С 10А) и автоматического выключателя  $QF1.2$ (тип С 40А)

Из рисунков П1.8, П1.9 видно, что селективность автоматических выключателей обеспечивается не во всем диапазоне ожидаемых токов КЗ. Для устранения неселективной работы при токах, превышающих минимальный ток срабатывания  $QF1.1$ ,  $QF1.2$  в качестве  $QF1.1$ ,  $QF1.2$  выбирают селективные автоматические выключатели с задержкой срабатывания расцепителя мгновенного действия и повторяют построение карт селективности. Задержка срабатывания расцепителя принимается минимально возможной для выбранного типа аппарата – 0,1 с. Селективность автоматических выключателей с учетом задержки срабатывания  $QF1.1$ ,  $QF1.2$  обеспечивается, рисунки П1.10, П1.11.



 QF1.1-1\_D6 : C.1.1 - L1.1-1 (I>)
   
 QF1.1\_EL\_20\_ : C.1 - L1.1 (I>)

Рисунок П1.10 – Карта селективности автоматических выключателей  $QF1.1-1$  -  $QF1.1-4$  (тип D 6A) и автоматического выключателя  $QF1.1$  с задержкой срабатывания (электронный расцепитель 20A)

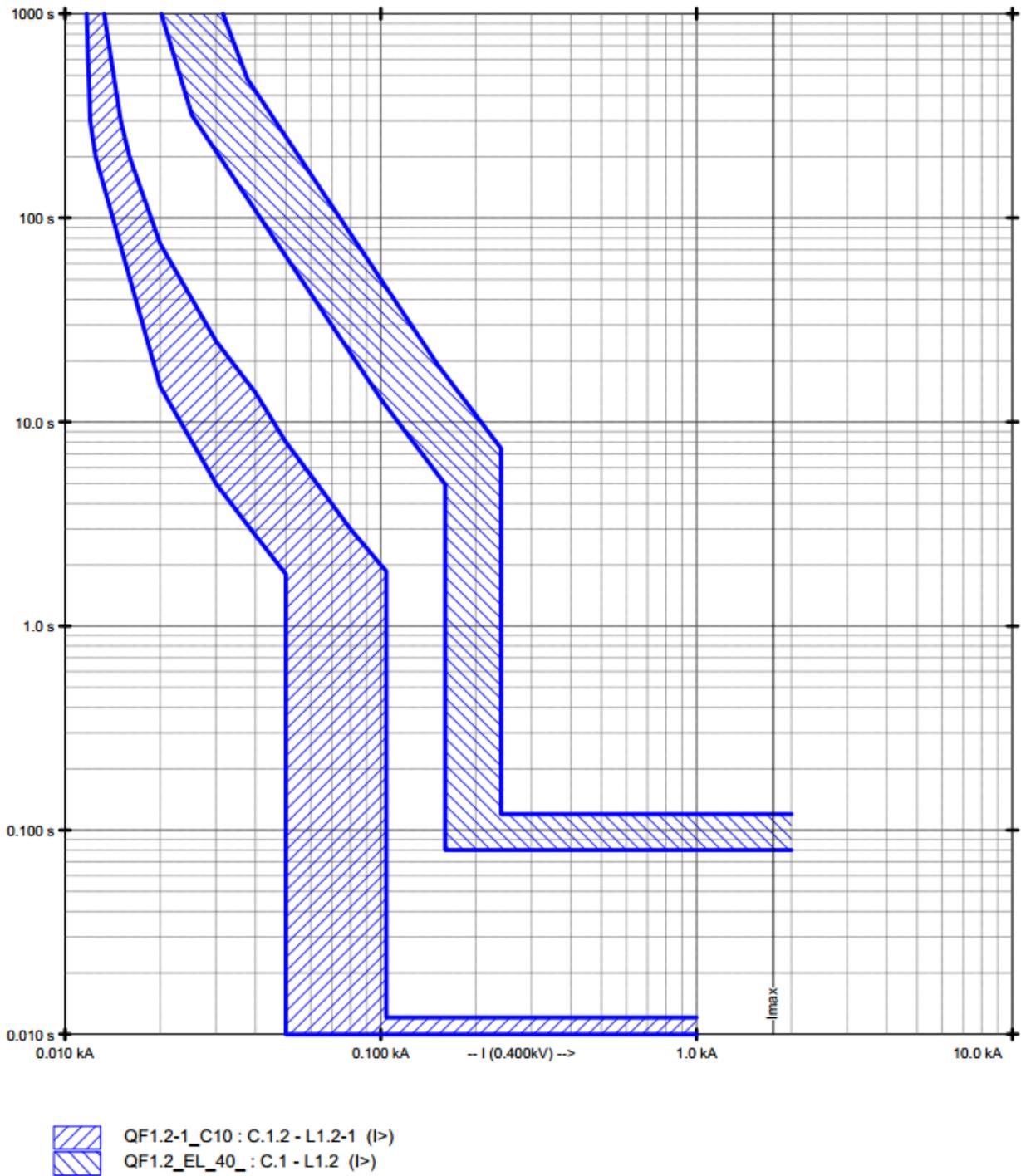


Рисунок П1.11 – Карта селективности автоматических выключателей  $QF1.2-1$  -  $QF1.2-4$  (тип С 10А) и автоматического выключателя  $QF1.2$  с задержкой срабатывания электронный расцепитель 40А)

Для обеспечения селективной работы автоматических выключателей  $QF1.1$ ,  $QF1.2$  и  $QF1$ ,  $QF2$  на последних устанавливают задержку срабатывания расцепителя мгновенного действия таким образом, чтобы не допустить пересечений защитных характеристик на карте селективности. Задержка срабатывания расцепителя принимается равной 0,2 с. На рисунках П1.12, П1.13 приведены карты селективности автоматических выключателей  $QF1.1$  и  $QF1$ , а также  $QF1.2$  и  $QF1$ . Из рисунков видно, что условия селективности обеспечены.

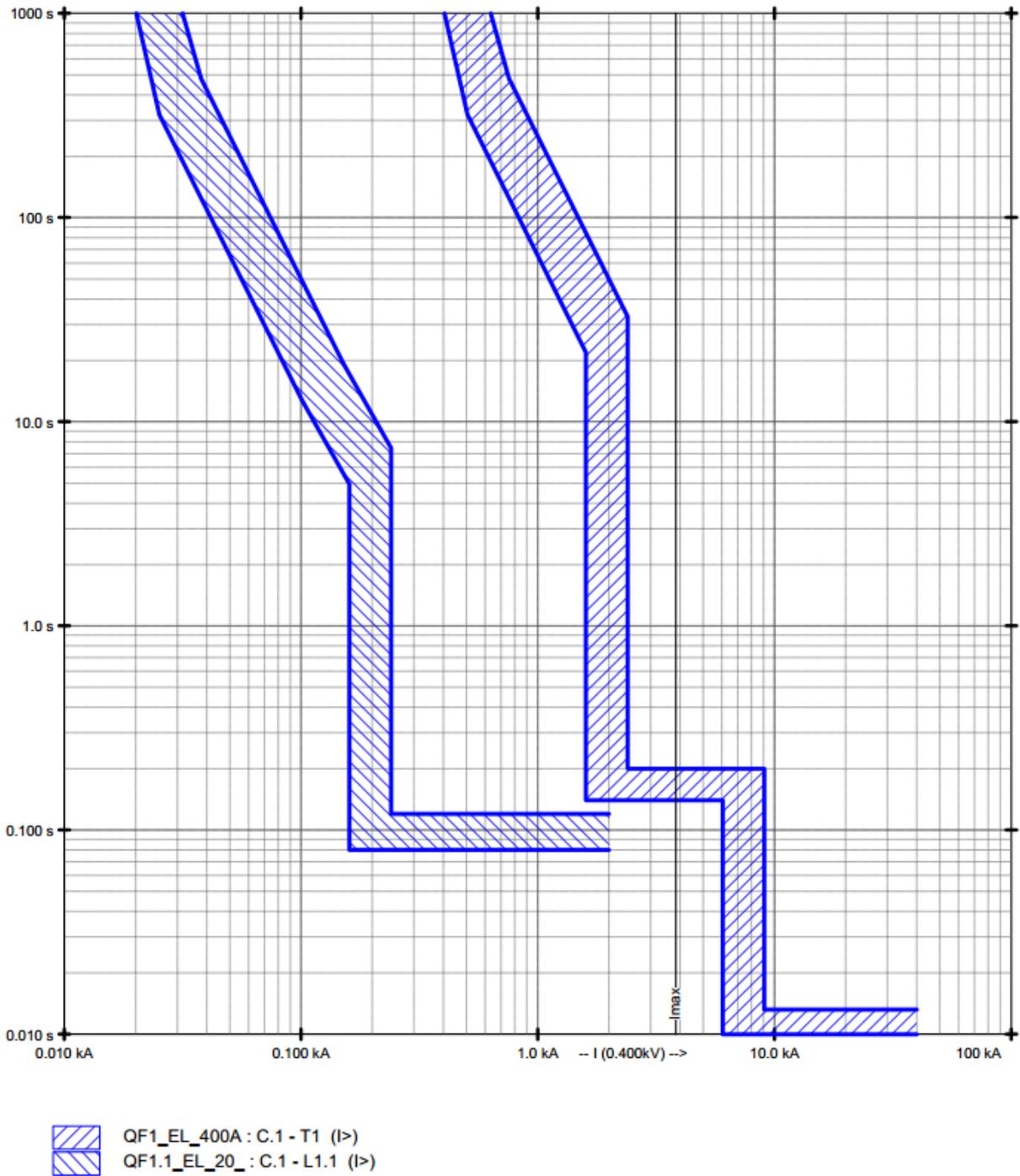


Рисунок П1.12 – Карта селективности автоматического выключателя  $QF1.1$  с задержкой срабатывания (электронный расцепитель 20А) и автоматического выключателя  $QF1$  с задержкой срабатывания (электронный расцепитель 400А)

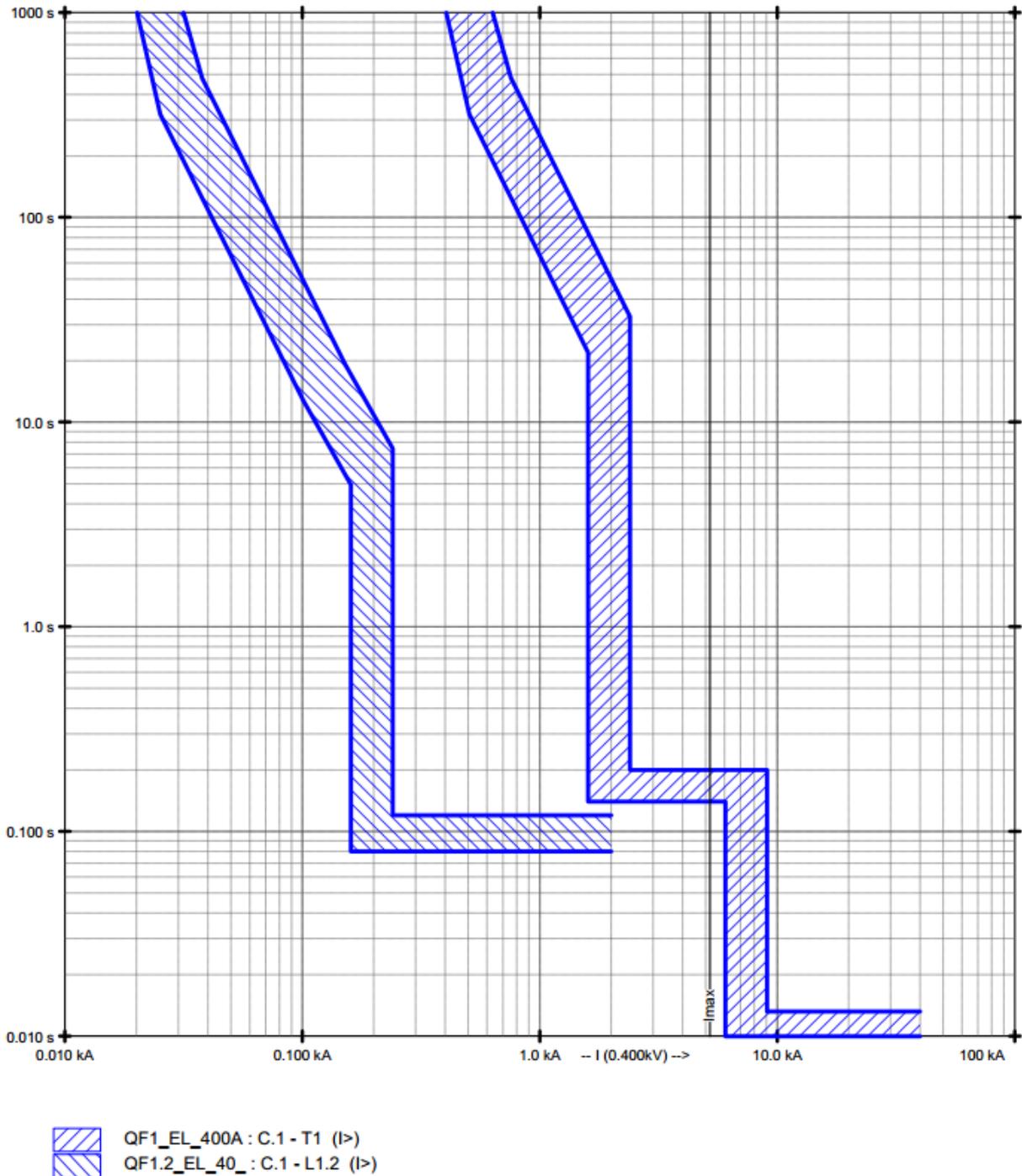


Рисунок П1.13– Карта селективности автоматического выключателя  $QF1.2$  (электронный расцепитель 40А) и автоматического выключателя  $QF1$  (электронный расцепитель 400А)

## П1.4 Проверка защитных аппаратов на чувствительность

### П1.5.1 Автоматический выключатель $QF1$

Основная зона защиты  $QF1$  заканчивается на входных клеммах нижестоящих аппаратов  $QF1.1$ ,  $QF1.2$ . Резервная зона защиты  $QF1$  заканчивается на входных клеммах защитных аппаратов следующего уровня. Минимальные токи КЗ для проверки чувствительности  $QF1$  в основной и резервной зонах защиты определяют при следующих расчетных условиях:

расчетная схема – нормальная с питанием от Т1;  
 расчетный вид КЗ – однофазное дуговое;  
 расчетная продолжительность КЗ – начальный момент времени;  
 расчетное место КЗ – К14, К4, К16.

Результаты расчета токов КЗ представлены в таблице П1.1

Таблица П1.1 – Результаты расчета токов КЗ для проверки чувствительности автоматического выключателя QF1

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$
Основная зона защиты		
К14	1972	0,896
Резервная зона защиты		
К4	964	0,438
К16	1016	0,46

Чувствительность  $QF1$  в основной и резервной зонах защиты не обеспечена. Уменьшают ток срабатывания мгновенного расцепителя с выдержкой времени до  $1,5I_{\text{ном}}$ . Результаты расчета представлены в таблице П1.2. При этом проверяют обеспечение селективности с нижестоящими аппаратами (см.рисунки П1.14, П1.15).

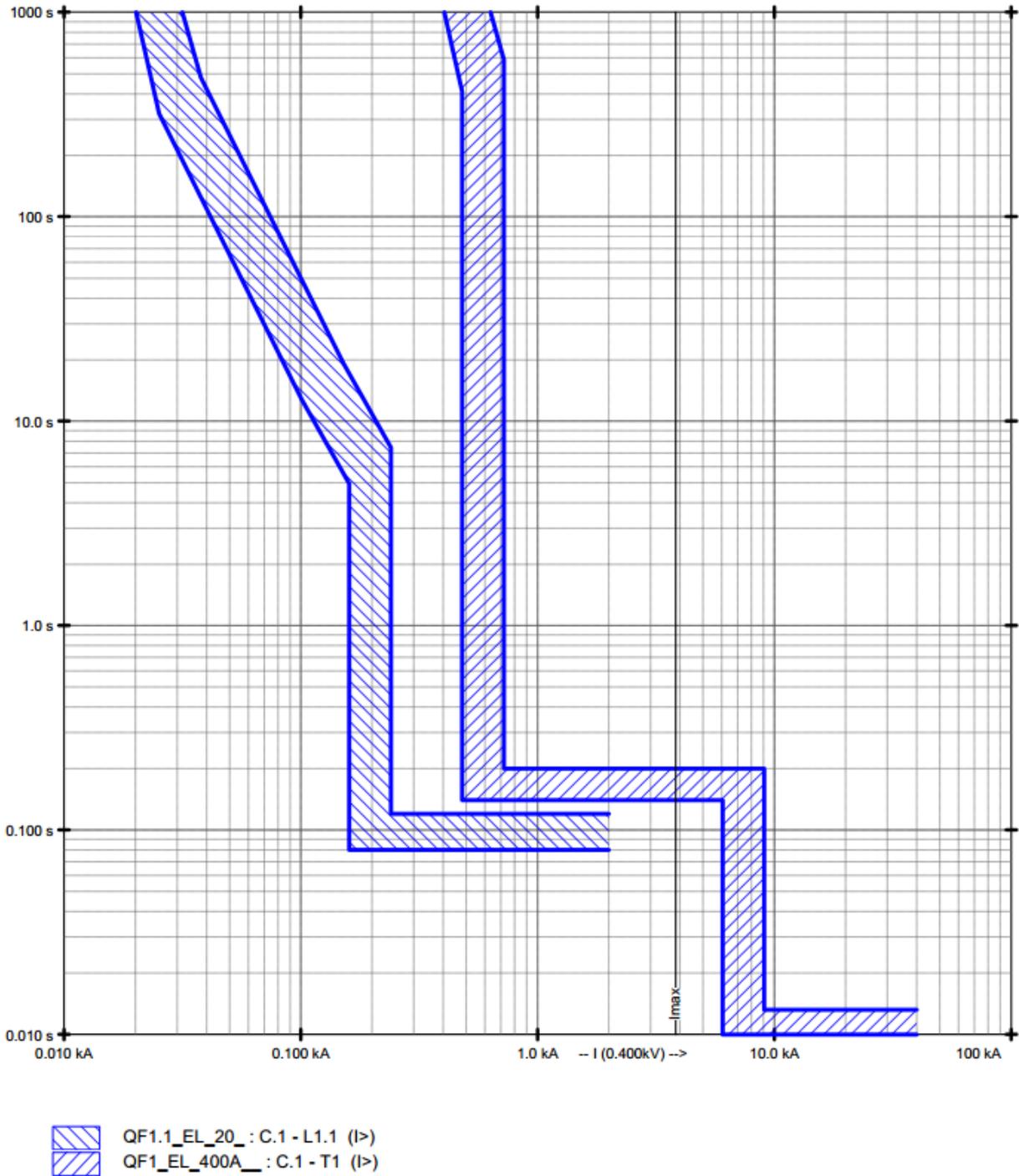


Рисунок П1.14 – Карта селективности автоматического выключателя  $QF1.1$  с задержкой срабатывания (электронный расцепитель 20А) и автоматического выключателя  $QF1$  с задержкой срабатывания (электронный расцепитель 400А)

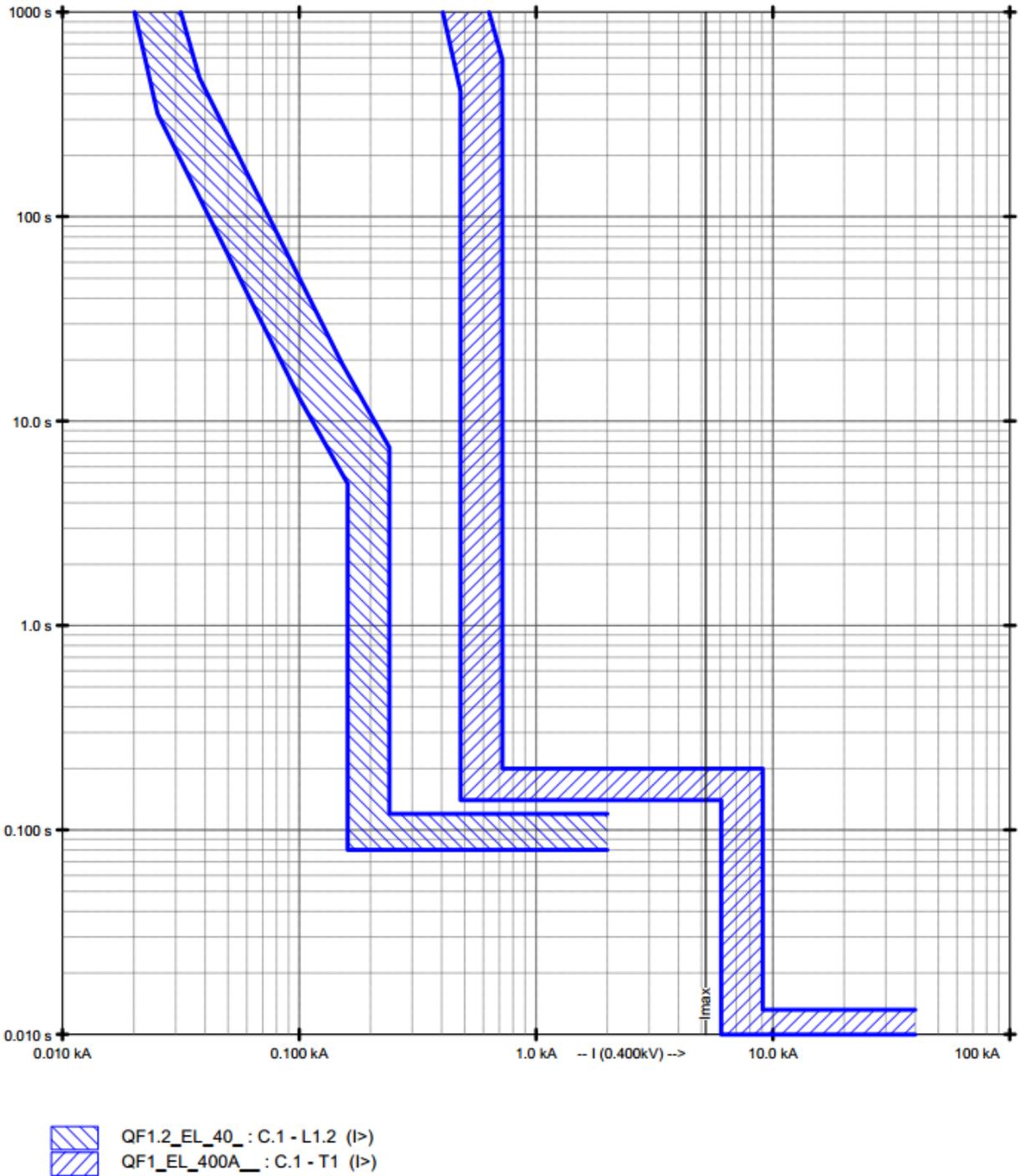


Рисунок П1.15– Карта селективности автоматического выключателя  $QF1.2$  (электронный расцепитель 40А) и автоматического выключателя  $QF1$  (электронный расцепитель 400А)

Условия селективности обеспечиваются.

Таблица П1.2 – Результаты расчета токов КЗ для проверки чувствительности автоматического выключателя  $QF1$

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности $K_{\text{д}}$
Основная зона защиты		
К14	1972	2,99
Резервная зона защиты		

К4	964	1,46
К16	1016	1,54

Чувствительность  $QF1$  в основной и резервной зонах защиты обеспечена.

#### П1.5.2 Автоматический выключатель $QF2$

Основная зона защиты  $QF2$  заканчивается на входных клеммах нижестоящих аппаратов  $QF1.1$ ,  $QF1.2$ . Резервная зона защиты  $QF2$  заканчивается на выходных клеммах защитных аппаратов следующего уровня. Минимальные токи КЗ для проверки чувствительности  $QF2$  в основной и резервной зонах защиты определяют при следующих расчетных условиях:

- расчетная схема – ремонтная с питанием от Т2;
- расчетный вид КЗ – однофазное дуговое;
- расчетная продолжительность КЗ – начальный момент времени;
- расчетное место КЗ – К2, К4, К16.

Результаты расчета токов КЗ представлены в таблице П1.3

Таблица П1.3 – Результаты расчета токов КЗ для проверки чувствительности автоматического выключателя  $QF2$

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$
Основная зона защиты		
К2	1979	2,99
Резервная зона защиты		
К4	964	1,46
К16	1016	1,54

Чувствительность аппарата обеспечивается.

#### П1.5.3 Автоматический выключатель $QF1.1$

Основная зона защиты  $QF1.1$  заканчивается на входных клеммах нижестоящих аппаратов  $QF1.1-1$  -  $QF1.1-4$ . Резервная зона защиты  $QF1.1$  заканчивается на входных клеммах конечных электроприемников. Минимальные ток КЗ для проверки чувствительности  $QF1.1$  в основной и резервной зонах защиты определяют при следующих расчетных условиях:

- расчетная схема – ремонтная с питанием от Т2;
- расчетный вид КЗ – однофазное дуговое;
- расчетная продолжительность КЗ – начальный момент времени;
- расчетное место КЗ – К4, К6, К8, К10, К12.

Результаты расчета токов КЗ представлены в таблице П1.4

Таблица П1.4 – Результаты расчета токов КЗ для проверки чувствительности автоматического выключателя  $QF1.1$

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$
Основная зона защиты		
К4	386	0,97
Резервная зона защиты		
К6	286	0,72
К8	246	0,62
К10	215	0,54
К12	191	0,48

Проверка на чувствительность в основной и резервной зонах защиты не выполняется, увеличивают сечение кабеля  $L1.1$  до  $4 \text{ мм}^2$  и повторяют проверку. Обновленные результаты расчета представлены в таблице П1.5:

Таблица П1.5 – Результаты расчета токов КЗ для проверки чувствительности автоматического выключателя QF1.1 с увеличенным сечением  $L1.1$  до  $4 \text{ мм}^2$

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$
Основная зона защиты		
К4	556	1,39
Резервная зона защиты		
К6	367	0,92
К8	303	0,76
К10	258	0,65
К12	224	0,56

Проверка на чувствительность в основной зоне защиты выполняется.

Проверка на чувствительность в резервной зоне защиты не выполняется, увеличивают сечение кабеля  $L1.1$  и повторяют проверку. Обновленные результаты расчета представлены в таблице П1.6

Таблица П1.6 – Результаты расчета токов КЗ для проверки чувствительности автоматического выключателя QF1.1 с увеличенным сечением  $L1.1$  до  $4 \text{ мм}^2$  и увеличенным сечением  $L1.1-1 - L1.1-4$  до  $2,5 \text{ мм}^2$

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$
Основная зона защиты		
К4	556	1,39
Резервная зона защиты		
К6	401	1,00
К8	352	0,88
К10	314	0,79
К12	283	0,71

Проверка на чувствительность в резервной зоне защиты не выполняется, увеличивают сечение кабеля  $L1.1$  до  $6 \text{ мм}^2$  и повторяют проверку. Обновленные результаты расчета представлены в таблице П1.7

Таблица П1.7 – Результаты расчета токов КЗ для проверки чувствительности автоматического выключателя QF1.1 с увеличенным сечением  $L1.1$  до  $6 \text{ мм}^2$  и увеличенным сечением  $L1.1-1 - L1.1-4$  до  $2,5 \text{ мм}^2$

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$
Основная зона защиты		
К4	556	1,39
Резервная зона защиты		
К6	481	1,20
К8	415	1,04
К10	363	0,91
К12	323	0,81

Проверка на чувствительность в резервной зоне защиты не выполняется. Увеличивают сечение кабеля  $L1.1$  до  $10 \text{ мм}^2$  и повторяют проверку. Обновленные результаты расчета представлены в таблице П1.8

Таблица П1.8 – Результаты расчета токов КЗ для проверки чувствительности автоматического выключателя QF1.1 с увеличенным сечением  $L1.1$  до  $10 \text{ мм}^2$  и увеличенным сечением  $L1.1-1 - L1.1-4$  до  $2,5 \text{ мм}^2$

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$
Основная зона защиты		
К4	556	1,39
Резервная зона защиты		
К6	570	1,43
К8	481	1,20
К10	414	1,04
К12	363	0,91

Проверка на чувствительность в резервной зоне защиты не выполняется. Увеличивают сечения кабелей  $L1.1-3, L1.1-4$  до  $4 \text{ мм}^2$  и повторяют проверку. Обновленные результаты расчета представлены в таблице П1.9

Таблица П1.9 – Результаты расчета токов КЗ для проверки чувствительности автоматического выключателя QF1.1 с увеличенным сечением  $L1.1$  до  $10 \text{ мм}^2$  и увеличенным сечением  $L1.1-1, L1.1-2$  до  $2,5 \text{ мм}^2, L1.1-3, L1.1-3$  до  $4 \text{ мм}^2$

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$
Основная зона защиты		
К4	556	1,39
Резервная зона защиты		
К6	570	1,43
К8	481	1,20

K10	490	1,23
K12	445	1,11

Проверка на чувствительность в резервной зоне защиты выполняется.

#### П1.5.4 Автоматический выключатель QF1.2

Основная зона защиты QF1.2 заканчивается на входных клеммах нижестоящих аппаратов QF1.2-1 - QF1.2-4. Резервная зона защиты QF1.2 заканчивается на входных клеммах конечных электроприемников. Минимальные ток КЗ для проверки чувствительности QF1.2 в основной и резервной зонах защиты определяют при следующих расчетных условиях:

- расчетная схема – ремонтная с питанием от Т2;
- расчетный вид КЗ – однофазное дуговое;
- расчетная продолжительность КЗ – начальный момент времени;
- расчетное место КЗ – К16, К18, К20, К22, К24.

Результаты расчета токов КЗ представлены в таблице П1.10.

Таблица П1.10 – Результаты расчета токов КЗ для проверки чувствительности автоматического выключателя QF1.2

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$
Основная зона защиты		
K16	757	1,89
Резервная зона защиты		
K18	481	1,20
K20	376	0,94
K22	308	0,77
K24	261	0,65

Проверка на чувствительность в основной зоне защиты выполняется.

Проверка на чувствительность в резервной зоне защиты не выполняется, увеличивают сечения кабелей L1.2-1 - L1.2-4 до 2,5 мм<sup>2</sup> и повторяют проверку. Обновленные результаты расчета представлены в таблице П1.11.

Таблица П1.11 – Результаты расчета токов КЗ для проверки чувствительности автоматического выключателя QF1.2 с увеличенным сечением кабелей L1.2-1 - L1.2-4 до 2,5 мм<sup>2</sup>

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$
Основная зона защиты		
K16	757	1,89
Резервная зона защиты		
K18	540	1,35
K20	455	1,14

K22	393	0,98
K24	345	0,86

Проверка на чувствительность в резервной зоне защиты не выполняется. Увеличивают сечения кабелей  $L1.2-3$ ,  $L1.2-4$  до  $4 \text{ мм}^2$  и повторяют проверку. Обновленные результаты расчета представлены в таблице П1.12.

Таблица П1.12 – Результаты расчета токов КЗ для проверки чувствительности автоматического выключателя QF1.2 с увеличенным сечением кабелей  $L1.2-1$ ,  $L1.2-2$  до  $2,5 \text{ мм}^2$  и  $L1.2-3 - L1.2-4$  до  $4 \text{ мм}^2$

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$
Основная зона защиты		
K16	757	1,89
Резервная зона защиты		
K18	540	1,35
K20	455	1,14
K22	464	1,16
K24	422	1,06

Проверка на чувствительность в резервной зоне защиты не выполняется. увеличивают сечение кабеля  $L1.1-4$  до  $6 \text{ мм}^2$  и повторяют проверку. Обновленные результаты расчета представлены в таблице П1.13.

Таблица П1.13 – Результаты расчета токов КЗ для проверки чувствительности автоматического выключателя QF1.2 с увеличенным сечением кабелей  $L1.2-1$ ,  $L1.2-2$  до  $2,5 \text{ мм}^2$  и  $L1.2-3$  до  $4 \text{ мм}^2$ ,  $L1.2-4$  до  $6 \text{ мм}^2$

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$
Основная зона защиты		
K16	757	1,89
Резервная зона защиты		
K18	540	1,35
K20	455	1,14
K22	464	1,16
K24	480	1,2

Проверка на чувствительность в основной и резервной зонах защиты выполняется.

#### П1.5.5 Автоматические выключатели QF1.1-1 - QF1.1-4

Основная зона защиты QF1.1-1 - QF1.1-4 заканчивается на входных клеммах электроприемников. Резервная зона защиты отсутствует. Минимальные ток КЗ для проверки чувствительности QF1.1-1 - QF1.1-4 определяют при следующих расчетных условиях:

расчетная схема – ремонтная с питанием от Т2;  
 расчетный вид КЗ – однофазное дуговое;  
 расчетная продолжительность КЗ – начальный момент времени;  
 расчетное место КЗ – К6, К8, К10, К12.

Результаты расчета токов КЗ представлены в таблице П1.14

Таблица П1.14 – Результаты расчета токов КЗ для проверки чувствительности автоматических выключателей QF1.1-1 - QF1.1-4

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$
К6	570	4,75
К8	481	4,01
К10	490	4,08
К12	445	3,71

Чувствительность аппаратов обеспечивается.

#### П1.5.6 Автоматические выключатели QF1.2-1 - QF1.2-4

Основная зона защиты QF1.2-1 - QF1.2-4 заканчивается на входных клеммах электроприемников. Резервная зона защиты отсутствует. Минимальные ток КЗ для проверки чувствительности QF1.2-1 - QF1.2-4 определяют при следующих расчетных условиях:

расчетная схема – ремонтная с питанием от Т2;  
 расчетный вид КЗ – однофазное дуговое;  
 расчетная продолжительность КЗ – начальный момент времени;  
 расчетное место КЗ – К18, К20, К22, К24.

Результаты расчета токов КЗ представлены в таблице П1.15

Таблица П1.15 – Результаты расчета токов КЗ для проверки чувствительности автоматических выключателей QF1.2-1 - QF1.2-4

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$
К18	540	5,40
К20	455	4,55
К22	464	4,64
К24	480	4,80

Чувствительность аппаратов обеспечивается.

### П1.5 Проверка защитных аппаратов на быстродействие

Проверка аппарата на быстродействие включает в себя проверку термической стойкости проводника в основной зоне защиты, невозгораемости

проводника в резервной зоне защиты и проверку параметров провалов напряжения, при отключении аппаратом КЗ.

Таблица П1.16 – Расчетные условия для проверки термической стойкости и невозгораемости проводников

Расчетное условие	Набор 1	Набор 2
Расчетная схема	Нормальная	Нормальная
Расчетная точка КЗ	Начало КЛ	Конец КЛ
Расчетный вид КЗ	Дуговое КЗ	Металлическое КЗ

В дополнение к расчетным условиям П1.16 расчетную продолжительность КЗ принимают в зависимости от вида проверки:

- равной времени срабатывания основной защиты проводника при проверке на термическую стойкость;
- равной времени срабатывания резервной защиты проводника при проверке на невозгораемость.

#### П1.5.1 Автоматические выключатели $QF1$ , $QF2$

Для проверки быстродействия автоматических выключателей определяют температуру кабелей  $L1.1$ ,  $L1.2$  при отключении КЗ в резервной зоне автоматических выключателей  $QF1$ ,  $QF2$ . Результаты расчетов сведены в таблицу П1.17.

Таблица П1.17 – Результаты проверки невозгораемости  $L1.1$  ВВГнг-LS- $5 \times 10 \text{ мм}^2$

Набор расчетных условий – место КЗ на рис. П1.7	Защитный аппарат	Время отключения, с	Ток КЗ, А	Температура, град. С
Набор 1 - К3	$QF1$ $QF2$	0,2	3837	218,5
Набор 2 - К4			2413	85,2

Невозгораемость кабеля  $L1.1$  при КЗ обеспечена, следовательно, одно из условий удовлетворительного быстродействия  $QF1,2$  выполнено.

Таблица П1.18 – Результаты проверки невозгораемости  $L1.2$  - ВВГнг-LS- $5 \times 6 \text{ мм}^2$

Набор расчетных условий – место КЗ на рис. П1.7	Защитный аппарат	Время отключения, с	Ток КЗ, А	Температура, град. С
Набор 1 – К15	$QF1$ $QF2$	0,2	5207	4623,5
Набор 2 – К16			1881	139,5

Невозгораемость линии  $L1.2$  не обеспечивается. Увеличивают сечение кабеля до  $10 \text{ мм}^2$  и повторяют проверку. Результаты проверки представлены в таблице П1.19.

Таблица П1.19 – Результаты проверки невозгораемости  $L1.2$  - ВВГнг-LS-5x10  $\text{мм}^2$

Набор расчетных условий – место КЗ на рис. П1.7	Защитный аппарат	Время отключения, с	Ток КЗ, А	Температура, град. С
Набор 1 – К15	$QF1$	0,2	5207	501,3
Набор 2 – К16	$QF2$		1881	106,2

Невозгораемость линии  $L1.2$  не обеспечивается. Увеличивают сечение кабеля до  $16 \text{ мм}^2$  и повторяют проверку. Результаты проверки представлены в таблице П1.20.

Таблица П1.20 – Результаты проверки невозгораемости проводников  $L1.2$  с увеличенным сечением  $L1.2$  до  $16 \text{ мм}^2$

Набор расчетных условий – место КЗ на рис. П1.7	Защитный аппарат	Время отключения, с	Ток КЗ, А	Температура, град. С
Набор 1 – К15	$QF1$	0,2	5207	150,8
Набор 2 – К16	$QF2$		3591	75,5

Невозгораемость линии  $L1.2$  при КЗ обеспечена, следовательно, одно из условий удовлетворительного быстрогодействия  $QF1$ ,  $QF2$  выполнено.

#### П1.5.2 Автоматический выключатель $QF1.1$

Для проверки быстрогодействия автоматического выключателя определяют температуру кабеля  $L1.1$  при отключении КЗ в основной зоне автоматического выключателя  $QF1.1$  и кабелей  $L1.1-1$  –  $L1.1-4$  при отключении КЗ в резервной зоне автоматического выключателя  $QF1.1$ . Результаты расчетов сведены в таблицы П1.21, 1.22.

Таблица П1.21 – Результаты проверки термической стойкости линии  $L1.1$  (ВВГнг-LS-5x10  $\text{мм}^2$ )

Набор расчетных условий – место КЗ на рис. П1.7	Защитный аппарат	Время отключения, с	Ток КЗ, А	Температура, град. С
Набор 1 - К3	$QF1.1$	0,1	3837	105,0
Набор 2 - К4			2413	50,7

Линия  $L1.1$  термически стойка к протеканию токов КЗ, следовательно, одно из условий удовлетворительного быстродействия  $QF1.1$  выполнено.

Таблица П1.22 – Результаты расчета для проверки невозгораемости проводников  $L1.1-1 - L1.1-4$

Кабельная линия	Место, тип, вид КЗ	Защитный аппарат	Время отключения, с	Ток КЗ, А	Температура, град. С
$L1.1-1$ ВВГнг-LS- 5x2,5мм <sup>2</sup>	Набор 1 - К5	$QF1.1$	0,1	1082	132,7
	Набор 2 - К6			1047	124,3
$L1.1-2$ ВВГнг-LS- 5x2,5мм <sup>2</sup>	Набор 1 - К7	$QF1.1$	0,1	1082	132,7
	Набор 2 - К8			906	94,6
$L1.1-3$ ВВГнг-LS- 5x4мм <sup>2</sup>	Набор 1 - К9	$QF1.1$	0,1	1082	59,2
	Набор 2 - К10			921	47,8
$L1.1-4$ ВВГнг-LS- 5x4мм <sup>2</sup>	Набор 1 - К11	$QF1.1$	0,1	1082	59,2
	Набор 2 - К12			846	43,3

Невозгораемость кабелей  $L1.1-1 - 1.1-4$  при КЗ обеспечена, следовательно, одно из условий удовлетворительного быстродействия  $QF1.1$  выполнено.

### П1.5.3 Автоматические выключатели $QF1.1-1 - 1.1-4$

Для проверки быстродействия автоматических выключателей определяют температуру кабелей  $L1.1-1 - 1.1-4$  при отключении КЗ в основной зоне автоматических выключателей  $QF1.1-1 - 1.1-4$ . Результаты расчетов сведены в таблицу П1.23.

Таблица П1.23 – Результаты расчета для проверки термической стойкости проводников  $L1.1-1 - L1.1-4$

Кабельная линия	Место, тип, вид КЗ	Защитный аппарат	Время отключения	Ток КЗ	Температура
$L1.1-1$ ВВГнг-LS- 5x2,5мм <sup>2</sup>	Набор 1 - К5	$QF1.1-1$	0,01	1082	29,5
	Набор 2 - К6			1047	28,9
$L1.1-2$ ВВГнг-LS- 5x2,5мм <sup>2</sup>	Набор 1 - К7	$QF1.1-2$	0,01	1082	29,5
	Набор 2 - К8			906	26,6
$L1.1-3$ ВВГнг-LS-	Набор 1 - К9	$QF1.1-3$	0,01	1082	23,7
	Набор 2 - К10			921	22,7

Кабельная линия	Место, тип, вид КЗ	Защитный аппарат	Время отключения	Ток КЗ	Температура
5x4мм <sup>2</sup>					
L1.1-4 ВВГнг-LS- 5x4мм <sup>2</sup>	Набор 1 - К11	QF1.1-4	0,01	1082	23,7
	Набор 2 - К12			846	22,2

Линии L1.1-1 – 1.1-4 термически стойки к протеканию токов КЗ, следовательно, одно из условий удовлетворительного быстродействия QF1.1-1 – 1.1-4 выполнено.

#### П1.5.4 Автоматический выключатель QF1.2

Для проверки быстродействия автоматического выключателя определяют температуру кабеля L1.2 при отключении КЗ в основной зоне автоматического выключателя QF1.2 и кабелей L1.2-1 – L1.2-4 при отключении КЗ в резервной зоне автоматического выключателя QF1.2. Результаты расчетов сведены в таблицы П1.24.

Таблица П1.24 – Результаты проверки термической стойкости линии L1.2 - ВВГнг-LS-5x6 мм<sup>2</sup>

Набор расчетных условий – место КЗ на рис. П1.7	Защитный аппарат	Время отключения, с	Ток КЗ, А	Температура, град. С
Набор 1 – К15	QF1.2	0,1	5207	877,4
Набор 2 – К16			1881	74,0

Термическая стойкость линии L1.2 не обеспечивается. Увеличивают сечение кабеля до 10 мм<sup>2</sup> и повторяют проверку. Результаты проверки представлены в таблице П1.25.

Таблица П1.25 – Результаты проверки термической стойкости L1.2 с увеличенным сечением L1.2 до 10 мм<sup>2</sup>

Набор расчетных условий – место КЗ на рис. П1.7	Защитный аппарат	Время отключения, с	Ток КЗ, А	Температура, град. С
Набор 1 – К15	QF1.2	0,1	5207	198,2
Набор 2 – К16			2729	60,0

Термическая стойкость КЛ L1.2 обеспечивается, следовательно, одно из условий удовлетворительного быстродействия QF1.2 выполнено.

Таблица П1.26 – Результаты проверки невозгораемости проводников L1.2-1 – L1.2-4

Кабельная линия	Место, тип, вид КЗ	Защитный аппарат	Время отключения, с	Ток КЗ, А	Температура, град. С
L1.2-1 ВВГнг-LS- 5x2,5мм <sup>2</sup>	Набор 1 – К17	QF1.2	0,1	1747	427,6
	Набор 2 – К18			1594	329,6
L1.2-2 ВВГнг-LS- 5x2,5мм <sup>2</sup>	Набор 1 – К19	QF1.2	0,1	1747	427,6
	Набор 2 – К20			1276	189,3
L1.2-3 ВВГнг-LS- 5x4мм <sup>2</sup>	Набор 1 – К21	QF1.2	0,1	1747	135,2
	Набор 2 – К22			1308	79,3
L1.2-4 ВВГнг-LS- 5x6мм <sup>2</sup>	Набор 1 – К23	QF1.2	0,1	1747	66,0
	Набор 2 – К24			1365	47,1

Невозгораемость КЛ L1.2-1, L1.2-2 не обеспечивается, увеличивают сечение кабелей до 4 мм<sup>2</sup> и повторяют проверку. Результаты проверки представлены в таблице П1.27.

Таблица П1.27 – Результаты проверки невозгораемости проводников с увеличенным сопротивлением L1.2-1, L1.2-2 до 4 мм<sup>2</sup>

Кабельная линия	Место, тип, вид КЗ	Защитный аппарат	Время отключения, с	Ток КЗ, А	Температура, град. С
L1.2-1 ВВГнг-LS- 5x4мм <sup>2</sup>	Набор 1 – К17	QF1.2	0,1	1747	135,2
	Набор 2 – К18			1749	135,5
L1.2-1 ВВГнг-LS- 5x4мм <sup>2</sup>	Набор 1 – К19	QF1.2	0,1	1747	135,2
	Набор 2 – К20			1501	100,8
L1.2-3 ВВГнг-LS- 5x4мм <sup>2</sup>	Набор 1 – К21	QF1.2	0,1	1747	135,2
	Набор 2 – К22			1308	79,3
L1.2-4 ВВГнг-LS- 5x6мм <sup>2</sup>	Набор 1 – К23	QF1.2	0,1	1747	66,0
	Набор 2 – К24			1365	47,1

Невозгораемость кабелей L1.2-1 – 1.2-4 при КЗ обеспечена, следовательно, одно из условий удовлетворительного быстродействия QF1.2 выполнено.

#### П1.5.5 Автоматические выключатели QF1.2-1 – 1.2-4

Для проверки быстродействия автоматических выключателей определяют температуру кабелей L1.2-1 – 1.2-4 при отключении КЗ в основной зоне автоматических выключателей QF1.2-1 – 1.2-4. Результаты расчетов сведены в таблицу П1.27.

Таблица П1.28 – Результаты проверки термической стойкости проводников

Кабельная линия	Место, тип, вид КЗ	Защитный аппарат	Время отключения, с	Ток КЗ, А	Температура, град. С
L1.2-1 ВВГнг-LS- 5x2,5мм <sup>2</sup>	Набор 1 – К17	QF1.2-1	0,01	1747	45,5
	Набор 2 – К18			1594	41,1
L1.2-2 ВВГнг-LS- 5x2,5мм <sup>2</sup>	Набор 1 – К19	QF1.2-2	0,01	1747	45,5
	Набор 2 – К20			1276	33,3
L1.2-3 ВВГнг-LS- 5x4мм <sup>2</sup>	Набор 1 – К21	QF1.2-3	0,01	1747	29,7
	Набор 2 – К22			1308	25,4
L1.2-4 ВВГнг-LS- 5x6мм <sup>2</sup>	Набор 1 – К23	QF1.2-4	0,01	1747	24,3
	Набор 2 – К24			1365	22,6

Линии L1.2-1 – 1.2-4 термически стойки к протеканию токов КЗ, следовательно, одно из условий удовлетворительного быстродействия QF1.2-1 – 1.2-4 выполнено.

П1.5.5 Проверка быстродействия выключателей по критерию провалов и кратковременных прерываний напряжения

Для проверки по провалам напряжения определяется остаточное напряжение на секциях щита собственных нужд при металлическом КЗ в конце основной зоны защиты проверяемого аппарата и дуговом коротком замыкании в начале основной зоны защиты аппарата.

Удовлетворительными считают остаточное напряжение провала напряжения не ниже:

- $0,7 \cdot U_n$  при продолжительности не более 1 с;
- $0,4 \cdot U_n$  при продолжительности не более 20 мс;

Результаты расчета токов короткого замыкания для проверки по провалам напряжения приведены в таблицах П1.29, П1.30.

Таблица П1.29 – Результаты проверки провалов напряжения при металлическом КЗ в конце КЛ.

Защитный аппарат	Расчетное место КЗ	Ток КЗ, А	Длительность провала, мс	Остаточное напряжение при провале, В (%)	
QF1.1-1	конец КЛ L1.1-1 точка К6	1047	10	207	94
QF1.1-2	конец КЛ L1.1-2 точка К8	906	10	211	96
QF1.1-3	конец КЛ L1.1-3 точка К10	921	10	210	95
QF1.1-4	конец КЛ L1.1-4 точка К12	846	10	213	97
QF1.1	конец КЛ L1.1 точка К4	2413	100	183	83

Защитный аппарат	Расчетное место КЗ	Ток КЗ, А	Длительность провала, мс	Остаточное напряжение при провале, В (%)	
<i>QF1.2-1</i>	конец КЛ <i>L1.2-1</i> точка К18	1749	10	191	87
<i>QF1.2-2</i>	конец КЛ <i>L1.2-2</i> точка К20	1501	10	199	90
<i>QF1.2-3</i>	конец КЛ <i>L1.2-3</i> точка К22	1308	10	205	93
<i>QF1.2-4</i>	конец КЛ <i>L1.2-4</i> точка К24	1365	10	203	92
<i>QF1.2</i>	конец КЛ <i>L1.2</i> точка К16	3591	100	162	74

Таблица П1.30 – Результаты проверки провалов напряжения при дуговом КЗ в начале КЛ

Защитный аппарат	Расчетное место КЗ	Ток КЗ, А	Длительность провала, мс	Остаточное напряжение при провале, В (%)	
<i>QF1.1-1</i>	начало КЛ <i>L1.1-1</i> точка К5	1082	10	205	93
<i>QF1.1-2</i>	начало КЛ <i>L1.1-1</i> точка К7	1082	10	205	93
<i>QF1.1-3</i>	начало КЛ <i>L1.1-1</i> точка К9	1082	10	205	93
<i>QF1.1-4</i>	начало КЛ <i>L1.1-1</i> точка К11	1082	10	205	93
<i>QF1.1</i>	начало КЛ <i>L1.1</i> точка К3	3837	100	131	60
<i>QF1.2-1</i>	начало КЛ <i>L1.2-1</i> точка К17	1747	10	192	87
<i>QF1.2-2</i>	начало КЛ <i>L1.2-1</i> точка К19	1747	10	192	87
<i>QF1.2-3</i>	начало КЛ <i>L1.2-1</i> точка К21	1747	10	192	87
<i>QF1.2-4</i>	начало КЛ <i>L1.2-1</i> точка К23	1747	10	192	87
<i>QF1.2</i>	начало КЛ <i>L1.2</i> точка К15	5207	100	114	52

Параметры провалов напряжения выходят за пределы допустимых значений при КЗ в К3 и К15. Для уменьшения времени срабатывания защиты при близких КЗ к щиту собственных нужд применяют автоматические выключатели с дополнительным расцепителем, работающим без выдержки времени при больших кратностях токов КЗ. Для предотвращения неселективной работы с нижестоящими защитными аппаратами, ток срабатывания быстродействующего расцепителя аппаратов *QF 1.1* и *QF 1.2* отстраивают от максимального тока КЗ в конце основной зоны защиты.

$$I_{MQF1.1} \geq 1,1 \cdot I_{K4\max} = 1,1 \cdot 2413 \text{ А} = 2654 \text{ А}$$

$$I_{MQF1.2} \geq 1,1 \cdot I_{K16\max} = 1,1 \cdot 2729 \text{ А} = 3002 \text{ А}$$

Обновленные результаты проверки по провалам напряжения при дуговом КЗ в начале КЛ представлены в таблице П1.31.

Таблица П1.31 – Результаты проверки провалов напряжения при дуговом КЗ в начале КЛ

Защитный аппарат	Точка КЗ	Ток КЗ, А	Длительность провала, мс	Остаточное напряжение при провале, В (%)	
<i>QF1.1-1</i>	начало КЛ <i>L1.1-1</i> точка <i>K5</i>	1082	10	205	93
<i>QF1.1-2</i>	начало КЛ <i>L1.1-1</i> точка <i>K7</i>	1082	10	205	93
<i>QF1.1-3</i>	начало КЛ <i>L1.1-1</i> точка <i>K9</i>	1082	10	205	93
<i>QF1.1-4</i>	начало КЛ <i>L1.1-1</i> точка <i>K11</i>	1082	10	205	93
<i>QF1.1</i>	начало КЛ <i>L1.1</i> точка <i>K3</i>	3837	10	131	60
<i>QF1.2-1</i>	начало КЛ <i>L1.2-1</i> точка <i>K17</i>	1747	10	192	87
<i>QF1.2-2</i>	начало КЛ <i>L1.2-1</i> точка <i>K19</i>	1747	10	192	87
<i>QF1.2-3</i>	начало КЛ <i>L1.2-1</i> точка <i>K21</i>	1747	10	192	87
<i>QF1.2-4</i>	начало КЛ <i>L1.2-1</i> точка <i>K23</i>	1747	10	192	87
<i>QF1.2</i>	начало КЛ <i>L1.2</i> точка <i>K15</i>	5207	10	114	52

Параметры провалов напряжения не выходят за допустимые значения. Быстродействие автоматических выключателей, по критерию допустимых провалов напряжения, обеспечивается.

## П1.6 Проверка аппаратов на отключающую способность

### П1.6.1 Автоматические выключатели *QF1.1-1* - *QF1.1-4*

Максимальный ожидаемый ток КЗ на вводных клеммах автоматических выключателей *QF1.1-1* - *QF1.1-4* рассчитывается при следующих расчетных условиях:

- расчетная схема – нормальная с питанием от Т1;
- расчетный вид КЗ - трехфазное металлическое;
- расчетная продолжительность КЗ – начальный момент времени;
- расчетное место КЗ – К4.

В результате расчета получен ток КЗ – 2413 А.

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{0,082}{\sqrt{0,082^2 + 0,0476^2}} = 0,865$$

Выбирают автоматические выключатели с предельной отключающей способностью 6 кА.

#### П1.6.2 Автоматические выключатели $QF1.2-1 - QF1.2-4$

Максимальный ожидаемый ток КЗ на вводных клеммах автоматических выключателей  $QF1.2-1 - QF1.2-4$  определяют при следующих расчетных условиях:

- расчетная схема – нормальная с питанием от Т1;
- расчетный вид КЗ - трехфазное металлическое;
- расчетная продолжительность КЗ – начальный момент времени;
- расчетное место КЗ – К16.

В результате расчета получен ток КЗ – 2929 А.

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{0,0695}{\sqrt{0,0695^2 + 0,04688^2}} = 0,829$$

Выбирают автоматические выключатели с предельной отключающей способностью 6 кА.

#### П1.6.3 Автоматические выключатели $QF1.1, QF1.2$

Максимальный ожидаемый ток КЗ на вводных клеммах автоматических выключателей  $QF1.1, QF1.2$  определяют при следующих расчетных условиях:

- расчетная схема – нормальная с питанием от Т1;
- расчетный вид КЗ - трехфазное металлическое;
- расчетная продолжительность КЗ – начальный момент времени;
- расчетное место КЗ – К2.

В результате расчета получен ток КЗ – 7727 А.

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{0,009945}{\sqrt{0,009945^2 + 0,0273^2}} = 0,342$$

Выбирают автоматические выключатели с предельной отключающей способностью 10 кА

#### П1.6.4 Автоматический выключатель $QF1$

Максимальный ожидаемый ток КЗ на вводных клеммах автоматических выключателей  $QF1$  определяют при следующих расчетных условиях:

- расчетная схема – нормальная с питанием от Т1;
- расчетный вид КЗ – трехфазное или однофазное металлическое;
- расчетная продолжительность КЗ – начальный момент времени;
- расчетное место КЗ – К1.

В результате расчета получен ток КЗ – 7799 А.

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{0,00938}{\sqrt{0,00938^2 + 0,0272^2}} = 0,326$$

Выбирают автоматические выключатели с предельной отключающей способностью 40 кА (такой запас обусловлен тем, что автоматические

выключатели, оснащенные сложными электронными расцепителями обладают, как правило, высокой отключающей способностью).

#### П1.6.5 Автоматический выключатель $QF2$

Максимальный ожидаемый ток КЗ на вводных клеммах автоматических выключателей  $QF2$  определяют при следующих расчетных условиях:

расчетная схема – нормальная с питанием от Т2;

расчетный вид КЗ – трехфазное или однофазное металлическое;

расчетная продолжительность КЗ – начальный момент времени;

расчетное место КЗ – К13.

В результате расчета получен ток КЗ – 7625 А.

$$\cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{0,0111}{\sqrt{0,0111^2 + 0,0274^2}} = 0,375$$

Выбирают автоматические выключатели с предельной отключающей способностью 40 кА.

Окончательно выбранные защитные аппараты приведены в таблице П1.32.

Таблица П1.32 – Выбранные защитные аппараты и их защитные характеристики

Защитный аппарат	$I_{\text{ном}}, \text{А}$	Защитная характеристика
$QF1.1-1 - QF1.1-4$	6	$D$
$QF1.1$	20	Электронный расцепитель
$QF1.2-1 - QF1.2-4$	10	$C$
$QF1.2$	40	Электронный расцепитель
$QF1$	400	Электронный расцепитель
$QF2$	400	Электронный расцепитель

Выбор аппаратов считают завершённым.

**Приложение 2. Пример выбора защитных аппаратов в однофазной сети переменного тока системы сигнализации, централизации и блокировки**

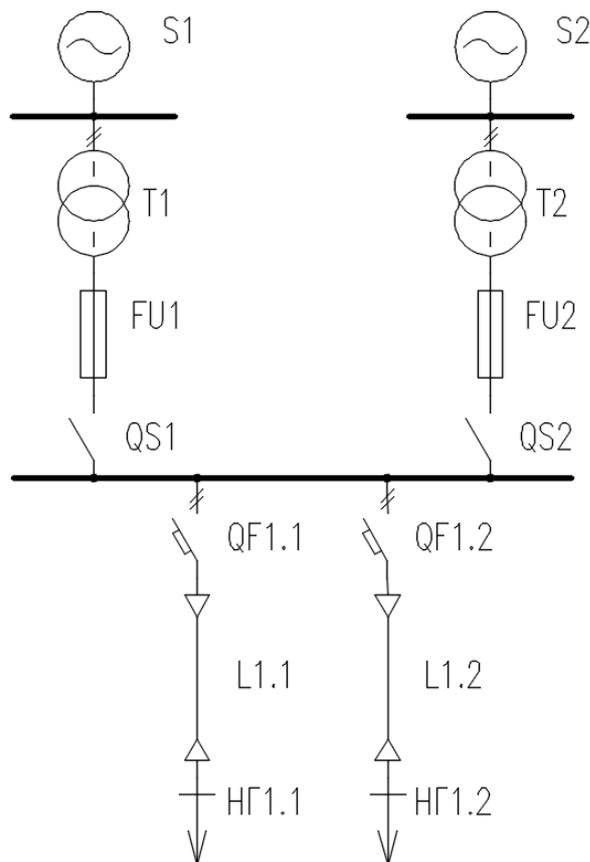


Рисунок П2.1 – Расчетная схема электроустановки

**Исходные данные:**

Сетевые источники:

$S1 \quad U_{\text{ср.ном}} = 10,5 \text{ кВ}; I_{\text{откл.ном}} = 82 \text{ А}; X_1/R_1 = 20.$

$S2 \quad U_{\text{ср.ном}} = 10,5 \text{ кВ}; I_{\text{откл.ном}} = 60 \text{ А}; X_1/R_1 = 20.$

Трансформаторы :

$T1 \quad \text{ОМ} - 4/10; \text{ схема соединения обмоток I/I};$   
 $S_{\text{ном}} = 4 \text{ кВ}\cdot\text{А}; U_{\text{ВНном}} = 10,0 \text{ кВ}; U_{\text{ННном}} = 0,23 \text{ кВ};$   
 $\Delta P_{\text{к.ном}} = 0,05 \text{ кВт}; U_{\text{к}} = 4,5 \text{ \%}.$

$T2 \quad \text{ОМ} - 4/10; \text{ схема соединения обмоток I/I};$   
 $S_{\text{ном}} = 4 \text{ кВ}\cdot\text{А}; U_{\text{ВНном}} = 10,0 \text{ кВ}; U_{\text{ННном}} = 0,23 \text{ кВ};$   
 $\Delta P_{\text{к.ном}} = 0,05 \text{ кВт}; U_{\text{к}} = 4,5 \text{ \%}.$

Кабельные линии:

$L1.1 \quad \text{ВВГнг-LS} - 3 \times 1,5; R_{\text{лиог}} = 11,76 \text{ мОм/м}; X_{\text{лиог}} = 0,12 \text{ мОм/м};$   
 изоляция поливинилхлоридная  
 $L = 50 \text{ м}$

$L1.2 \quad \text{ВВГнг-LS} - 3 \times 1,5; R_{\text{лиог}} = 11,76 \text{ мОм/м}; X_{\text{лиог}} = 0,12 \text{ мОм/м};$

изоляция поливинилхлоридная

$$L = 50 \text{ м}$$

Комплексная нагрузка:

$$\text{НГ1.1} \quad P_{\text{НОМ}} = 1,0 \text{ кВт}; U_{\text{НОМ}} = 220 \text{ В}; \cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,85; I_{\text{П}}/I_{\text{НОМ}} = 1,5$$

$$\text{НГ1.2} \quad P_{\text{НОМ}} = 1,5 \text{ кВт}; U_{\text{НОМ}} = 220 \text{ В}; \cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,85; I_{\text{П}}/I_{\text{НОМ}} = 1,5$$

## П2.1 Выбор аппаратов защиты

### П2.1.1 Выбор автоматического выключателя $QF1.1$

Вычисляют продолжительный расчетный ток комплексной нагрузки НГ1.1:

$$I_{\text{рНГ1.1}} = \frac{P_{\text{НГ1.1}}}{U_{\text{НГ1.1}} \cdot \cos\varphi_{\text{НГ1.1}}} = \frac{1,0}{220 \cdot 0,85} = 5,4 \text{ А.}$$

Выбирают номинальный ток автоматического выключателя  $QF1.1$ .

$$I_{\text{нQF1.1}} = 6 \text{ А} \geq I_{\text{рНГ1.1}}$$

Номинальный ток автоматического выключателя не превышает длительно допустимый ток защищаемого проводника  $L1.1$ , равный 19 А, что соответствует кабелю типа ВВГнг-LS-3x1,5.

Предварительно выбирают автоматический выключатель  $QF1.1$  с номинальным током 6 А и защитной характеристикой «С».

### П2.1.2 Выбор автоматических выключателей $QF1.2$

Вычисляют продолжительный расчетный ток комплексной нагрузки НГ1.2:

$$I_{\text{рНГ1.2}} = \frac{P_{\text{НГ1.2}}}{U_{\text{НГ1.2}} \cdot \cos\varphi_{\text{НГ1.2}}} = \frac{1,5}{220 \cdot 0,85} = 8,03 \text{ А.}$$

Выбирают номинальный ток автоматического выключателя  $QF1.2$ .

$$I_{\text{нQF1.2}} = 10 \text{ А} \geq I_{\text{рНГ1.2}}$$

Номинальный ток автоматического выключателя не превышает длительно допустимый ток защищаемого проводника  $L1.2$ , равного 19 А, что соответствует кабелю типа ВВГнг-LS-3x1,5.

Предварительно выбирают автоматический выключатель  $QF1.2$  с номинальным током 10 А и защитной характеристикой «С».

### П2.1.3 Выбор предохранителей $FU1, FU2$

Вычисляют наибольший рабочий ток нагрузки аппарата исходя из номинальной мощности трансформатора

$$I_{\text{нбТ1}} = \frac{S_{\text{нТ1}}}{U_{\text{нТ1}}} = \frac{4\text{кВА}}{220\text{В}} = 18,2 \text{ А.}$$

Предварительно выбирают предохранители  $FU1, FU2$  с номинальным током 20 А и защитной характеристикой  $gG$ .

## П2.2 Проверка отстройки аппаратов от пусковых токов

### П2.2.1 Проверка автоматического выключателя $QF1.1$

Защитная характеристика  $C$  определяет кратность срабатывания электромагнитного расцепителя от 5 до  $10 \cdot I_{\text{ном}}$ . Номинальный ток аппарата 6 А.

$$I_{\text{ср.мин.}} = 30 \text{ А}; I_{\text{ср.макс.}} = 60 \text{ А.}$$

Строят характеристики электроприемников нагрузки в защищаемой цепи совместно с защитной характеристикой аппарата, рисунок П2.2.

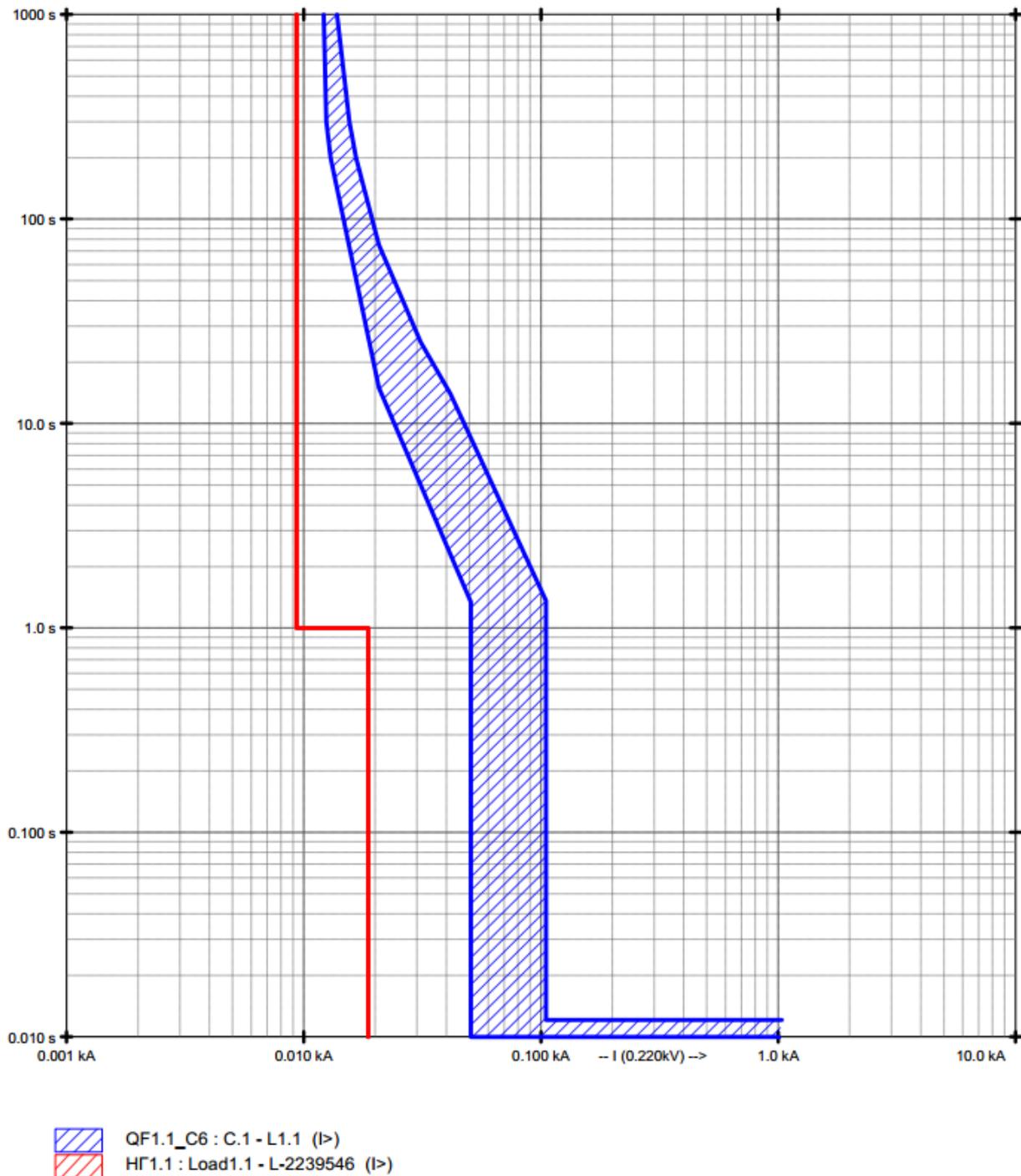


Рисунок П2.2 – Характеристики автоматического выключателя  $QF1.1$  (тип  $C$  6А) и электроприемников комплексной нагрузки  $HГ1.1$

Пересечения характеристик на диаграмме отсутствуют. Защитная характеристика аппарата расположена выше и левее характеристики нагрузки. Отстройки от пусковых токов нагрузки обеспечена.

#### П2.2.2 Проверка автоматического выключателя $QF1.2$

Характеристики электроприемников нагрузки в защищаемой цепи совместно с защитной характеристикой аппарата приведены на рисунок П2.3. Минимальный и максимальный токи срабатывания аппарата определяют по типу защитной характеристики «С».

$$I_{\text{ср.мин.}} = 50 \text{ A}; I_{\text{ср.макс.}} = 100 \text{ A.}$$

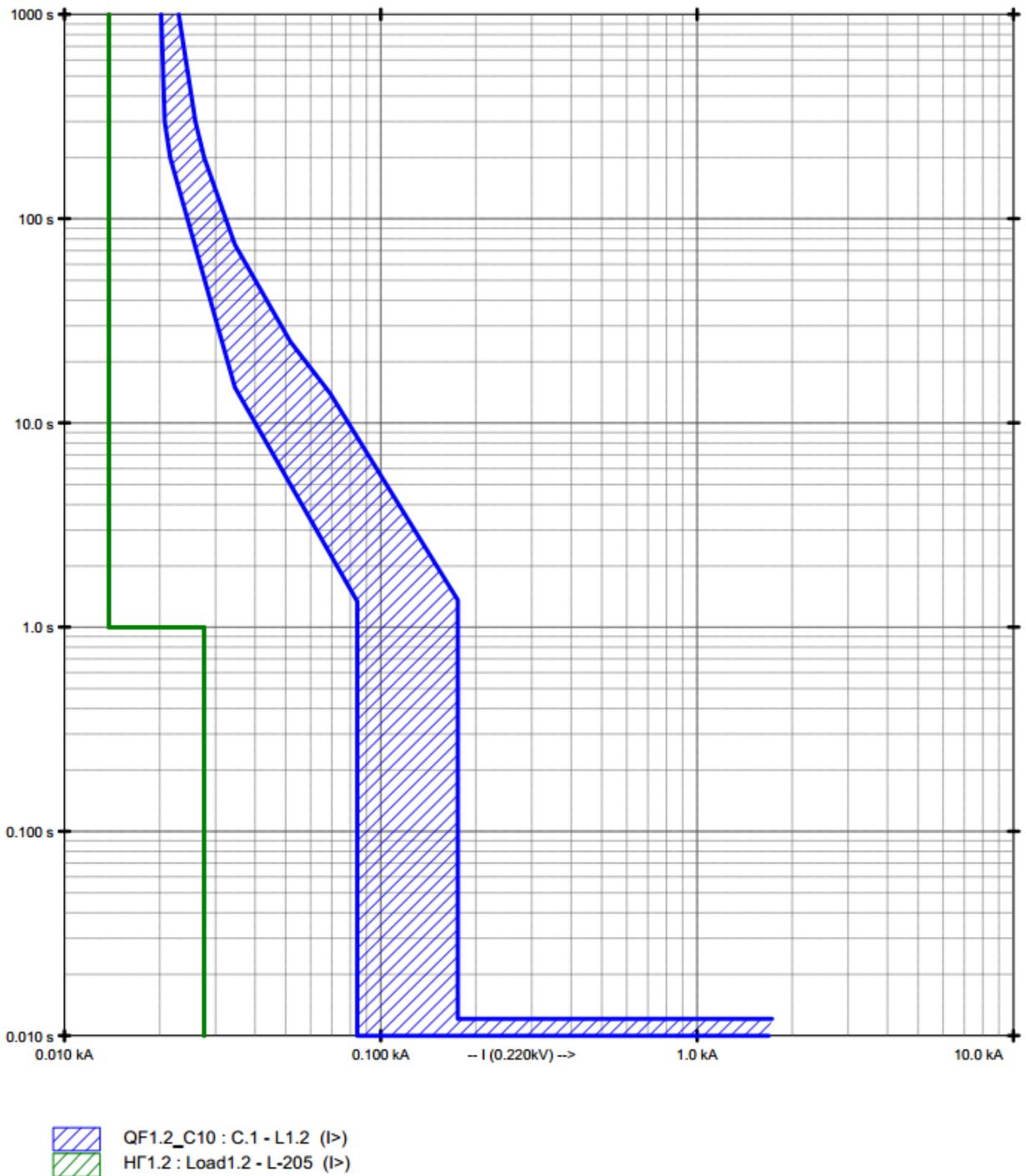


Рисунок П2.3 – Характеристики автоматических выключателей *QF1.2* (тип С 10А) и электроприемников комплексной нагрузки *HG1.2*

Отстройка от пусковых токов нагрузки обеспечена.

### П2.2.3 Проверка предохранителей *FU1*, *FU2*

Характеристики электроприемников нагрузки в защищаемой цепи совместно и защитная характеристика аппарата приведены на рисунок П2.4.

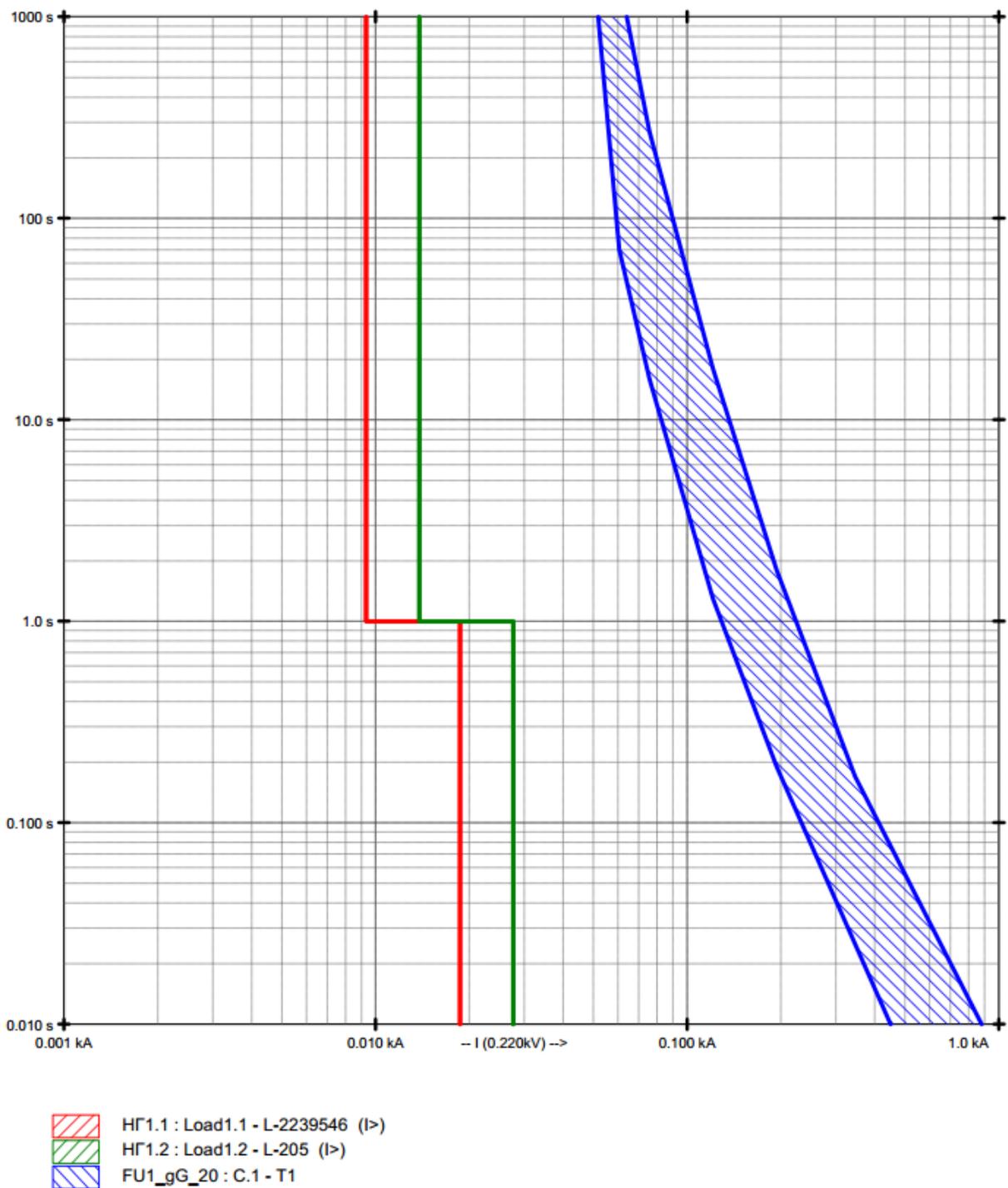


Рисунок П2.4 – Характеристики предохранителей  $FU1$ ,  $FU2$  (тип  $gG$  20A) и электроприемников комплексных нагрузок НГ1.1, 1.2. Отстройка от пусковых токов нагрузки обеспечена.

### П2.3 Проверка аппаратов на селективность

Селективность срабатывания последовательно включенных плавких предохранителей или автоматических выключателей считают обеспеченной, если зоны разброса их защитных характеристик, в диапазоне возможных значений сверхтоков, не пересекаются. Для подтверждения селективности

отключающих защитных аппаратов строят карту селективности, с защитными характеристиками с учетом разброса их параметров. Максимально возможные значения токов КЗ определены при проверке отключающей способности автоматических выключателей (см.П2.6)

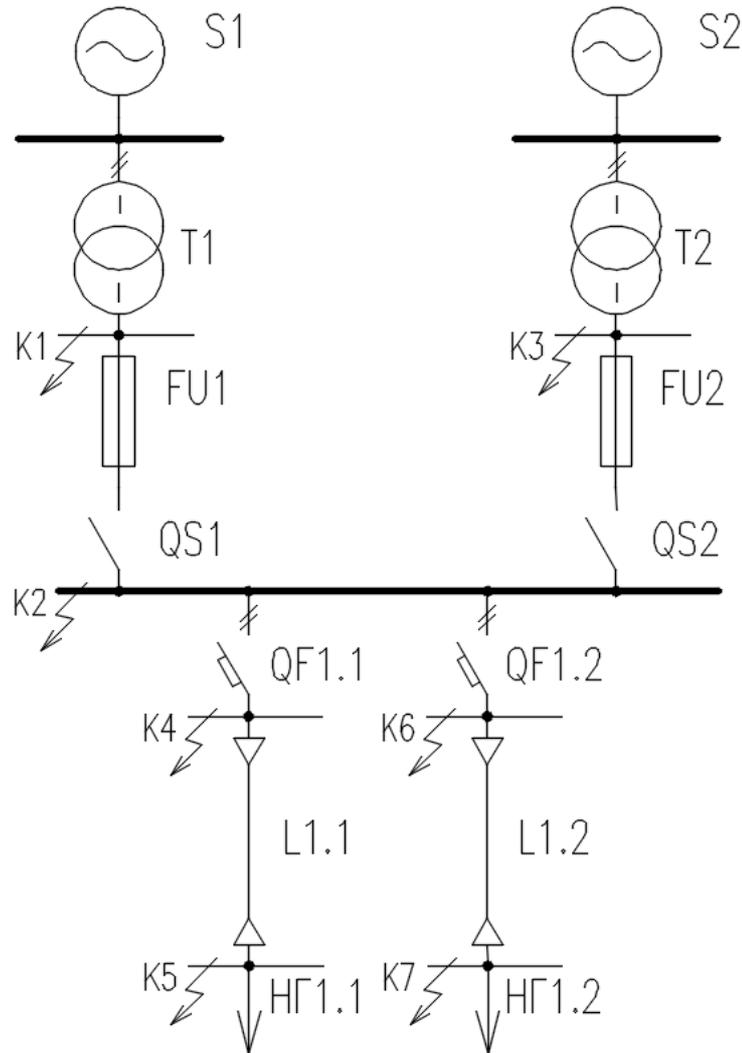


Рисунок П2.5 – Схема для расчета токов КЗ

Селективность автоматических выключателей частично обеспечивается (см. рисунки П2.6, 2.7).

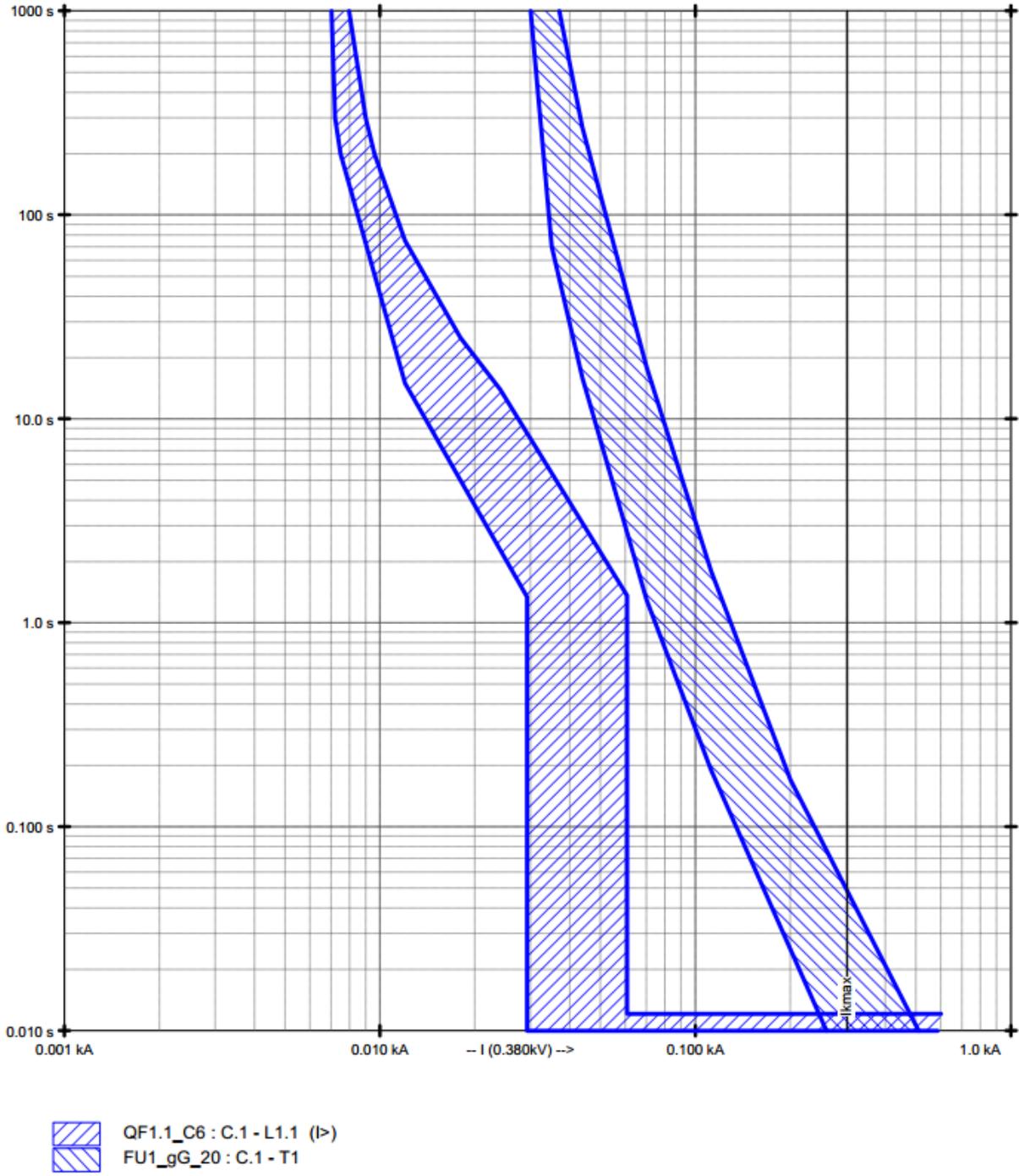


Рисунок П2.6 – Карта селективности автоматического выключателя  $QF1.1$  (тип С 6А) и предохранителя  $FU1$  (тип  $gG$  20А)

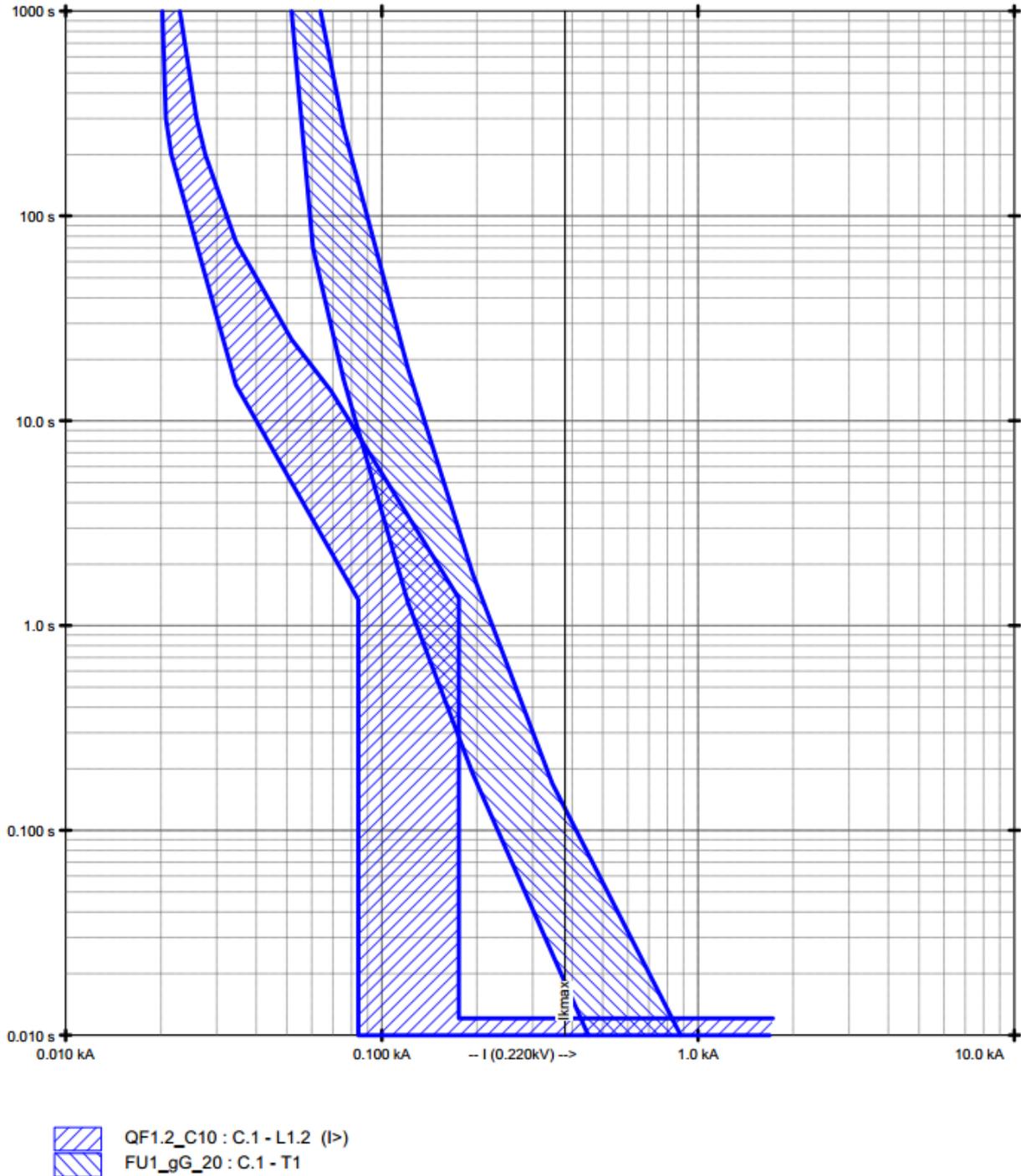


Рисунок П2.7 – Карта селективности автоматического выключателя  $QF1.2$  (тип С 10А) и предохранителя  $FU1$  (тип  $gG$  20А)

Увеличивают номинальный ток предохранителей  $FU1$ ,  $FU2$  и повторяют построение карт селективности. Селективность автоматических выключателей частично обеспечивается (см. рисунок П2.8, П2.9).

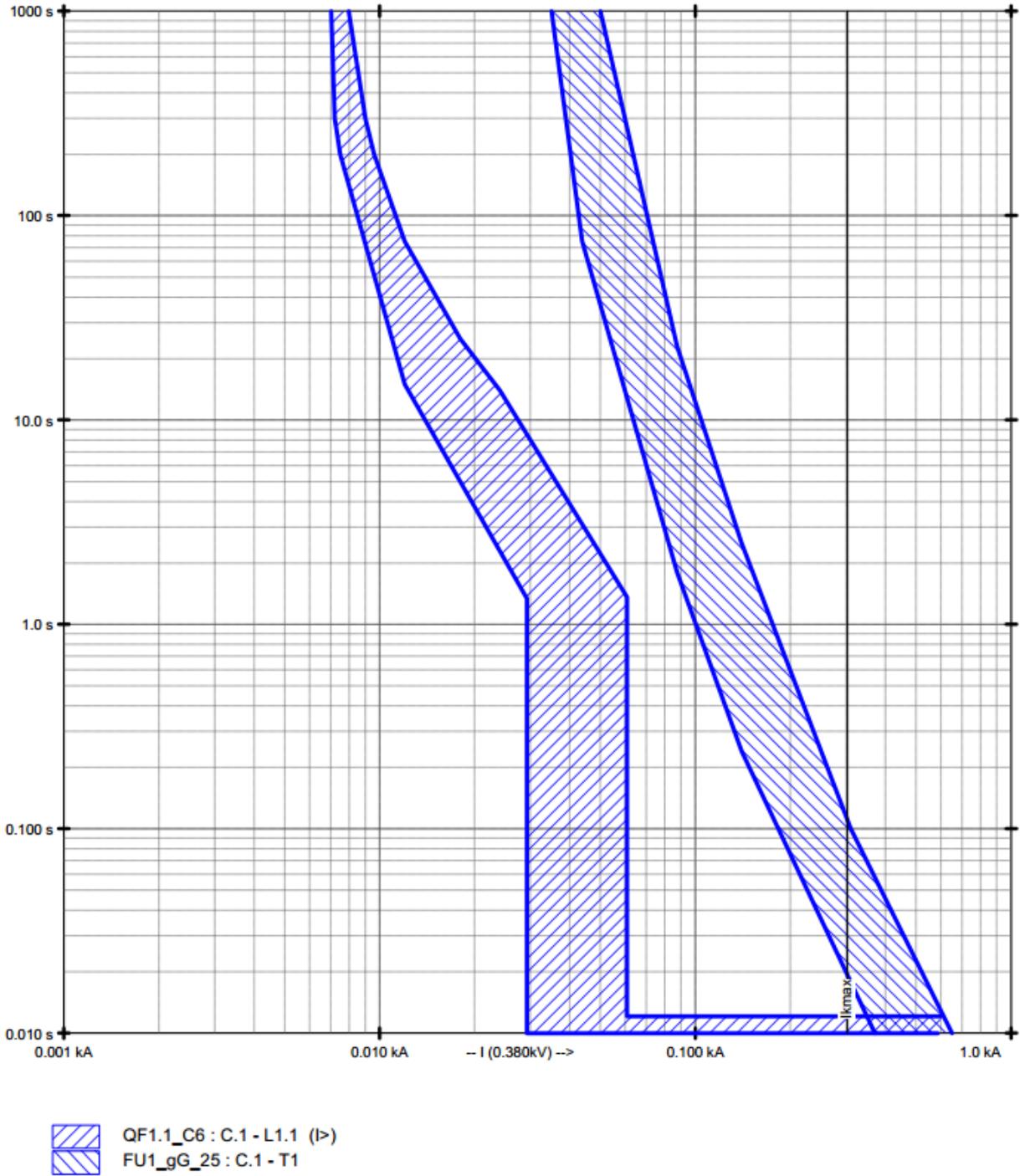


Рисунок П2.8 – Карта селективности автоматического выключателя *QF1.1* (тип С 6А) и предохранителя *FU1* (тип *gG 25A*)

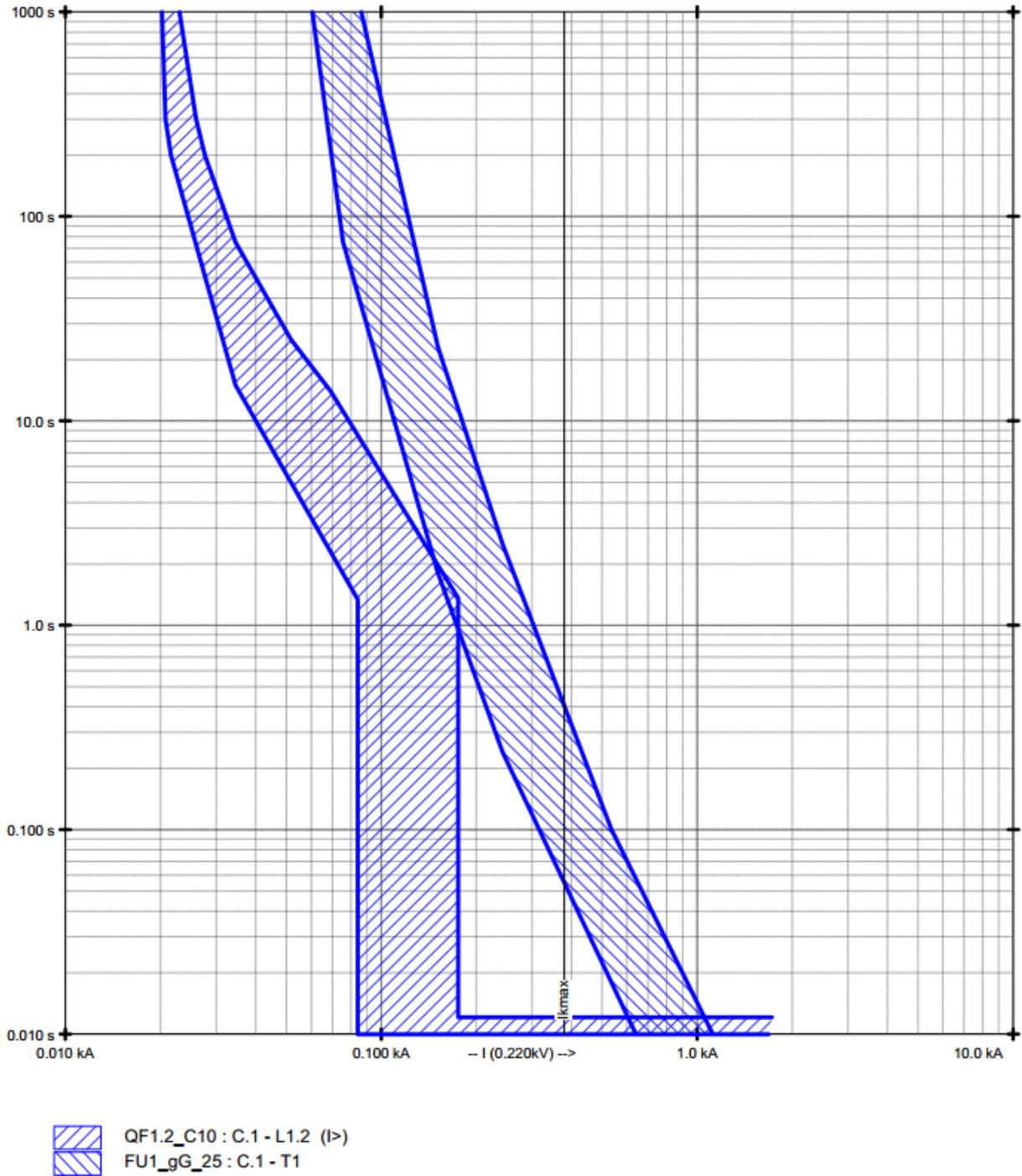


Рисунок П2.9 – Карта селективности автоматического выключателя  $QF1.2$  (тип С 10А) и предохранителя  $FU1$  (тип  $gG$  25А)

Повторно увеличивают номинальный ток предохранителей  $FU1$ ,  $FU2$  и повторяют построение карт селективности. Селективность автоматических выключателей обеспечивается во всем диапазоне возможных токов КЗ (см. рисунки П2.10, П2.11).

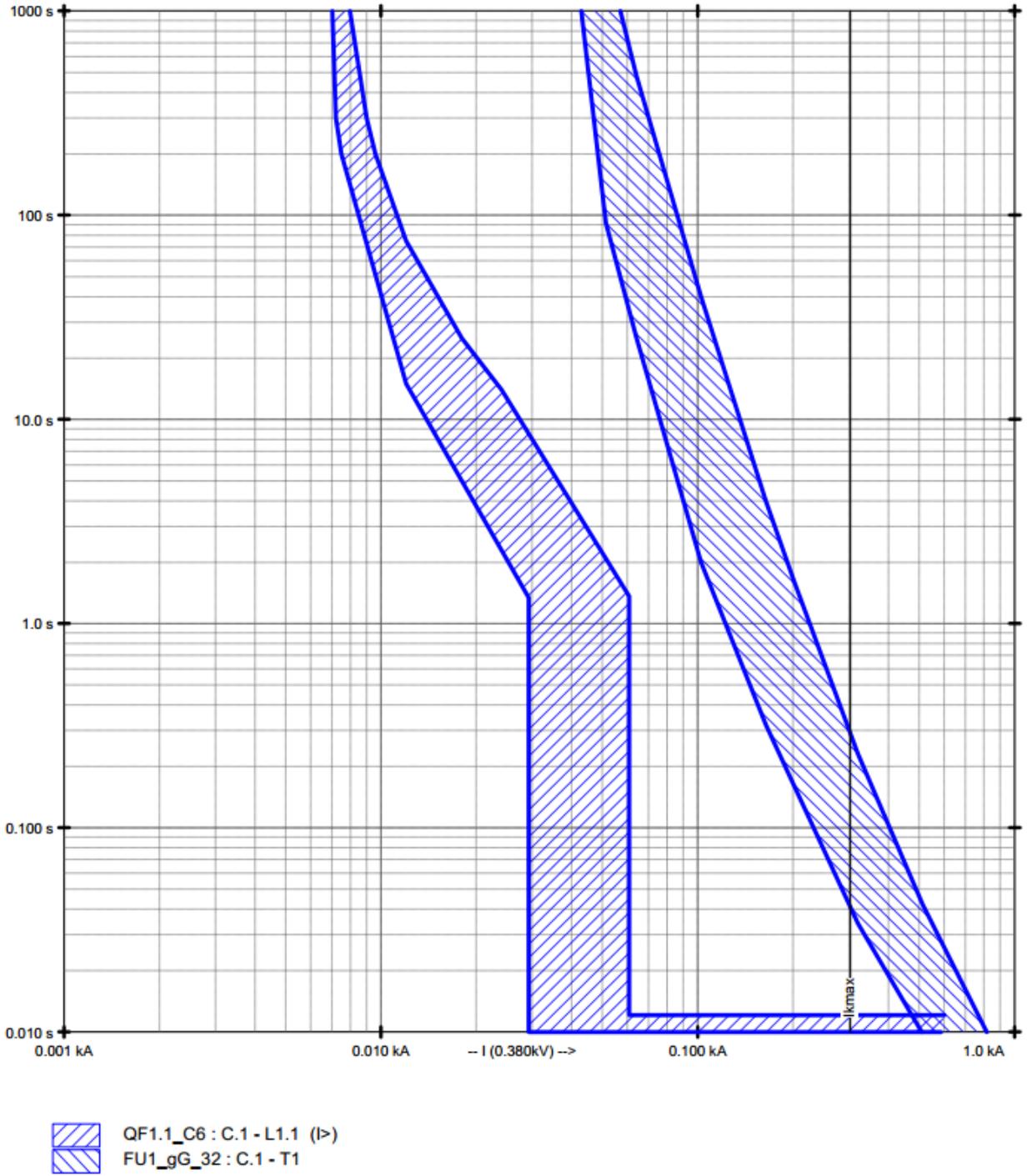


Рисунок П2.10– Карта селективности автоматического выключателя *QF1.1* (тип С 6А) и предохранителя *FU1* (тип *gG 32А*)

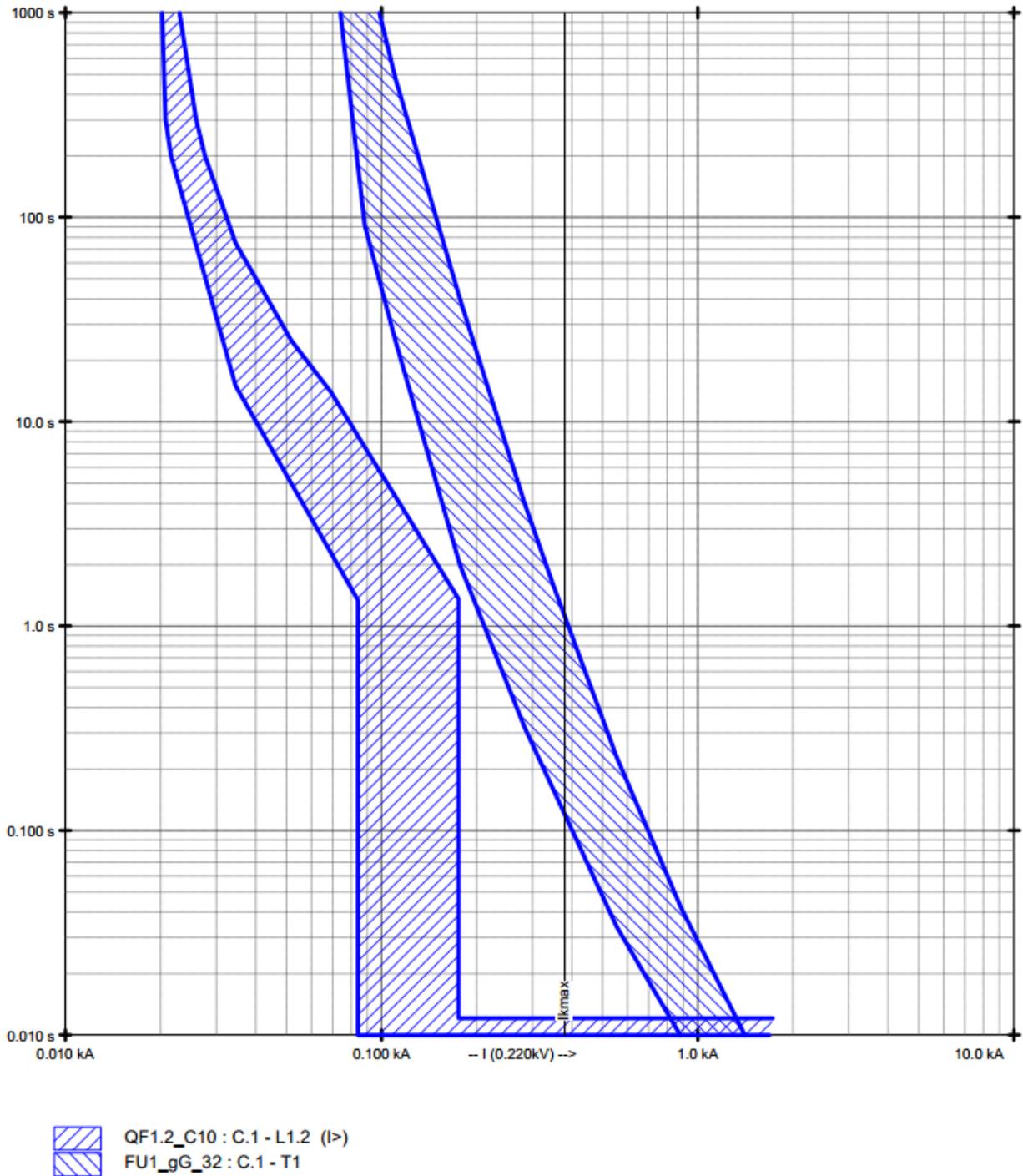


Рисунок П2.11– Карта селективности автоматического выключателя *QF1.2* (тип С 10А) и предохранителя *FU1* (тип *gG 32А*)

## П2.4 Проверка защитных аппаратов на чувствительность

Чувствительность автоматических выключателей обеспечивается, если коэффициент чувствительности больше или равен 1,1 в основной и резервной зоне защиты.

Чувствительность предохранителей считают удовлетворительной, если выполняются условия его проверки по условию быстрого действия.

### П2.5.1 Автоматический выключатель *QF1.1*

Минимальный ток КЗ в конце основных зон защиты автоматического выключателя *QF1.1* – ток дугового КЗ в точке К5 при питании от резервного

трансформатора Т2. Автоматический выключатель  $QF1.1$  является нижним уровнем защиты, т.е. резервная зона защиты отсутствует.

Токи дугового КЗ в точке К5 представлены в таблице П2.1:

Таблица П2.1 – Результаты проверки чувствительности  $QF1.1$

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности Кч
К5	126	2,1

Чувствительность  $QF1.1$  обеспечивается.

#### П2.5.2 Автоматический выключатель $QF1.2$

Минимальный ток КЗ в конце основных зон защиты автоматического выключателя  $QF1.2$  – ток дугового КЗ в точке К7 при питании от резервного трансформатора Т2. Автоматический выключатель  $QF1.2$  является нижним уровнем защиты, т.е. резервная зона защиты отсутствует.

Токи дугового КЗ в точке К7 представлены в таблице П2.2:

Таблица П2.2 – Результаты проверки чувствительности  $QF1.2$

Расчетная точка КЗ	Минимальный ток КЗ, А	Коэффициент чувствительности Кч
К7	129	1,29

Чувствительность  $QF1.2$  обеспечивается.

### П2.5 Проверка защитных аппаратов на быстродействие

Проверка аппарата на быстродействие включает в себя проверку термической стойкости проводника в основной зоне защиты, невозгораемости проводника в резервной зоне защиты и проверку параметров провалов напряжения, при отключении аппаратом КЗ.

Таблица П2.3 – Расчетные условия для проверки термической стойкости и невозгораемости проводников

Расчетное условие	Набор 1	Набор 2
Расчетная схема	Нормальная	Нормальная
Расчетная точка КЗ	Начало КЛ	Конец КЛ
Расчетный вид КЗ	Дуговое КЗ	Металлическое КЗ

В дополнение к расчетным условиям П1.16 расчетную продолжительность КЗ принимают в зависимости от вида проверки:

- равной времени срабатывания основной защиты проводника при проверке на термическую стойкость;
- равной времени срабатывания резервной защиты проводника при проверке на невозгораемость.

#### П2.6.1 Предохранители $FU1, FU2$

Для проверки быстродействия предохранителей  $FU1$ ,  $FU2$  определяют температуру кабелей  $L1.1$ ,  $L1.2$  при отключении КЗ в резервной зоне. Результаты расчетов сведены в таблицу П2.4.

Таблица П2.4 – Результаты расчета токов КЗ для проверки невозгораемости проводников  $L1.1$ ,  $L1.2$

Кабельная линия	Набор расчетных условий – место КЗ на рис. П2.5	Защитный аппарат	Время отключения	Ток КЗ	Температура
$L1.1$ ВВГнг-LS- 3x1,5мм <sup>2</sup>	Набор 1 – К4	$FU1$	0,11	303	43,4
	Набор 2 – К5		3,1	131	98,0
$L1.1$ ВВГнг-LS- 3x1,5мм <sup>2</sup>	Набор 1 – К6	$FU1$	0,09	324	41,8
	Набор 2 – К7		2,8	135	84,8

Невозгораемость линий  $L1.1$ ,  $L1.2$  при КЗ обеспечена, следовательно, одно из условий удовлетворительного быстродействия предохранителей  $FU1$ ,  $FU2$  выполнено.

#### П2.6.2 Автоматический выключатель $QF1.1$

Для проверки быстродействия автоматического выключателя определяют температуру кабеля  $L1.1$  при отключении КЗ в основной зоне автоматического выключателя  $QF1.1$  (резервная зона защиты отсутствует). Результаты расчетов сведены в таблицы П2.5.

Таблица П2.5 – Результаты расчета токов КЗ для проверки термической стойкости проводника  $L1.1$

Кабельная линия	Набор расчетных условий – место КЗ на рис. П2.5	Защитный аппарат	Время отключения	Ток КЗ	Температура
$L1.1$ ВВГнг-LS- 3x1,5мм <sup>2</sup>	Набор 1 – К4	$QF1.1$	0,01	303	22,0
	Набор 2 – К5			131	20,4

Термическая стойкости линий  $L1.1$  при КЗ обеспечена, следовательно, одно из условий удовлетворительного быстродействия автоматического выключателя  $QF1.1$  выполнено.

#### П2.6.3 Автоматический выключатель $QF1.2$

Для проверки быстродействия автоматического выключателя определяют температуру кабеля  $L1.2$  при отключении КЗ в основной зоне автоматического выключателя  $QF1.2$  (резервная зона защиты отсутствует). Результаты расчетов сведены в таблицы П2.6.

Таблица П2.6 – Результаты расчета токов КЗ для проверки термической стойкости проводника  $L1.2$

Кабельная	Набор расчетных	Защитный	Время	Ток	Температура
-----------	-----------------	----------	-------	-----	-------------

линия	условий – место КЗ на рис. П2.5	аппарат	отключения	КЗ	
L1.2 ВВГнг-LS- 3x1,5мм <sup>2</sup>	Набор 1 – К6	QF1.2	0,01	324	22,3
	Набор 2 – К7			135	20,4

Термическая стойкости линий L1.2 при КЗ обеспечена, следовательно, одно из условий удовлетворительного быстродействия автоматического выключателя QF1.2 выполнено.

### П2.6.3 Проверка быстродействия аппаратов по критерию провалов и кратковременных прерываний напряжения

Для проверки по провалам напряжения определяется напряжение на секциях шинах щита при:

- металлическом коротком замыкании в конце основной зоны защиты;
- дуговым коротком замыкании в начале основной зоны защиты.

Проверка считается пройденной, если остаточное напряжение провала составляет не ниже:

- $0,7 \cdot U_{ном}$  при продолжительности не более 1 с;
- $0,4 \cdot U_{ном}$  при продолжительности не более 20 мс.

Результаты расчета токов короткого замыкания для проверки по провалам напряжения приведены в таблицах П2.7, П2.8.

Таблица П2.7 – Результаты проверки провалов напряжения при металлическом КЗ в конце КЛ

Защитный аппарат	Точка КЗ	Ток КЗ, А	Длительность провала, мс	Остаточное напряжение при провале, В (%)
QF1.1	конец КЛ L1.1 точка К5	131	10	185 (84)
QF1.2	конец КЛ L1.2 точка К7	135	10	186 (85)

Таблица П2.8 – Результаты проверки провалов напряжения при дуговом КЗ в начале КЛ

Защитный аппарат	Точка КЗ	Ток КЗ, А	Длительность провала, мс	Остаточное напряжение при провале, В (%)
QF1.1	начало КЛ L1.1 точка К4	303	10	41 (19)
QF1.2	начало КЛ L1.2 точка К6	324	10	29 (13,2)

Остаточное напряжение провалов напряжения на шинах распределительного щита ниже допустимого значения. Следует предусмотреть технические решения, исключая возникновение коротких замыканий вблизи распределительного щита.

## П2.6 Проверка аппаратов на отключающую способность

Для проверки плавких предохранителей и автоматических выключателей на отключающую способность следует рассчитать максимальный ожидаемый ток короткого замыкания для металлического короткого замыкания на клеммах плавкого предохранителя или автоматического выключателя со стороны наиболее мощного источника в начальный момент времени короткого замыкания. Расчет токов КЗ в однофазных цепях производят аналогично расчету однофазных КЗ в трехфазных сетях, за исключением снижения сопротивления однофазного трансформатора в 3 раза по сравнению с трехфазным.

Наибольшая отключающая способность плавких предохранителей и автоматических выключателей должна быть больше максимального ожидаемого тока короткого замыкания.

### П2.3.1 Автоматический выключатель $QF1.1$ , $QF1.2$

Максимальный ожидаемый ток КЗ на вводных клеммах автоматического выключателя  $QF1.1$  – ток металлического КЗ в точке К2 при питании от источника Т1 – составляет:

$$I_{н.о} \geq I_{кз.макс} = 355 \text{ А.}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{0,222}{\sqrt{0,222^2 + 0,558^2}} = 0,37$$

Выбирают автоматические выключатели с предельной отключающей способностью 10 кА.

### П2.3.2 Предохранители $FU1$ , $FU2$

Максимальный ожидаемый ток КЗ на вводных клеммах предохранителя  $FU1$  – ток металлического КЗ в точке К1 при питании от источника Т1 – составляет:

$$I_{н.о} \geq I_{кз.макс} = 357 \text{ А.}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{0,225}{\sqrt{0,225^2 + 0,558^2}} = 0,37$$

Выбирают предохранители с предельной отключающей способностью 10 кА.

Окончательно выбранные защитные аппараты приведены в таблице П2.9.

Таблица П2.9 – Выбранные защитные аппараты и их защитные характеристики

Защитный аппарат	$I_{ном}, \text{ А}$	Защитная характеристика
$QF1.1$	6	C
$QF1.2$	10	C
$FU1$	32	gG
$FU2$	32	gG

Выбор аппаратов считают завершенным.

### Приложение 3. Пример выбора защитных аппаратов в сети оперативного постоянного тока тяговой подстанции

#### ПЗ.1 Исходные данные

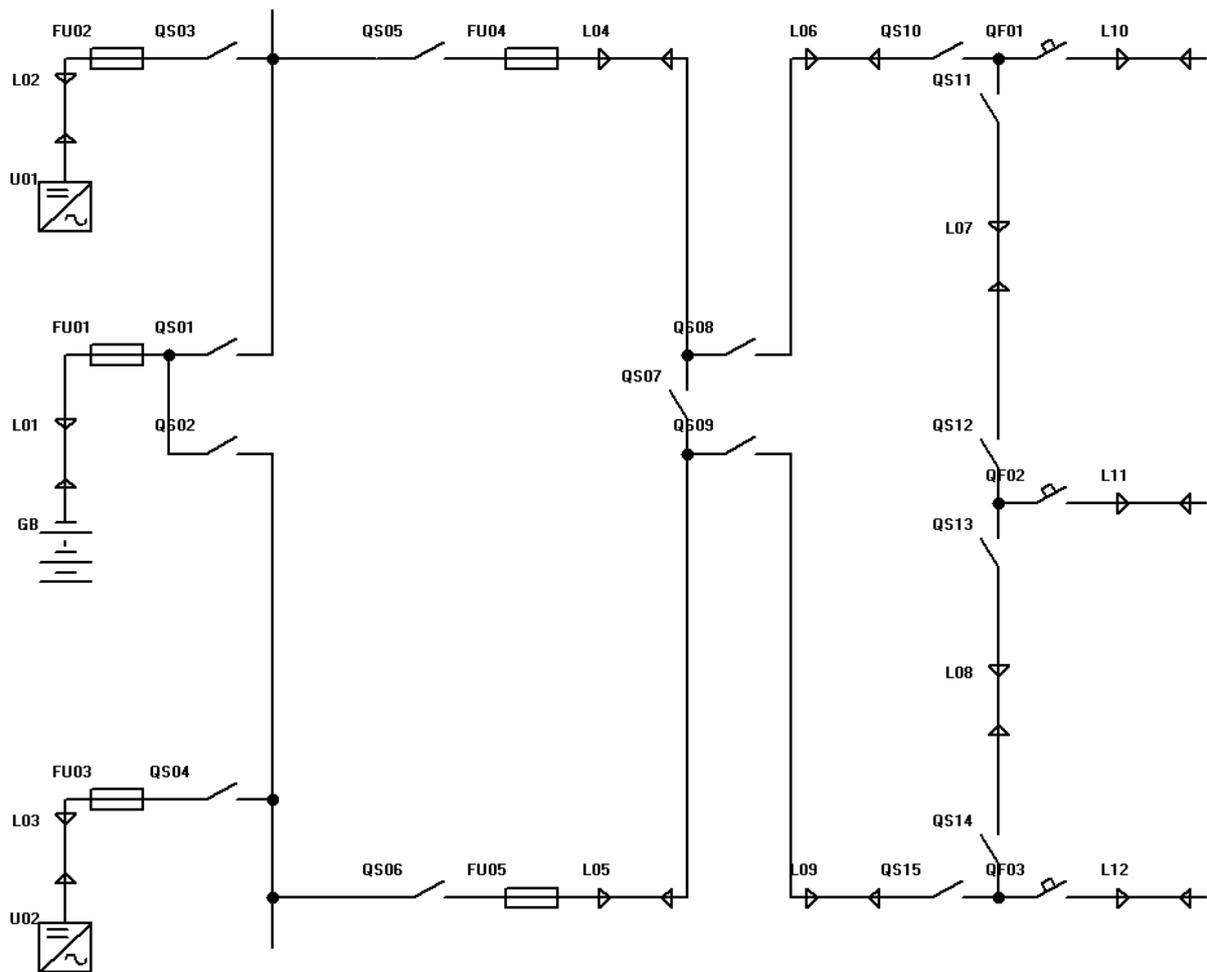


Рисунок ПЗ.1. Схема сети оперативного постоянного тока

Таблица ПЗ.1 – Кабельные линии

Обозначение	$S, \text{мм}^2$	$L, \text{м}$	$n$	$R_{\text{уд}}, \text{мОм/м}$
L01	150	35	1	0,123
L02	50	40	2	0,368
L03	50	40	2	0,368
L04	120	250	1	0,153
L05	120	250	1	0,153
L06	95	40	1	0,194
L07	95	10	1	0,194
L08	95	10	1	0,194
L09	95	10	1	0,194
L10	95	5	1	0,194
L11	95	5	1	0,194
L12	95	5	1	0,194

Таблица П3.2 – Устройства заряда-подзаряда

Обозначение	Тип	$I_n, A$	$I_{огр}, A$
U01	ВАЗП	80	92
U02	ВАЗП	80	92

Таблица П3.3 – Аккумуляторная батарея

Обозначение	Тип	$C10, A \cdot ч$	n
GB	СК-20	720	128

### П3.2 Выбор аппаратов защиты

#### П3.2.1. Выбор автоматических выключателей QF01, QF02, QF03.

Выбор номинального тока автоматических выключателей осуществляется по продолжительному расчетному току,  $I_p$ :

$$I_p = I_{пт.н} + I_{вр.н} + 0,4 \cdot I_{кр.н}$$

Для определения продолжительного расчетного тока, соответствующего каждому автоматическому выключателю был определен состав нагрузки, представленный в таблице П3.4.

Таблица П3.4 – Состав нагрузки

Наименование	$I_n, A$	Тип	Присоединение
Электромагнитный привод ПЭ-22	160	Кратковременная	L10
Электромагнитный привод ПЭ-11	100	Кратковременная	L11
Пружинный привод ПП	5	Постоянная	L12

Для каждого выключателя был найден продолжительный расчетный ток и наименьший возможный номинальный ток.

К примеру, для выключателя QF01 продолжительный расчетный ток составил:

$$I_{pQF01} = 0 + 0 + 0,4 \cdot 160 = 64A$$

Наименьший номинальный ток, удовлетворяющий условию

$$I_n \geq I_p$$

составляет 80 А. Номинальный ток автоматических выключателей не должен превышать длительно допустимый ток защищаемых кабелей L04, L05, равный 245 А для всех кабелей. Результаты выбора номинального тока для остальных автоматических выключателей представлены в таблице П3.5.

Таблица П3.5 – Выбор номинальных токов автоматических выключателей

Дисп. имя	Ток нагрузки, А			$I_p, A$	$I_n, A$
	постоянной	временной	кратковременной		
QF01	-	-	160	64	80
QF02	-	-	100	40	40
QF03	5	-	-	5	16

### П3.2.2. Выбор предохранителей $FU01, FU02, FU03, FU04, FU05$ .

Выбор номинального тока предохранителей  $FU01, FU04, FU05$  осуществляется аналогично выбору номинального тока автоматических выключателей.

К примеру, для предохранителя  $FU04$  продолжительный расчетный ток составил:

$$I_p FU04 = 5 + 0 + 0,4 \cdot 160 = 69 \text{ А.}$$

Наименьший номинальный ток, удовлетворяющий условию

$$I_n \geq I_p$$

составляет 80 А. Номинальный ток автоматических выключателей не должен превышать длительно допустимый ток защищаемых кабелей  $L08$  и  $L09$ , равный 295 А для обоих кабелей. Результаты выбора номинального тока для остальных предохранителей представлены в таблице П3.6.

Таблица П3.6 – Выбор номинальных токов автоматических выключателей

Дисп. имя	Ток нагрузки, А			$I_p, \text{ А}$	$I_n, \text{ А}$
	постоянной	временной	кратковременной		
$FU01$	5	-	150	69	80
$FU04$	5	-	150	69	80
$FU05$	5	-	150	69	80

Для предохранителей  $FU02$  и  $FU03$ , установленных в цепи зарядных устройств  $U01$  и  $U02$  продолжительный расчетный ток определен исходя из номинального тока защищаемого устройства:

$$I_p FU02 = I_p FU03 = 1,15 \cdot I_{нЗУ} = 1,15 \cdot 80 = 92 \text{ А.}$$

Соответственно были выбраны предохранители с номинальным током 100 А. Номинальный ток предохранителей  $FU02$  и  $FU03$  не должен превышать длительно допустимый ток защищаемых кабелей  $L02$  и  $L03$ , равный 160 А для обоих кабелей.

### П3.3 Выбор защитных характеристик аппаратов

Для выключателей  $QF01, QF02$  и  $QF03$  была выбрана нерегулируемая характеристика типа «С».

Для предохранителей  $FU01, FU02, FU03, FU04$  и  $FU05$  была выбрана характеристика типа «gG», соответствующая номинальному току.

### П3.4 Проверка отстройки от токов кратковременной нагрузки.

Автоматические выключатели  $QF01$  и  $QF02$  защищают кратковременные нагрузки с номинальным током 150 и 100 А, соответственно. Согласно защитной характеристике типа «С», представленной на рисунке П3.2. Время срабатывания выключателя  $QF01$ , при прохождении через него тока 150 А, и время срабатывания выключателя  $QF02$ , при прохождении через него тока 100 А, составляет более 5 секунд. Оба выключателя отстроены от токов кратковременной нагрузки.

Предохранители  $FU01$ ,  $FU04$  и  $FU05$ , согласно характеристике, приведенной на рисунке П3.3 также начинают процесс плавления, при прохождении через них тока 150 А более чем через 5 секунд. Предохранители  $FU01$ ,  $FU04$  и  $FU05$  отстроены от кратковременной нагрузки.

Предохранители  $FU02$  и  $FU03$  не требуют проверки отстройки от токов кратковременной нагрузки.

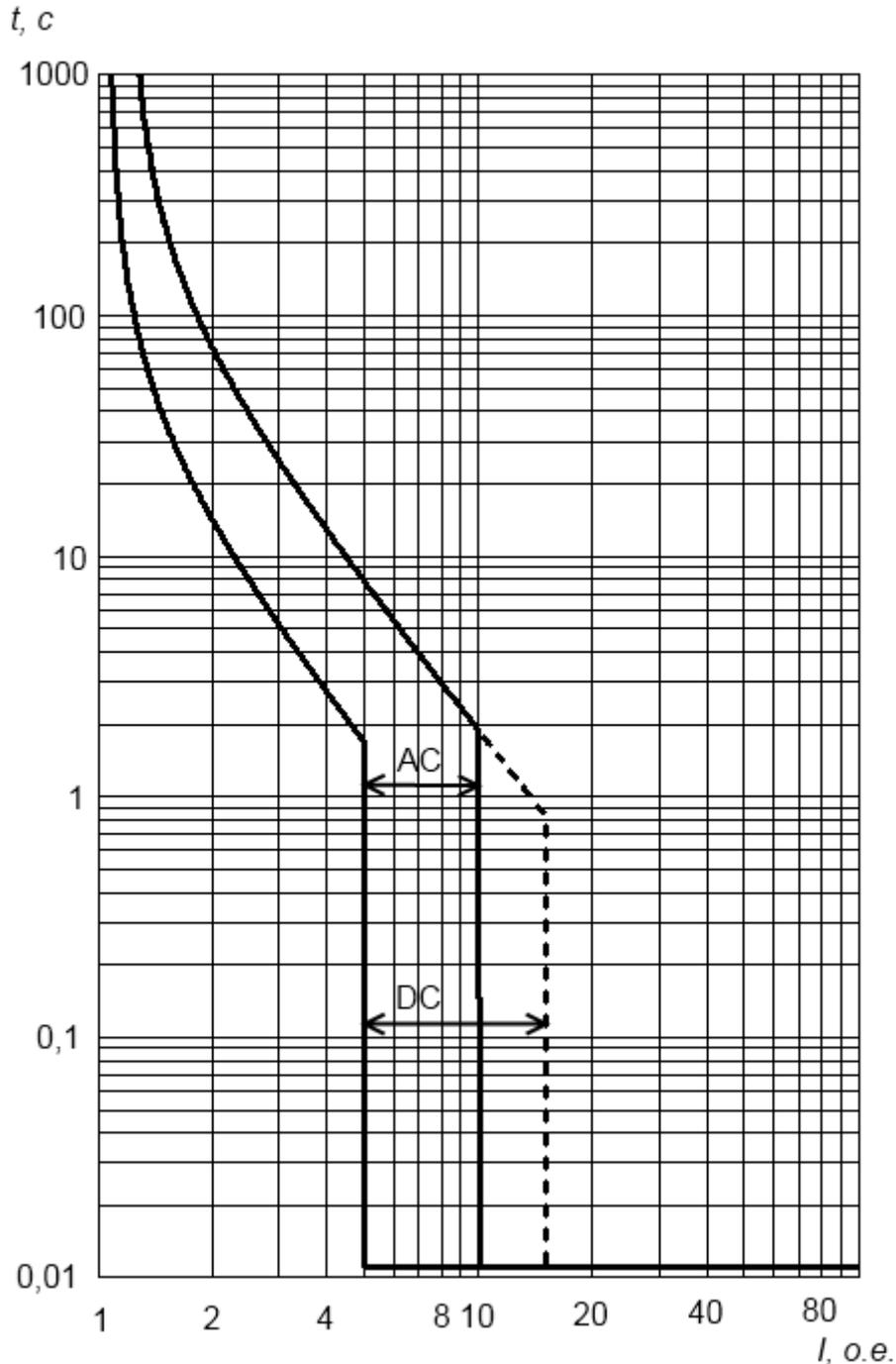


Рисунок П3.2. Защитная характеристика автоматического выключателя с расцепителем типа С. Для выключателей переменного тока (AC) и постоянного (DC).

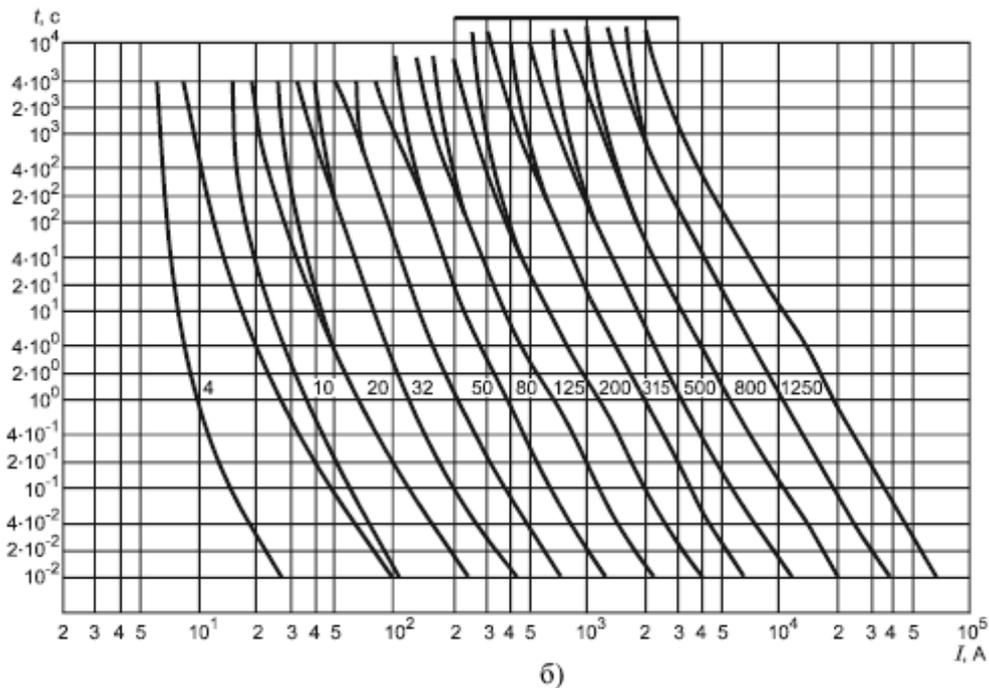


Рисунок ПЗ.3. Защитные характеристики плавких вставок некоторых номинальных токов типа «gG».

### ПЗ.5 Проверка селективности срабатывания защитных аппаратов

ПЗ.5.1 Проверка селективности срабатывания автоматических выключателей  $QF01$ ,  $QF02$  и  $QF03$  и предохранителей  $FU04$ ,  $FU05$ .

Очевидно, что селективность выключателя  $QF01$  с характеристикой «C» 80 А и предохранителей  $FU04$  и  $FU05$  с плавкой вставкой типа «gG» 80 А не обеспечена и требуется увеличение номинального тока плавкой вставки предохранителей  $FU04$  и  $FU05$ .

Номинальные токи предохранителей  $FU04$  и  $FU05$  были увеличены до 200 А. Карта селективности для выключателя  $QF01$  и предохранителя  $FU04$  приведена на рисунке ПЗ.4. Селективность между ними обеспечена в диапазоне токов КЗ до 2800 А. Для расчета максимальных токов КЗ в пересечении защитных зон рассматриваемых защитных аппаратов были приняты следующие условия: металлическое КЗ на выходных клеммах нижестоящего защитного аппарата, оба устройства заряда-подзаряда подключены, рубильники  $QS07$  и  $QS10$  разомкнуты. Результаты расчета приведены в таблице ПЗ.7.

Таблица ПЗ.7 – Проверка селективности автоматических выключателей и предохранителей  $FU04$ ,  $FU05$

Пара защитных аппаратов	Вид и место КЗ	$I_{кз}, A$
$FU04(FU05) - QF01$	Металлическое КЗ на выходных клеммах $QF01$	1843
$FU04(FU05) - QF02$	Металлическое КЗ на выходных клеммах $QF02$	1913
$FU04(FU05) - QF03$	Металлическое КЗ на выходных клеммах $QF03$	1982

Выключатели  $QF02$  и  $QF03$  обладают тем же типом характеристики что выключатель  $QF01$  и меньшими номинальным токами. Селективность между ними и предохранителями  $FU04$  и  $FU05$  также обеспечена в диапазоне токов КЗ до 2800 А. Селективность между предохранителями  $FU04$ ,  $FU05$  и автоматическими выключателями  $QF01$ ,  $QF02$  и  $QF03$  обеспечена во всем диапазоне возможных токов КЗ.

П3.5.2 Проверка селективности срабатывания предохранителя  $FU01$  и предохранителей  $FU02$ ,  $FU03$ ,  $FU04$ ,  $FU05$ .

Для обеспечения селективности между предохранителем  $FU01$  и предохранителями второго уровня защиты  $FU02$ ,  $FU03$ ,  $FU04$ ,  $FU05$ , согласно рисунку П3.3, требуется увеличить номинальный ток предохранителя  $FU01$  до 315 А. При этом обеспечивается селективность во всем диапазоне токов КЗ.

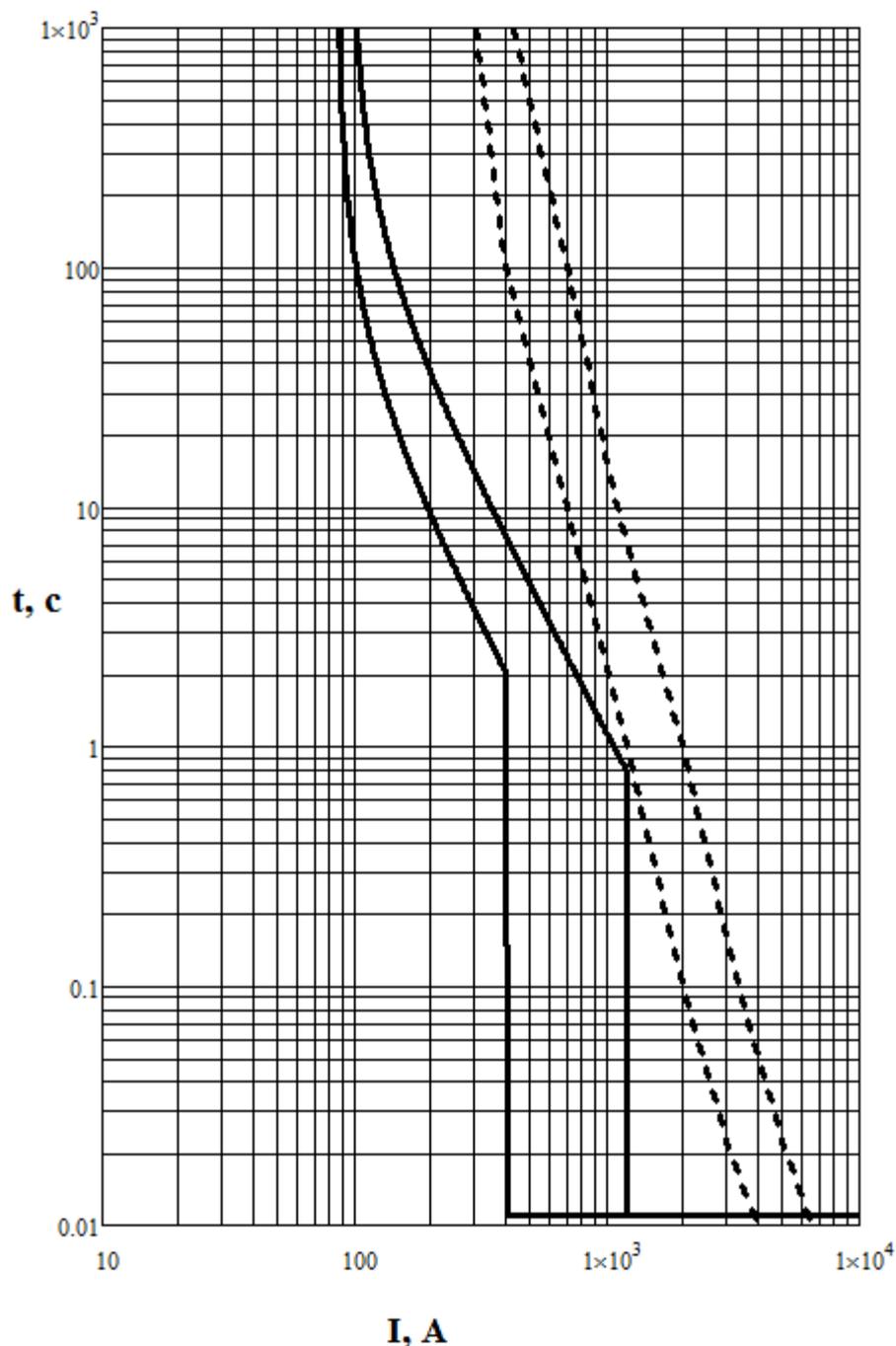


Рисунок ПЗ.4. Карта селективности: сплошная линия –  $QF01$  (характеристика  $C$  80 А), пунктирная линия –  $FU04$  (плавкая вставка  $gG$  200 А).

### ПЗ.6 Проверка чувствительности защитных аппаратов

ПЗ.6.1. Проверка чувствительности автоматических выключателей  $QF01$ ,  $QF02$  и  $QF03$ .

Для проверки чувствительности выключателей  $QF01$ ,  $QF02$  и  $QF03$  были рассчитаны токи дуговых КЗ на концах линий  $L10$ ,  $L11$  и  $L12$ , соответственно. При этом, для обеспечения режима минимальных токов КЗ, были приняты следующие расчетные условия: были отключены оба устройства заряда-подзаряда  $U01$  и  $U02$ , разомкнуты рубильники  $QS07$  и  $QS15$ , а внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи  $GB$  было увеличено в 1,5 раза. Результаты расчета токов КЗ приведены в таблице ПЗ.8. Максимальный ток срабатывания определялся с учетом разброса и для характеристики «С» при применении в сетях постоянного тока составляет 15 крат от номинального тока. Коэффициент чувствительности определялся как их отношение.

Таблица ПЗ.8 – Проверка чувствительности автоматических выключателей

Дисп. имя	Вид и место КЗ	$I_{кз}, А$	$I_{ср.макс.}, А$	$K_{ч}$
$QF01$	Дуговое КЗ в конце линии $L10$	848	1200	0,71
$QF02$	Дуговое КЗ в конце линии $L11$	820	600	1,30
$QF03$	Дуговое КЗ в конце линии $L12$	793	240	3,30

Коэффициент чувствительности для выключателей  $QF02$  и  $QF03$  больше 1,1, то есть выключатели чувствительны к токам КЗ.

Выключатель  $QF01$  не чувствителен и требуется пересмотр выбранной защитной характеристики.

ПЗ.6.1. Пересмотр защитной характеристики автоматического выключателя  $QF01$ .

Для обеспечения чувствительности была принята характеристика «В» для выключателя  $QF01$ .

После изменения характеристики была повторно проведена проверка на отстройку от кратковременной нагрузки. Согласно характеристике, приведенной на рисунке ПЗ.5 срабатывание выключателя  $QF01$  с характеристикой «В» при нагрузке 150 А произойдет более чем за 5 секунд.

Также, в ходе повторной проверки селективности выключателя  $QF01$  и предохранителей  $FU04$  и  $FU05$ , была рассмотрена возможность снижения номинального тока плавкой вставки этих предохранителей до 160 А. Карты селективности для выключателя  $QF01$  и предохранителей  $FU04$  и  $FU05$ , а также для выключателя  $QF02$  и предохранителей  $FU04$  и  $FU05$  приведены на рисунках ПЗ.5 и ПЗ.6, соответственно. Для выключателя  $QF03$  селективность обеспечена, если обеспечена селективность между выключателем  $QF02$  и предохранителями  $FU04$  и  $FU05$ , так как он имеет такую же характеристику «С» и меньший номинальный ток.

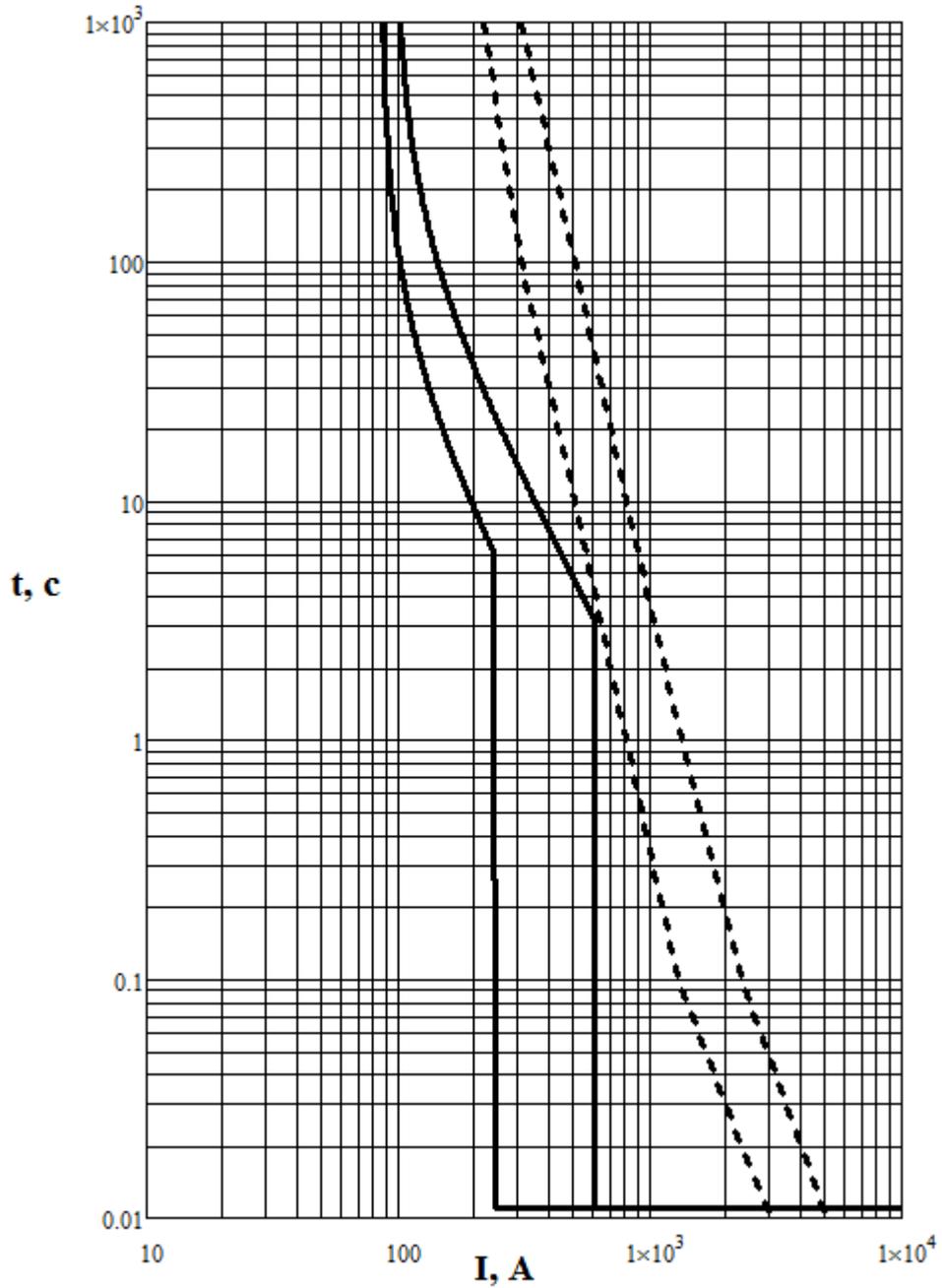


Рисунок ПЗ.5. Карта селективности: сплошная линия –  $QF01$  (характеристика «В» 80 А), пунктирная линия –  $FU04$  (плавкая вставка «gG» 160 А).

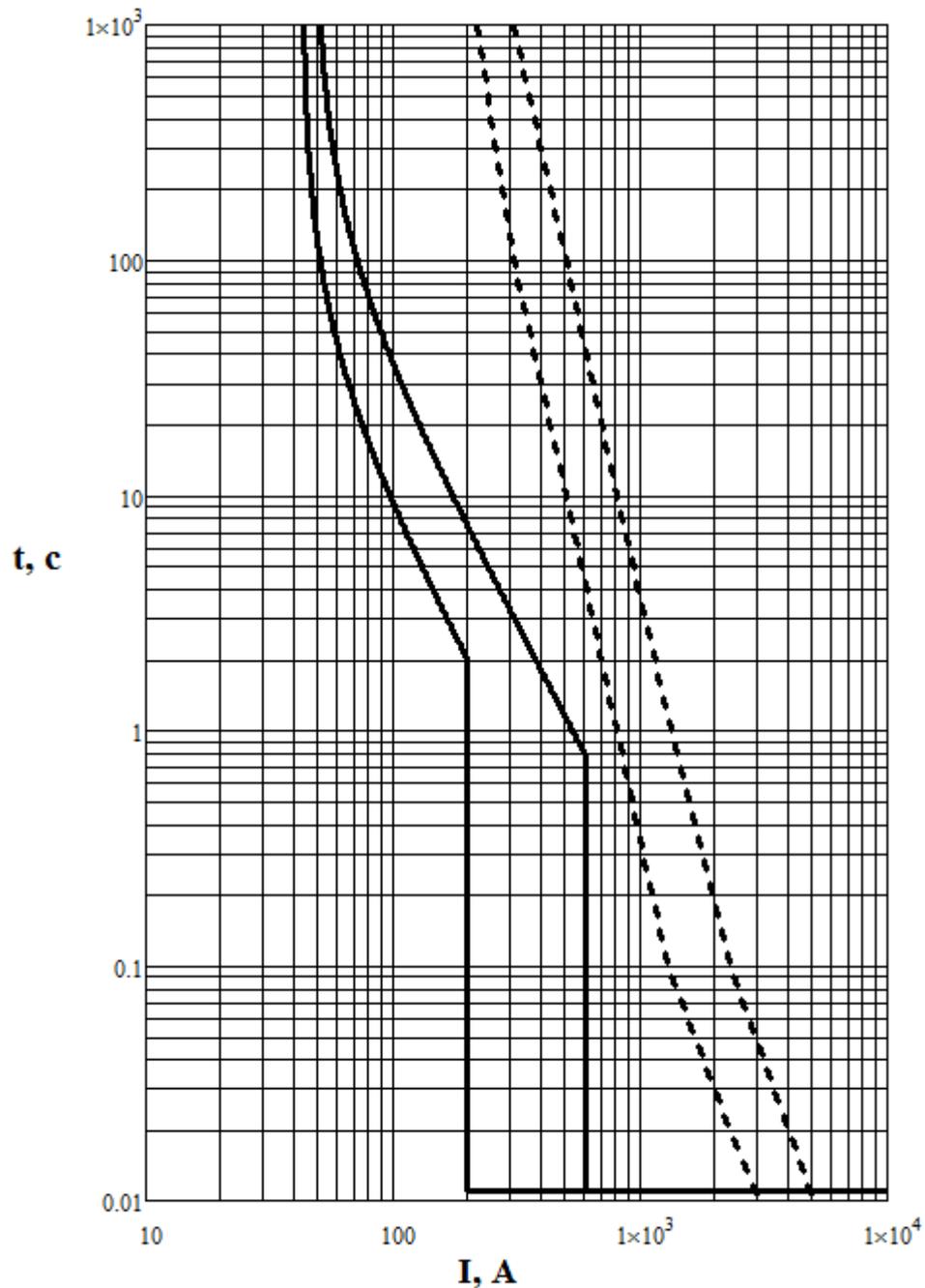


Рисунок ПЗ.6. Карта селективности: сплошная линия –  $QF02$  (характеристика «С» 40 А), пунктирная линия –  $FU04$  (плавкая вставка «gG» 160 А).

Как видно, селективность обеспечена для всех токов КЗ в диапазоне до 2000 А. Согласно таблице ПЗ.7, селективность обеспечена во всем возможном диапазоне токов КЗ.

Уменьшение номинального тока плавких вставок предохранителей  $FU04$  и  $FU05$  позволяет снизить номинальный ток плавкой вставки предохранителя  $FU01$  до 250 А, сохранив при этом селективность между ними на всем диапазоне токов КЗ (см. рисунок ПЗ.7).

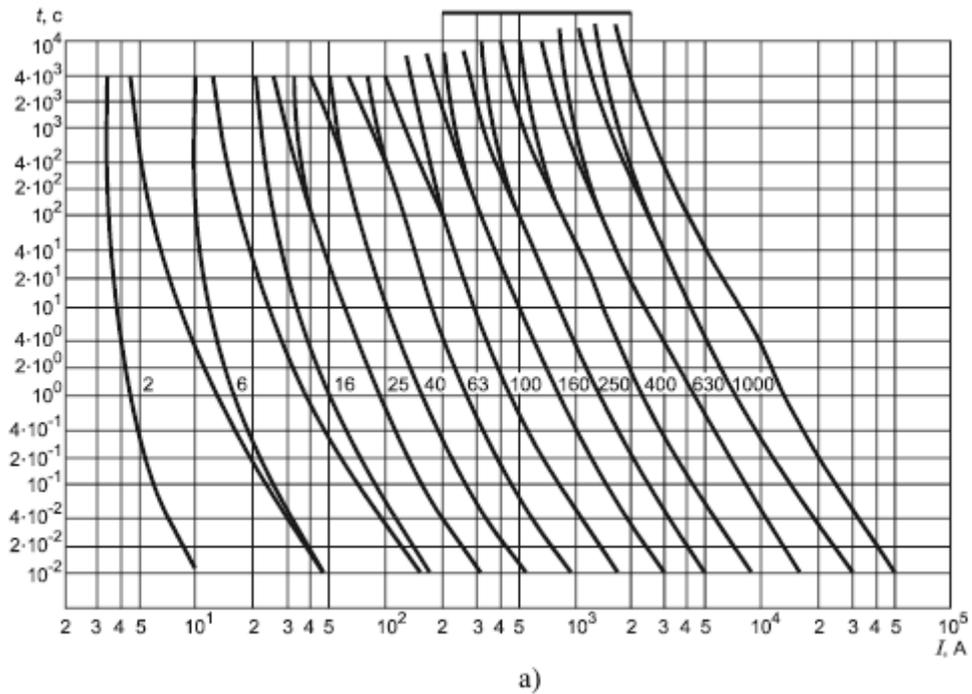


Рисунок ПЗ.7. Защитные характеристики плавких вставок некоторых номинальных токов типа «gG».

Проверка на чувствительность предохранителей  $FU01 - FU05$  сводится к проверке на быстродействие, результаты которой приведены в следующем разделе.

### ПЗ.7 Проверка быстродействия защитных аппаратов

ПЗ.7.1. Проверка термической стойкости и невозгораемости защищаемых линий.

Для проверки кабельных линий на термическую стойкость и невозгораемость были рассчитаны дуговые токи КЗ в начале линий и металлические токи КЗ в конце линий. Все расчеты проводились при подключенных устройствах заряда-подзаряда, при разомкнутых рубильниках  $QS07$  и  $QS10$ . Начальная температура линий, с учетом малых токов нагрузки в сравнении с длительно допустимыми токами линий, принималась равной  $25\text{ }^\circ\text{C}$ .

Для линий, защищенных предохранителями невозгораемость обеспечивается резервированием плавких вставок в разных полюсах друг друга, то есть если обеспечена термическая стойкость, невозгораемость так же обеспечена. Результаты проверки термической стойкости приведены в таблице ПЗ.9.

Таблица ПЗ.9 – Проверка кабельных линий на термическую стойкость

Дисп. имя линии	Вид и место КЗ	$I_{\text{кз}}, \text{A}$	Защитный аппарат	$t_{\text{откл}}, \text{с}$	$T_{\text{кон}}, \text{ }^\circ\text{C}$
L02 и L03	Дуг. КЗ в начале линии	3108	FU02(FU03)	<0,02	25
	Мет. КЗ в конце линии	5520		<0,02	25
L04 и L05	Дуг. КЗ в начале линии	3161	FU04(FU05)	0,04	25
	Мет. КЗ в конце линии	2064		0,2	25

L06	Дуг. КЗ в начале линии	1176	FU04	2,1	27
	Мет. КЗ в конце линии	1828		0,22	25
L07	Дуг. КЗ в начале линии	1079	FU05	1,9	27
	Мет. КЗ в конце линии	1832		0,22	25
L08	Дуг. КЗ в начале линии	1126	FU05	2,0	27
	Мет. КЗ в конце линии	1910		0,21	25
L09	Дуг. КЗ в начале линии	1176	FU05	2,1	27
	Мет. КЗ в конце линии	1998		0,2	25
L10	Дуг. КЗ в начале линии	1037	QF01	0,01	25
	Мет. КЗ в конце линии	1785		0,01	25
L11	Дуг. КЗ в начале линии	1079	QF02	0,01	25
	Мет. КЗ в конце линии	1859		0,01	25
L12	Дуг. КЗ в начале линии	1126	QF03	0,01	25
	Мет. КЗ в конце линии	1943		0,01	25

Все линии выполнены кабелями с поливинилхлоридной изоляцией, предельно допустимая температура жилы, для которой по условию термической стойкости, составляет 160 °С. Таким образом, все линии отвечают требованиям термической стойкости. Линия L01 не защищена от коротких замыканий, она выполняется с максимально возможным разнесением полюсов друг от друга, минимально возможной длины, каждый полюс представляет собой отдельный изолированный кабель. Выполнение этих условий позволяет свести к минимуму возможность короткого замыкания.

Проверка на невозгораемость требуется только линиям, защищенным автоматическими выключателями, и приведена в таблице ПЗ.10.

Таблица ПЗ.10 – Проверка кабельных линий на невозгораемость

Дисп. имя линии	Вид и место КЗ	$I_{кз}$ , А	Защитный аппарат	$t_{откл}$ , с	$T_{кон}$ , °С
L10	Дуг. КЗ в начале линии	1037	FU05	1,9	27
	Мет. КЗ в конце линии	1785		0,23	25
L11	Дуг. КЗ в начале линии	1079	FU05	1,9	27
	Мет. КЗ в конце линии	1859		0,21	25
L12	Дуг. КЗ в начале линии	1126	FU05	2,0	27
	Мет. КЗ в конце линии	1943		0,20	25

Предельно допустимая температура жилы для поливинилхлоридной изоляции, по условию проверки на невозгораемость, составляет 350 °С. Все линии отвечают требованиям невозгораемости.

#### ПЗ.7.2. Проверка защитных аппаратов по провалам напряжения.

Для определения глубины и продолжительности провалов напряжения при коротких замыканиях были проведены расчеты по условиям аналогичным условиям проверки кабелей на термическую стойкость. Результаты приведены в таблице ПЗ.11.

Таблица ПЗ.11 – Глубина и продолжительность провалов напряжения

Дисп. имя линии	Вид и место КЗ	$I_{кз},$ А	Защитный аппарат	$t_{\text{провал.}}$ с	$U_{\text{ост.}}$ В	$U_{\text{ост.}}$ %
L02 и L03	Дуг. КЗ в начале линии	3108	FU02(FU03)	<0,02	118	54
	Мет. КЗ в конце линии	5520		<0,02	106	48
L04 и L05	Дуг. КЗ в начале линии	3161	FU04(FU05)	<0,02	116	53
	Мет. КЗ в конце линии	2064		<1	164	75
L06	Дуг. КЗ в начале линии	1176	FU04	<1	202	92
	Мет. КЗ в конце линии	1828		<1	174	79
L07	Дуг. КЗ в начале линии	1079	FU05	<1	207	94
	Мет. КЗ в конце линии	1832		<1	174	79
L08	Дуг. КЗ в начале линии	1126	FU05	<1	205	93
	Мет. КЗ в конце линии	1910		<1	170	77
L09	Дуг. КЗ в начале линии	1176	FU05	<1	203	92
	Мет. КЗ в конце линии	1998		<1	167	76
L10	Дуг. КЗ в начале линии	1037	QF01	<0,02	209	95
	Мет. КЗ в конце линии	1785		<0,02	176	80
L11	Дуг. КЗ в начале линии	1079	QF02	<0,02	207	94
	Мет. КЗ в конце линии	1859		<0,02	173	79
L12	Дуг. КЗ в начале линии	1126	QF03	<0,02	205	93
	Мет. КЗ в конце линии	1943		<0,02	170	77

Все защитные аппараты отвечают требованиям по провалам напряжения.

### ПЗ.8 Проверка защитных аппаратов на отключающую способность

Для проверки защитных аппаратов на отключающую способность были рассчитаны максимальные сквозные токи КЗ. При расчете использовались следующие расчетные условия: металлическое КЗ на клеммах проверяемого аппарата со стороны источника, устройства заряда-подзаряда включены, рубильники QS07 и QS10 разомкнуты. Результаты расчета приведены в таблице ПЗ.12.

Таблица ПЗ.12 – Максимальный сквозной ток КЗ

Защитный аппарат	$I_{кз \text{ макс.}}$ , А
FU01	6502
FU02	6152
FU03	6152
FU04	6431
FU05	6431
QF01	1821
QF02	1898
QF03	1986

Для проверки постоянной времени было рассмотрено металлическое КЗ в начале защищаемой зоны для каждого аппарата, при разомкнутых рубильниках *QS07* и *QS15*. Для определения постоянной времени сети необходимо рассчитать суммарную индуктивность и суммарное активное сопротивление кабельных линий до начала защищаемой зоны. Активное и индуктивное сопротивление линий приведены в таблице ПЗ.13.

Таблица ПЗ.13 – Индуктивное и активное сопротивление линий

Линия	Длина, м	$R_{уд}$ , мОм/м	$L_{уд}$ , мкГн/м	$R$ , мОм	$L$ , мкГн
<i>L01</i>	35	0,123	0,236	4,305	8,244
<i>L02, L03</i>	40	0,368	0,248	14,72	9,936
<i>L04, L05</i>	250	0,153	0,236	38,250	58,887
<i>L07, L08, L09</i>	10	0,194	0,239	1,940	2,387

Постоянная времени определялась как отношение суммарного индуктивного к суммарному активному сопротивлению линий от источника (аккумуляторной батареи) до точки КЗ. К примеру, для автоматического выключателя *QF01* суммировались сопротивления линий *L01, L04, L06, L07, L08*.

$$\tau_{QF01} = \frac{(8,244 + 58,887 + 2,387 + 2,378 + 2,378) \cdot 10^{-6}}{(4,305 + 38,250 + 1,940 + 1,940 + 1,940) \cdot 10^{-3}} = 1,536 \text{ мс}$$

Результаты расчета для остальных защитных аппаратов приведены в таблице ПЗ.14.

Таблица ПЗ.14 – Расчетные постоянные времени для защитных аппаратов

Защитный аппарат	Суммируемые сопротивления для линий	$\tau$ , мс
<i>FU01</i>	<i>L01</i>	1,915
<i>FU02</i>	<i>L01</i>	1,915
<i>FU03</i>	<i>L01</i>	1,915
<i>FU04</i>	<i>L01, L04</i>	1,578
<i>FU05</i>	<i>L01, L05</i>	1,578
<i>QF01</i>	<i>L01, L05, L09</i>	1,536
<i>QF02</i>	<i>L01, L05, L08, L09</i>	1,549
<i>QF03</i>	<i>L01, L05, L07, L08, L09</i>	1,562

Все расчетные постоянные времени меньше 5 мс, таким образом, все защитные аппараты способны отключать короткие замыкания.

### ПЗ.9 Окончательно выбранные защитные аппараты

Окончательно выбранные защитные аппараты приведены в таблице ПЗ.14.

Таблица ПЗ.15 – Выбранные защитные аппараты и их защитные характеристики

Защитный аппарат	$I_n$ , А	Защитная характеристика
------------------	-----------	-------------------------

<i>FU01</i>	250	<i>gG</i>
<i>FU02</i>	100	<i>gG</i>
<i>FU03</i>	100	<i>gG</i>
<i>FU04</i>	160	<i>gG</i>
<i>FU05</i>	160	<i>gG</i>
<i>QF01</i>	80	<i>B</i>
<i>QF02</i>	40	<i>C</i>
<i>QF03</i>	16	<i>C</i>

Выбор защитных аппаратов завершен.