ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ГОСТ Р 70351— 2022**

# УСТРОЙСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА СГЛАЖИВАЮЩИЕ

## Методика выбора основных параметров

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2022

gost.e-ecolog.ru

## Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Акционерным обществом «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ОмГУПС (ОмИИТ))

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 045 «Железнодорожный транспорт»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 сентября 2022 г. № 915-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «РСТ», 2022

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

## Содержание

1 Область применения . . . . . 1
2 Нормативные ссылки . . . . . 1
3 Термины и определения . . . . . 2
4 Требования, предъявляемые к сглаживающим устройствам . . . . . 2
5 Показатели эффективности и схемы сглаживающих устройств . . . . . 3
6 Выбор основных параметров сглаживающих устройств . . . . . 7
6.1 Исходные данные . . . . . 7
6.2 Общий порядок выбора схем и основных параметров сглаживающих устройств . . . . . 12
6.3 Выбор схемы сглаживающего устройства . . . . . 13
6.4 Выбор основных параметров последовательной части . . . . . 13
6.5 Выбор типа конденсатора сглаживающего устройства . . . . . 14
6.6 Расчет и проверка основных параметров апериодической части сглаживающего устройства . . . . . 15
6.7 Расчет и проверка основных параметров резонансных контуров и фильтра-пробки сглаживающего устройства . . . . . 22
6.8 Расчет параметров предохранителя параллельной части . . . . . 25
Приложение А (обязательное) Формы для представления результатов выбора схемы и основных параметров сглаживающего устройства . . . . . 28
Приложение Б (справочное) Пример выбора схемы и основных параметров сглаживающего устройства . . . . . 33
Приложение В (обязательное) Методика технико-экономического сравнения вариантов оснащения тяговой подстанции сглаживающими устройствами различных типов или в различном сочетании параметров . . . . . 40
Приложение Г (справочное) Методика оценки потерь электроэнергии в сглаживающем устройстве . . . . . 42

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# УСТРОЙСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА СГЛАЖИВАЮЩИЕ

## Методика выбора основных параметров

Smoothing devices of railway traction substations of direct current.
Method for selecting the main parameters

**Дата введения — 2023—01—01**

## 1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает методику выбора основных параметров сглаживающих устройств железнодорожных тяговых подстанций постоянного тока.

## 2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 2213—79 Предохранители переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие технические условия

ГОСТ 29322 (IEC 60038:2009) Напряжения стандартные

ГОСТ 30804.4.30—2013 (IEC 61000-4-30:2008) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии

ГОСТ 32144—2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения

ГОСТ 32676—2014 Реакторы для тяговых подстанций железной дороги сглаживающие. Общие технические условия

ГОСТ 32895 Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения

ГОСТ 33436.1—2015 (IEC 62236-1:2008) Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 1. Общие положения

ГОСТ 33436.3-1—2015 (IEC 62236-3-1:2008) Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 3-1. Железнодорожный подвижной состав. Требования и методы испытаний

ГОСТ 34062—2017 Тяговые подстанции, трансформаторные подстанции и линейные устройства тягового электроснабжения железной дороги. Требования безопасности и методы контроля

ГОСТ 34530 Транспорт железнодорожный. Основные понятия. Термины и определения

ГОСТ Р 54130 Качество электрической энергии. Термины и определения

ГОСТ Р 58365—2019 Выключатели постоянного тока на напряжение свыше 1000 В для тяговых подстанций и линейных устройств тягового электроснабжения железной дороги. Общие технические условия

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого

**Издание официальное**

стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

## 3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 32895, ГОСТ 34530, ГОСТ Р 54130, ГОСТ 33436.1, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **последовательная часть сглаживающего устройства*:** Часть сглаживающего устройства, включенная между выводами статического преобразователя и точками подключения параллельной части сглаживающего устройства.

3.2 **параллельная часть сглаживающего устройства*:** Часть сглаживающего устройства, включенная между плюсовой шиной распределительного устройства и отсасывающей линией.

3.3 **однозвенное сглаживающее устройство:** Сглаживающее устройство, содержащее последовательную и параллельную части.

3.4 **двухзвенное сглаживающее устройство:** Сглаживающее устройство, состоящее из двух последовательно включенных однозвенных сглаживающих устройств.

3.5 **апериодическая параллельная часть сглаживающего устройства:** Параллельная часть сглаживающего устройства, образованная емкостным контуром.

3.6 **резонансный контур сглаживающего устройства:** Часть фильтрустройства сглаживающего устройства, представляющая собой контур из последовательно соединенных емкости и индуктивности, настроенный в резонанс напряжения на заданную частоту гармонической составляющей выпрямленного напряжения.

3.7 **фильтр-пробка сглаживающего устройства:** Часть сглаживающего устройства, настроенная в резонанс тока на заданную частоту выпрямленного напряжения, представляющая собой контур с последовательно соединенными емкостью и индуктивностью, параллельно которому включен реактор.

3.8 **показатели эффективности сглаживающего устройства:** Показатели, характеризующие эффективность сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения сглаживающим устройством.

3.9 **коэффициент сглаживания *n*-й гармоники выпрямленного напряжения $K_n$:** Показатель, характеризующий отношение действующего значения гармоник выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства по сравнению с их действующим значением на выходе.

3.10 **частотная характеристика сглаживающего устройства:** Зависимость коэффициента сглаживания *n*-й гармоники выпрямленного напряжения от частоты.

3.11 **псофометрическое напряжение на входе [выходе] сглаживающего устройства:** Эквивалентное напряжение на входе (выходе) сглаживающего устройства частотой 800 Гц, создающее в находящемся в зоне влияния сооружении проводной электросвязи такую же э. д. с. шума, как напряжение на входе (выходе) сглаживающего устройства.

3.12 **коэффициент акустического воздействия *n*-й гармоники:** Показатель, характеризующий отношение амплитуды акустического воздействия, создаваемого *n*-й гармоникой к акустическому воздействию гармоники частотой 800 Гц.

3.13 **основные параметры сглаживающего устройства:** Параметры, включающие в себя индуктивность и номинальное сопротивление постоянному току реактора, емкость и количество конденсаторов апериодической части сглаживающего устройства, емкость, число конденсаторов и индуктивность *i*-го резонансного контура, номинальные ток и напряжение предохранителя.

## 4 Требования, предъявляемые к сглаживающим устройствам

4.1 Для обеспечения эффективности работы сглаживающих устройств активное сопротивление резонансных контуров фильтрустройства вместе с соединительными проводами (от плюсовой до минусовой шины) не должно превышать значений, указанных в таблице 1, а активное сопротивление апериодической параллельной части вместе с соединительными проводами (от плюсовой до минусовой шины) должно быть не более 0,2 Ом.

* Принадлежность элементов к последовательной и параллельной частям сглаживающих устройств показана на схемах на рисунках 3—6.

Таблица 1 — Допустимые значения активного сопротивления резонансных контуров

| Частота контура, Гц | Активное сопротивление, Ом, не более | Частота контура, Гц | Активное сопротивление, Ом, не более |
|---|---|---|---|
| 100 | 0,45 | 600 | 0,50 |
| 200 | 0,46 | 900 | 0,55 |
| 300 | 0,47 | 1200 | 0,70 |
| 400 | 0,48 | — | — |

Подключение реактора сглаживающего устройства допускается с применением экранированного кабеля. При этом экран кабеля должен быть заземлен только с одной стороны. Для подключения остальных элементов сглаживающего устройства не допускается применение экранированных кабелей, кабелей с броней или в свинцовой оболочке, а также прокладка кабелей в стальных трубах.

4.2 Для обеспечения точной настройки фильтрустройства конструкцией катушек индуктивности резонансных контуров должно быть предусмотрено плавное или ступенчатое регулирование индуктивности.

4.3 Допускается выполнять катушки индуктивности фильтрустройства алюминиевыми проводами. Выводы проводов таких катушек должны быть приварены к переходным пластинам «медь—алюминий», причем медная поверхность должна иметь гальваническое покрытие.

4.4 Соединение катушек индуктивности между собой, с конденсаторами и шинами сглаживающего устройства необходимо выполнять медным гибким проводом с площадью сечения не менее 25 мм$^2$ и наконечником, имеющим гальваническое покрытие в местах соединений.

4.5 Не допускается наличие короткозамкнутых контуров (металлического каркаса и т. д.) на расстоянии менее допустимого по ГОСТ 32676—2014 (пункт 10.4) от реактора сглаживающего устройства.

4.6 При расчете основных параметров сглаживающих устройств по выражениям (7), (9) — (12), (16), (19) — (21), (32), (33), (45), (46), (59) — (61), (84), (86), (88), (90) необходимо принимать индуктивность реактора последовательной части «минус 10 %» от номинального значения индуктивности по ГОСТ 32676.

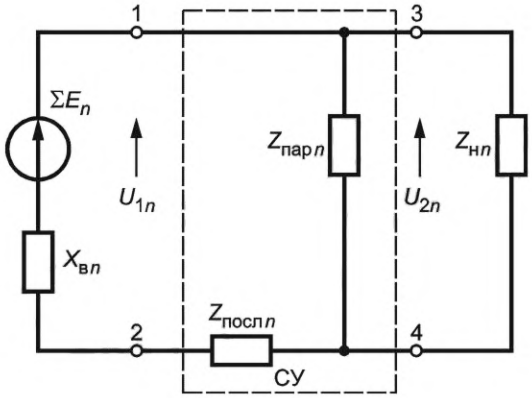
4.7 Для обеспечения электромагнитной совместимости сглаживающие устройства должны обеспечивать:

- выполнение требований по ГОСТ 34062—2017 (пункт 4.6.2);
- действующее значение псофометрического напряжения на выходе сглаживающего устройства тяговой подстанции при воздушных и кабельных линиях связи, линиях железнодорожной электросвязи, расположенных вдоль магистрали железной дороги, на прилегающих межподстанционных зонах, должно быть не более 4 В (5 В — при интегральной вероятности 0,95);
- действующее значение псофометрического напряжения на выходе сглаживающего устройства тяговой подстанции при кабельных линиях связи, линиях железнодорожной электросвязи на прилегающих межподстанционных зонах должно быть не более 20 В (30 В — при интегральной вероятности 0,95);
- действующее значение гармоники частотой 100 Гц на выходе сглаживающего устройства тяговой подстанции при использовании на примыкающей межподстанционной зоне рельсовых цепей частотой 50 Гц должно быть не более 100 В;
- действующее значение каждой из гармоник на частотах 400, 500, 600, 700, 800 и 900 Гц на выходе сглаживающего устройства тяговой подстанции при использовании на примыкающей межподстанционной зоне рельсовых цепей диапазона от 420 до 925 Гц должно быть не более 2,3 В.

4.8 Для защиты элементов параллельной части от воздействия сверхтоков в схеме главных электрических соединений сглаживающего устройства должен быть установлен предохранитель с устройством контроля целостности.

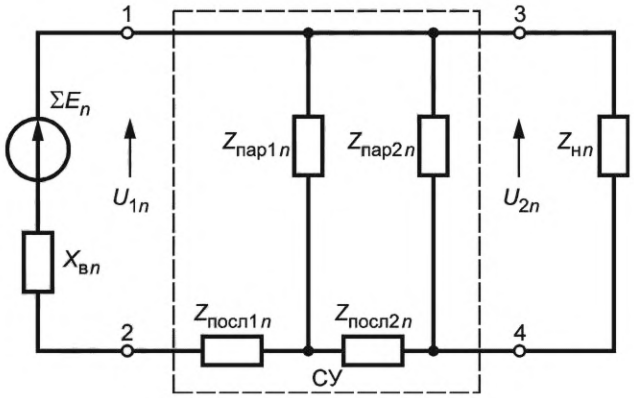
## 5 Показатели эффективности и схемы сглаживающих устройств

5.1.1 Схемы замещения цепи постоянного тока для токов высших гармоник при использовании однозвенного и двухзвенного сглаживающих устройств представлены на рисунках 1 и 2.




$E_n$ — действующее значение э. д. с. $n$-й гармоники выпрямленного напряжения; $U_{1n}$ — действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства; $U_{2n}$ — действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на выходе сглаживающего устройства; $Z_{посл\ n}$, $Z_{пар\ n}$ — сопротивление последовательной и параллельной частей однозвенного сглаживающего устройства на частоте $n$-й гармоники выпрямленного напряжения; $X_{вn}$ — результирующее индуктивное сопротивление цепи коммутации статического выпрямительного преобразователя; $Z_{нn}$ — сопротивление цепи нагрузки, включающее в себя сопротивления электрической схемы электровоза и системы тягового железнодорожного электроснабжения постоянного тока

Рисунок 1 — Схема замещения цепи постоянного тока для токов высших гармоник при использовании однозвенного сглаживающего устройства




$E_n$ — действующее значение э. д. с. $n$-й гармоники выпрямленного напряжения; $U_{1n}$ — действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства; $U_{2n}$ — действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на выходе сглаживающего устройства; $Z_{посл1\ n}$, $Z_{пар1\ n}$ — сопротивление последовательной и параллельной частей первого звена двухзвенного сглаживающего устройства $n$-й гармоники выпрямленного напряжения; $Z_{посл2\ n}$, $Z_{пар2\ n}$ — сопротивление последовательной и параллельной частей второго звена двухзвенного сглаживающего устройства $n$-й гармоники выпрямленного напряжения, $X_{вn}$ — результирующее индуктивное сопротивление цепи коммутации статического выпрямительного преобразователя; $Z_{нn}$ — сопротивление цепи нагрузки, включающее в себя сопротивления электрической схемы электровоза и системы тягового железнодорожного электроснабжения постоянного тока

Рисунок 2 — Схема замещения цепи постоянного тока для токов высших гармоник при использовании двухзвенного сглаживающего устройства

5.1.2 Коэффициент сглаживания $n$-й гармоники выпрямленного напряжения для однозвенного сглаживающего устройства вычисляют по формуле

$$K_n = \left|1 + \frac{Z_{послn}}{Z_{парn}}\right|, \quad (1)$$

где $Z_{послn}$, $Z_{парn}$ — сопротивление последовательной и параллельной частей однозвенного сглаживающего устройства на частоте $n$-й гармоники выпрямленного напряжения, Ом.

5.1.3 Коэффициент сглаживания $n$-й гармоники выпрямленного напряжения для двухзвенного сглаживающего устройства вычисляют по формуле

$$K_n = \left|1 + \frac{Z_{\text{посл1}n}}{Z_{\text{пар1}n}}\right| \left|1 + \frac{Z_{\text{посл2}n}}{Z_{\text{пар2}n}}\right|, \quad (2)$$

где $Z_{\text{посл1}n}$, $Z_{\text{пар1}n}$ — сопротивление последовательной и параллельной частей первого звена двухзвенного сглаживающего устройства $n$-й гармоники выпрямленного напряжения, Ом;

$Z_{\text{посл2}n}$, $Z_{\text{пар2}n}$ — сопротивление последовательной и параллельной частей второго звена двухзвенного сглаживающего устройства $n$-й гармоники выпрямленного напряжения, Ом.

5.1.4 Псофометрическое напряжение на выходе сглаживающего устройства, $U_{2\text{пс}}$, В, вычисляют по формуле

$$U_{2\text{пс}} = \sqrt{\sum_n \left(\frac{U_{1n} p_n}{K_n}\right)^2}, \quad (3)$$

где $U_{1n}$ — действующее значение напряжения $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства, В. Действующее значение напряжения $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства принимают в соответствии с 6.1.2, 6.1.3;

$p_n$ — коэффициент акустического воздействия гармоники $n$-го порядка, который принимают для нечетных гармоник по ГОСТ 33436.3-1—2015 (таблица А.1), а для четных гармоник по таблице 2;

$K_n$ — коэффициент сглаживания $n$-й гармоники выпрямленного напряжения;

$n$ — порядок гармонической составляющей напряжения. Необходимо учитывать все четные гармонические составляющие от 2 до 40 включительно (частоты четных гармонических составляющих от 100 до 2000 Гц соответственно).

Порядок расчета псофометрического напряжения на выходе сглаживающего устройства приведен в 6.6.

Таблица 2 — Коэффициент акустического воздействия четных гармоник $n$-го порядка

| $n$ | $p_n$ | $n$ | $p_n$ |
|---|---|---|---|
| 2 | 0,0089 | 22 | 1,072 |
| 4 | 0,0891 | 24 | 1,000 |
| 6 | 0,295 | 26 | 0,955 |
| 8 | 0,484 | 28 | 0,905 |
| 10 | 0,661 | 30 | 0,861 |
| 12 | 0,794 | 32 | 0,824 |
| 14 | 0,902 | 34 | 0,791 |
| 16 | 1,000 | 36 | 0,760 |
| 18 | 1,072 | 38 | 0,733 |
| 20 | 1,122 | 40 | 0,709 |

5.1.5 Действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на выходе сглаживающего устройства $U_{2n}$, В, вычисляют по формуле

$$U_{2n} = \frac{U_{1n}}{K_n}. \quad (4)$$

Порядок расчета действующего значения $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на выходе сглаживающего устройства приведен в 6.6.

5.1.6 Для обеспечения выполнения требований 4.7 необходимо использовать следующие схемы сглаживающих устройств:

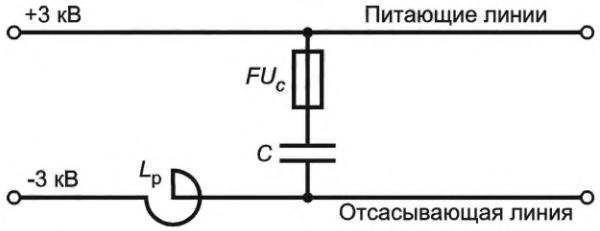
- однозвенное апериодическое сглаживающее устройство (рисунок 3);

- однозвенное резонансно-апериодическое сглаживающее устройство с резонансным контуром 100 Гц (рисунок 4);

- двухзвенное резонансно-апериодическое сглаживающее устройство (рисунок 5);

- двухзвенное резонансно-апериодическое сглаживающее устройство с фильтром-пробкой (рисунок 6).

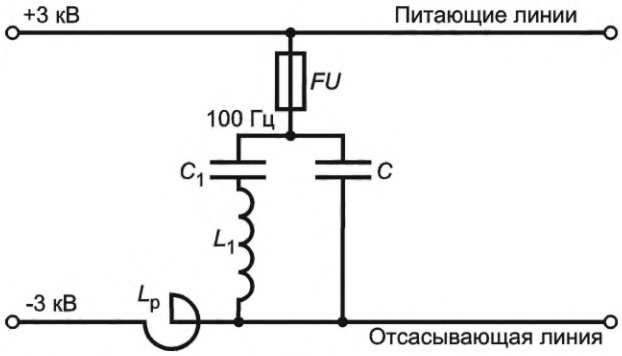
Схема однозвенного апериодического сглаживающего устройства представлена на рисунке 3.




$L_p$ — индуктивность реактора последовательной части; $C$ — емкость апериодической параллельной части; $FU_C$ — предохранитель параллельной части

Рисунок 3 — Схема однозвенного апериодического сглаживающего устройства

Схема однозвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с резонансным контуром 100 Гц представлена на рисунке 4.



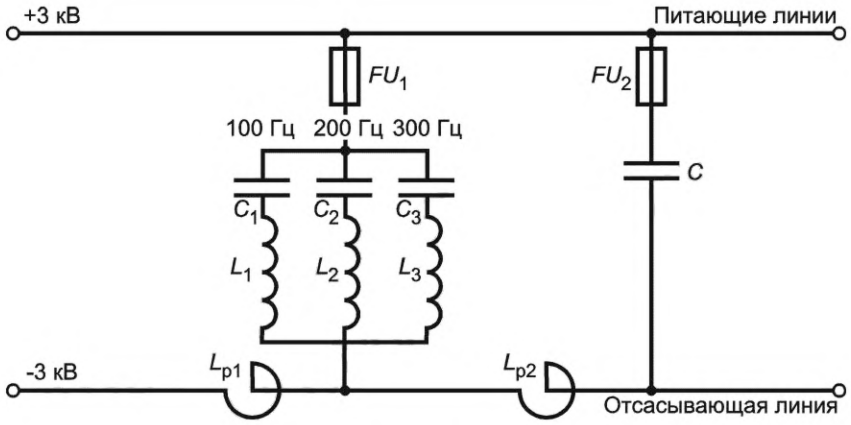

$L_p$ — индуктивность реактора последовательной части; $L_1$ и $C_1$ — индуктивность и емкость резонансного контура 100 Гц параллельной части; $C$ — емкость апериодической параллельной части; $FU$ — предохранитель параллельной части

Рисунок 4 — Схема однозвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с резонансным контуром 100 Гц

Схема двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства представлена на рисунке 5.

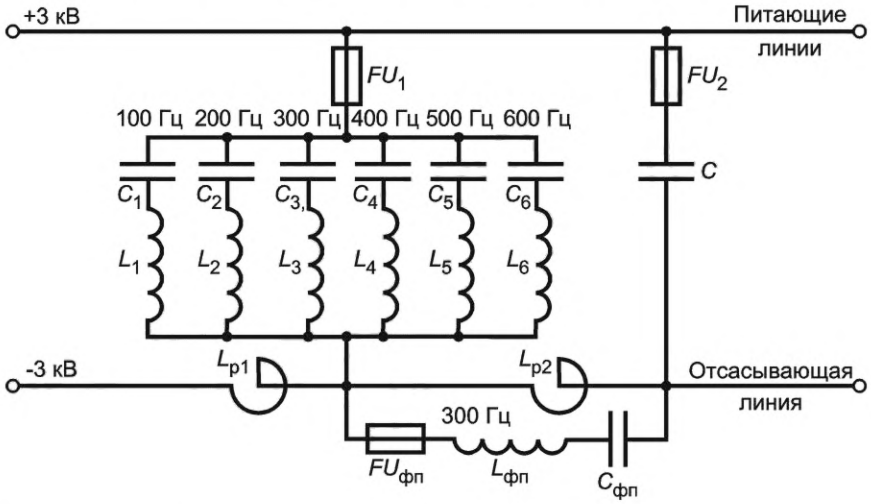
Схема двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с фильтром-пробкой представлена на рисунке 6.

5.1.7 Для выполнения установленных в 4.7 требований необходимо на начальном этапе выбора принять наиболее простую схему (в соответствии с 6.3), а к более сложным переходить только в случае, если простая схема не удовлетворяет по каким-либо критериям выбора.




$L_{p1}$ — индуктивность реактора последовательной части первого звена; $L_1$, $L_2$, $L_3$ — индуктивность резонансных контуров 100, 200, 300 Гц параллельной части первого звена; $C_1$, $C_2$, $C_3$ — емкость резонансных контуров 100, 200, 300 Гц параллельной части первого звена; $FU_1$ — предохранитель параллельной части первого звена; $L_{p2}$ — индуктивность реактора последовательной части второго звена; $C$ — емкость апериодической параллельной части второго звена; $FU_2$ — предохранитель параллельной части второго звена

Рисунок 5 — Схема двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства




$L_{p1}$ — индуктивность реактора последовательной части первого звена; $L_1$, $L_2$, $L_3$, $L_4$, $L_5$, $L_6$ — индуктивность резонансных контуров 100, 200, 300, 400, 500, 600 Гц параллельной части первого звена; $C_1$, $C_2$, $C_3$, $C_4$, $C_5$, $C_6$ — емкость резонансных контуров 100, 200, 300, 400, 500, 600 Гц параллельной части первого звена; $FU_1$ — предохранитель параллельной части первого звена; $L_{p2}$ — индуктивность реактора последовательной части второго звена; $C$ — емкость апериодической параллельной части второго звена; $FU_2$ — предохранитель параллельной части второго звена; $C_{фп}$ — емкость фильтра-пробки последовательной части второго звена; $L_{пф}$ — индуктивность фильтра-пробки последовательной части второго звена; $FU_{фп}$ — предохранитель фильтра-пробки последовательной части второго звена

Рисунок 6 — Схема двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с фильтром-пробкой

## 6 Выбор основных параметров сглаживающих устройств

### 6.1 Исходные данные

6.1.1 В качестве исходных данных при выборе схем и основных параметров сглаживающих устройств принимают:

- действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства $U_{1n}$ или коэффициент несимметрии по обратной последовательности напряжения $K_{2U}$ и коэффициент гармонических составляющих напряжения $K_{Un}$ на входе статического преобразователя, определенные путем натурных измерений. Объем и методы измерений должны соответствовать ГОСТ 30804.4.30—2013 (пункты 5.7.1 и 5.8.1, класс А);

- мощность короткого замыкания на сборных шинах высшего напряжения (в максимальном режиме);

- номинальную мощность и напряжение короткого замыкания, мощность короткого замыкания понижающих и преобразовательных трансформаторов, количество трансформаторов, параллельно работающих на тяговую нагрузку, суммарный выходной ток всех статических преобразователей тяговой подстанции;

- типы и схемы статических преобразователей для системы (железнодорожного) тягового электроснабжения;

- типы выключателей постоянного тока тяговой подстанции;

- типы разрядных устройств сглаживающего реактора тяговой подстанции;

- типы рельсовых цепей и проводных линий железнодорожной электросвязи на прилегающих межподстанционных зонах;

- наличие вольтодобавочных устройств и блоков автоматического регулирования напряжения;

- для расчетного участка, находящегося в эксплуатации, наличие действующих сглаживающих устройств и их параметры.

6.1.2 Для участка, находящегося в эксплуатации, данные, полученные в результате измерений действующего значения $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства $U_{1n}$, коэффициента несимметрии по обратной последовательности напряжения $K_{2U}$ и коэффициентов, гармонических составляющих напряжения $K_{Un}$, измеренных на входе статического преобразователя, имеют приоритетное значение перед справочными табличными данными.

6.1.3 Для вновь строящегося участка допускается осуществлять выбор действующих значений э. д. с. $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства по таблицам 3—6 с использованием результатов измерений на входе статических преобразователей смежных тяговых подстанций коэффициента несимметрии по обратной последовательности напряжения $K_{2U}$ и коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{Un}$. При этом необходимо использовать данные о показателях качества электрической энергии первичного напряжения на входах статических преобразователей ближайших смежных тяговых подстанций, получающих питание по тем же линиям электропередачи, по которым будет получать питание вновь строящийся участок, вне зависимости от значения уровня первичного напряжения статических преобразователей, установленных на этих тяговых подстанциях.

6.1.4 Для тяговых подстанций с вольтодобавочными устройствами значения гармоник на выходе сглаживающего устройства вычисляют как сумму значения э. д. с. $n$-й гармоники статического преобразователя и значения э. д. с. $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на выходе вольтодобавочного устройства.

6.1.5 Для тяговых подстанций с блоком автоматического регулирования напряжения значения э. д. с. $n$-й гармоники статического преобразователя (таблицы 3—5) и значения э. д. с. $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на выходе вольтодобавочного устройства (таблица 6) необходимо увеличить на 10 %.

6.1.6 При невозможности получения коэффициента несимметрии по обратной последовательности напряжения $K_{2U}$ и коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{Un}$ путем непосредственного измерения выбор действующих значений э. д. с. $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства по таблицам 3—6 необходимо проводить для случая, когда $K_{2U}$ и (или) $K_{Un}$ превышают допустимые значения.

Таблица 3 — Значения э. д. с. *n*-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства при использовании на тяговой подстанции статического неуправляемого выпрямительного преобразователя

В вольтах

| Частота гармоники, Гц | Значения э. д. с. *n*-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства при состоянии первичного напряжения | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Эквивалентный шестифазный статический выпрямительный преобразователь | | Эквивалентный двенадцатифазный статический выпрямительный преобразователь [1] | | Эквивалентный двенадцатифазный статический выпрямительный преобразователь [2] | |
| | $K_{2U}$ и $K_{Un}$ не превышают допустимые значения[3] | $K_{2U}$ и (или) $K_{Un}$ превышают допустимые значения[4] | $K_{2U}$ и $K_{Un}$ не превышают допустимые значения[3] | $K_{2U}$ и (или) $K_{Un}$ превышают допустимые значения[4] | $K_{2U}$ и $K_{Un}$ не превышают допустимые значения[3] | $K_{2U}$ и (или) $K_{Un}$ превышают допустимые значения[4] |
| 100 | 64 | 286 | 60 | 280 | 55 | 268 |
| 200 | 11 | 46 | 9 | 28 | 5 | 14 |
| 300 | 263 | 263 | 50 | 68 | 20 | 30 |
| 400 | 10 | 26 | 7 | 16 | 3 | 14 |
| 500 | 6 | 48 | 19 | 41 | 13 | 31 |
| 600 | 123 | 123 | 119 | 119 | 114 | 114 |
| 700 | 10 | 41 | 15 | 40 | 11 | 28 |
| 800 | 8 | 41 | 12 | 30 | 5 | 17 |
| 900 | 68 | 68 | 18 | 25 | 1 | 3 |
| 1000 | 6 | 46 | 3 | 26 | 1 | 22 |
| 1100 | 15 | 35 | 15 | 21 | 7 | 15 |
| 1200 | 63 | 63 | 42 | 42 | 42 | 42 |
| 1300 | 8 | 23 | 10 | 14 | 4 | 7 |
| 1400 | 10 | 38 | 7 | 24 | 3 | 10 |
| 1500 | 40 | 40 | 14 | 14 | 1 | 3 |
| 1600 | 6 | 24 | 5 | 16 | 4 | 13 |
| 1700 | 8 | 34 | 7 | 17 | 4 | 14 |
| 1800 | 40 | 40 | 28 | 28 | 28 | 28 |
| 1900 | 14 | 16 | 7 | 11 | 6 | 10 |
| 2000 | 7 | 32 | 6 | 12 | 4 | 8 |

[1] На тяговых подстанциях электрифицированного участка, получающих питание по одним и тем же линиям электропередачи, есть эквивалентные шестифазные статические преобразователи.

[2] На всех тяговых подстанциях электрифицированного участка, получающих питание по одним и тем же линиям электропередачи, установлены эквивалентные двенадцатифазные статические преобразователи.

[3] Значение коэффициента несимметрии по обратной последовательности напряжения $K_{2U}$ не превышает 2 %, а значения коэффициента гармонической составляющей напряжения $K_{Un}$ не превышают допустимые значения по ГОСТ 32144—2013 (подпункт 4.2.4.1, таблица 1).

[4] Значение коэффициента несимметрии по обратной последовательности напряжения $K_{2U}$ превышает 2 % и (или) значения коэффициента гармонической составляющей напряжения $K_{Un}$ превышают допустимые значения по ГОСТ 32144—2013 (подпункт 4.2.4.1, таблица 1).

Таблица 4 — Значения э. д. с. *n*-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства при использовании на тяговой подстанции статического выпрямительно-инверторного преобразователя

В вольтах

| Частота гармоники, Гц | Значения э. д. с. *n*-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства при состоянии первичного напряжения | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Эквивалентный шестифазный статический выпрямительно-инверторный преобразователь | | Эквивалентный двенадцатифазный статический выпрямительно-инверторный преобразователь [1] | | Эквивалентный двенадцатифазный статический выпрямительно-инверторный преобразователь [2] | |
| | $K_{2U}$ и $K_{Un}$ не превышают допустимые значения[3] | $K_{2U}$ и (или) $K_{Un}$ превышают допустимые значения[4] | $K_{2U}$ и $K_{Un}$ не превышают допустимые значения[3] | $K_{2U}$ и (или) $K_{Un}$ превышают допустимые значения[4] | $K_{2U}$ и $K_{Un}$ не превышают допустимые значения[3] | $K_{2U}$ и (или) $K_{Un}$ превышают допустимые значения[4] |
| 100 | 68 | 326 | 64 | 303 | 59 | 290 |
| 200 | 15 | 76 | 14 | 61 | 8 | 45 |
| 300 | 633 | 633 | 298 | 356 | 119 | 157 |
| 400 | 21 | 92 | 17 | 56 | 15 | 49 |
| 500 | 14 | 76 | 13 | 54 | 10 | 117 |
| 600 | 218 | 218 | 210 | 210 | 210 | 210 |
| 700 | 18 | 70 | 15 | 58 | 13 | 48 |
| 800 | 15 | 79 | 24 | 58 | 10 | 33 |
| 900 | 164 | 164 | 44 | 83 | 24 | 46 |
| 1000 | 27 | 56 | 20 | 45 | 13 | 38 |
| 1100 | 48 | 79 | 35 | 62 | 28 | 48 |
| 1200 | 122 | 122 | 116 | 116 | 116 | 116 |
| 1300 | 20 | 43 | 18 | 35 | 16 | 20 |
| 1400 | 22 | 77 | 18 | 59 | 16 | 42 |
| 1500 | 96 | 96 | 51 | 51 | 33 | 33 |
| 1600 | 15 | 58 | 13 | 35 | 10 | 31 |
| 1700 | 38 | 73 | 28 | 46 | 16 | 38 |
| 1800 | 80 | 80 | 76 | 76 | 76 | 76 |
| 1900 | 15 | 22 | 13 | 20 | 11 | 19 |
| 2000 | 16 | 67 | 12 | 38 | 10 | 25 |

[1] На тяговых подстанциях электрифицированного участка, получающих питание по одним и тем же линиям электропередачи, есть эквивалентные шестифазные статические преобразователи.

[2] На всех тяговых подстанциях электрифицированного участка, получающих питание по одним и тем же линиям электропередачи, установлены эквивалентные двенадцатифазные статические преобразователи.

[3] Значение коэффициента несимметрии по обратной последовательности напряжения $K_{2U}$ не превышает 2 %, а значения коэффициента гармонической составляющей напряжения $K_{Un}$ не превышают допустимые значения по ГОСТ 32144—2013 (подпункт 4.2.4.1, таблица 1).

[4] Значение коэффициента несимметрии по обратной последовательности напряжения $K_{2U}$ превышает 2 % и (или) значения коэффициента гармонической составляющей напряжения $K_{Un}$ превышают допустимые значения по ГОСТ 32144—2013 (подпункт 4.2.4.1, таблица 1).

Таблица 5 — Значения э. д. с. $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства при использовании на тяговой подстанции статического управляемого выпрямительного преобразователя

В вольтах

| Частота гармоники, Гц | Значения э. д. с. $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства при состоянии первичного напряжения | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Эквивалентный шестифазный статический выпрямительный преобразователь | | Эквивалентный двенадцатифазный статический выпрямительный преобразователь [1)] | | Эквивалентный двенадцатифазный статический выпрямительный преобразователь [2)] | |
| | $K_{2U}$ и $K_{Un}$ не превышают допустимые значения[3)] | $K_{2U}$ и (или) $K_{Un}$ превышают допустимые значения[4)] | $K_{2U}$ и $K_{Un}$ не превышают допустимые значения[3)] | $K_{2U}$ и (или) $K_{Un}$ превышают допустимые значения[4)] | $K_{2U}$ и $K_{Un}$ не превышают допустимые значения[3)] | $K_{2U}$ и (или) $K_{Un}$ превышают допустимые значения[4)] |
| 100 | 61 | 293 | 58 | 273 | 53 | 261 |
| 200 | 14 | 68 | 13 | 55 | 7 | 41 |
| 300 | 570 | 570 | 268 | 320 | 107 | 141 |
| 400 | 19 | 83 | 15 | 50 | 14 | 44 |
| 500 | 13 | 68 | 12 | 49 | 9 | 105 |
| 600 | 196 | 196 | 189 | 189 | 189 | 189 |
| 700 | 16 | 63 | 14 | 52 | 12 | 44 |
| 800 | 14 | 71 | 22 | 52 | 9 | 29 |
| 900 | 148 | 148 | 40 | 75 | 22 | 41 |
| 1000 | 24 | 50 | 18 | 40 | 12 | 34 |
| 1100 | 43 | 71 | 32 | 56 | 25 | 43 |
| 1200 | 110 | 110 | 104 | 104 | 104 | 104 |
| 1300 | 18 | 39 | 16 | 32 | 14 | 18 |
| 1400 | 20 | 69 | 16 | 53 | 14 | 38 |
| 1500 | 86 | 86 | 46 | 46 | 29 | 29 |
| 1600 | 14 | 52 | 12 | 32 | 9 | 28 |
| 1700 | 34 | 66 | 25 | 41 | 14 | 34 |
| 1800 | 72 | 72 | 68 | 68 | 68 | 68 |
| 1900 | 14 | 20 | 12 | 18 | 10 | 17 |
| 2000 | 14 | 60 | 11 | 34 | 9 | 23 |

[1)] На тяговых подстанциях электрифицированного участка, получающих питание по одним и тем же линиям электропередачи, есть эквивалентные шестифазные статические преобразователи.

[2)] На всех тяговых подстанциях электрифицированного участка, получающих питание по одним и тем же линиям электропередачи, установлены эквивалентные двенадцатифазные статические преобразователи.

[3)] Значение коэффициента несимметрии по обратной последовательности напряжения $K_{2U}$ не превышает 2 %, а значения коэффициента гармонической составляющей напряжения $K_{Un}$ не превышают допустимые значения по ГОСТ 32144—2013 (подпункт 4.2.4.1, таблица 1).

[4)] Значение коэффициента несимметрии по обратной последовательности напряжения $K_{2U}$ превышает 2 % и (или) значения коэффициента гармонической составляющей напряжения $K_{Un}$ превышают допустимые значения по ГОСТ 32144—2013 (подпункт 4.2.4.1, таблица 1).

Таблица 6 — Значения э. д. с. *n*-й гармоники выпрямленного напряжения на выходе вольтодобавочного устройства

В вольтах

| Частота гармоники, Гц | Значения э. д. с. *n*-й гармоники выпрямленного напряжения на выходе вольтодобавочного устройства при состоянии первичного напряжения | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $K_{2U}$ и $K_{Un}$ не превышают допустимые значения[1)] | $K_{2U}$ и (или) $K_{Un}$ превышают допустимые значения[1)] | $K_{2U}$ и $K_{Un}$ не превышают допустимые значения[2)] | $K_{2U}$ и (или) $K_{Un}$ превышают допустимые значения[2)] |
| 100 | 10 | 49 | 10 | 45 |
| 200 | 2 | 11 | 2 | 9 |
| 300 | 95 | 95 | 45 | 53 |
| 400 | 3 | 14 | 3 | 8 |
| 500 | 2 | 11 | 2 | 8 |
| 600 | 33 | 33 | 32 | 32 |
| 700 | 3 | 11 | 2 | 9 |
| 800 | 2 | 12 | 4 | 9 |
| 900 | 25 | 25 | 7 | 12 |
| 1000 | 4 | 8 | 3 | 7 |
| 1100 | 7 | 12 | 5 | 9 |
| 1200 | 18 | 18 | 17 | 17 |
| 1300 | 3 | 6 | 3 | 5 |
| 1400 | 3 | 12 | 3 | 9 |
| 1500 | 14 | 14 | 8 | 8 |
| 1600 | 2 | 9 | 2 | 5 |
| 1700 | 6 | 11 | 4 | 7 |
| 1800 | 12 | 12 | 11 | 11 |
| 1900 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| 2000 | 2 | 10 | 2 | 6 |

[1)] На тяговых подстанциях электрифицированного участка, получающих питание по одним и тем же линиям электропередачи, есть эквивалентные шестифазные и двенадцатифазные статические выпрямительные преобразователи.

[2)] На всех тяговых подстанциях электрифицированного участка, получающих питание по одним и тем же линиям электропередачи установлены только эквивалентные двенадцатифазные статические выпрямительные преобразователи.

### 6.2 Общий порядок выбора схем и основных параметров сглаживающих устройств

Выбор схем и основных параметров сглаживающих устройств осуществляют в следующей последовательности:

- выбор схемы сглаживающего устройства;
- выбор основных параметров последовательной части сглаживающего устройства;
- расчет и проверка основных параметров апериодической части сглаживающего устройства;
- расчет и проверка основных параметров резонансных контуров и фильтра-пробки сглаживающего устройства.

Исходные данные, результаты выбора схемы и основных параметров сглаживающего устройства должны быть оформлены по форме в соответствии с приложением А.

Пример выбора схемы и основных параметров сглаживающего устройства приведен в приложении Б.

Технико-экономическое сравнение вариантов оснащения тяговой подстанции сглаживающими устройствами различных типов или в различном сочетании параметров проводят по методике в соответствии с приложением В.

При технико-экономическом сравнении вариантов оснащения тяговой подстанции сглаживающими устройствами различных типов или в различном сочетании параметров необходимо обязательно учитывать потери электроэнергии в сглаживающем устройстве, определяемые в соответствии с методикой, приведенной в приложении Г.

### 6.3 Выбор схемы сглаживающего устройства

6.3.1 На тяговых подстанциях с одним или несколькими статическими выпрямительными и (или) выпрямительно-инверторными преобразователями с эквивалентной шестифазной схемой выпрямления при воздушных линиях связи на смежных межподстанционных зонах принимают, с учетом 5.1.7, двухзвенное резонансно-апериодическое сглаживающее устройство или двухзвенное резонансно-апериодическое сглаживающее устройство с фильтром-пробкой.

6.3.2 На тяговых подстанциях с одним или несколькими статическими выпрямительными и (или) выпрямительно-инверторными преобразователями с эквивалентной двенадцатифазной схемой выпрямления при воздушных линиях связи на смежных межподстанционных зонах принимают, с учетом 5.1.7, однозвенное резонансно-апериодическое сглаживающее устройство с резонансным контуром 100 Гц или двухзвенное резонансно-апериодическое сглаживающее устройство.

6.3.3 На тяговых подстанциях с одним или несколькими статическими выпрямительными и (или) выпрямительно-инверторными преобразователями с эквивалентной шестифазной схемой выпрямления, для которых значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности напряжения $K_{2U}$ не превышают 2 %, значения коэффициента гармонической составляющей напряжения $K_{Un}$ не превышают допустимые значения по ГОСТ 32144—2013 (подпункт 4.2.4.1, таблица 1), при кабельных линиях связи на смежных межподстанционных зонах принимают, с учетом 5.1.7, однозвенное апериодическое сглаживающее устройство или однозвенное резонансно-апериодическое сглаживающее устройство с резонансным контуром 100 Гц.

6.3.4 На тяговых подстанциях с одним или несколькими статическими выпрямительными и (или) выпрямительно-инверторными преобразователями с эквивалентной шестифазной схемой выпрямления, для которых значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности напряжения $K_{2U}$ превышают 2 %, значения коэффициента гармонической составляющей напряжения $K_{Un}$ превышают допустимые значения по ГОСТ 32144—2013 (подпункт 4.2.4.1, таблица 1), при кабельных линиях связи на смежных межподстанционных зонах принимают, с учетом 5.1.7, схему однозвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с резонансным контуром 100 Гц.

6.3.5 На тяговых подстанциях с одним или несколькими статическими выпрямительными и (или) выпрямительно-инверторными преобразователями с эквивалентной двенадцатифазной схемой выпрямления, для которых значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности напряжения $K_{2U}$ не превышают 2 %, значения коэффициента гармонической составляющей напряжения $K_{Un}$ не превышают допустимые значения по ГОСТ 32144—2013 (подпункт 4.2.4.1, таблица 1), при кабельных линиях связи на смежных межподстанционных зонах принимают, с учетом 5.1.7, однозвенное апериодическое сглаживающее устройство или однозвенное резонансно-апериодическое сглаживающее устройство с резонансным контуром 100 Гц.

6.3.6 На тяговых подстанциях с одним или несколькими статическими выпрямительными и (или) выпрямительно-инверторными преобразователями с эквивалентной двенадцатифазной схемой выпрямления, для которых значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности напряжения $K_{2U}$ превышают 2 %, значения коэффициента гармонической составляющей напряжения $K_{Un}$ превышают допустимые значения по ГОСТ 32144—2013 (подпункт 4.2.4.1, таблица 1), при кабельных линиях связи на смежных межподстанционных зонах принимают, с учетом 5.1.7, схему однозвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с резонансным контуром 100 Гц.

### 6.4 Выбор основных параметров последовательной части

6.4.1 Для использования в сглаживающем устройстве необходимо выбирать сглаживающий(е) реактор(ы), соответствующий(е) ГОСТ 32676. Основными параметрами сглаживающего реактора являются индуктивность реактора $L_р$, мГн, и номинальное значение сопротивления реактора постоянному току $R_р$, Ом.

6.4.2 Для выбора типа сглаживающего реактора должна быть проведена проверка по номинальному току реактора $I_р$, А:

$$I_р \geq \sum I_{ст.пр i}, \quad (5)$$

где $\sum I_{ст.пр i}$ — суммарный выходной ток всех статических преобразователей тяговой подстанции, А.

6.4.3 На тяговых подстанциях с одним или несколькими неуправляемыми статическими выпрямительными преобразователями с эквивалентной шестифазной схемой выпрямления индуктивность сглаживающего реактора (сглаживающих реакторов) принимают:

- 5 мГн для схем однозвенных сглаживающих устройств;
- 3 мГн (в каждом из двух звеньев) для схем двухзвенных сглаживающих устройств.

6.4.4 На тяговых подстанциях с одним или несколькими неуправляемыми статическими выпрямительными преобразователями с эквивалентной двенадцатифазной схемой выпрямления и использовании только таких выключателей постоянного тока, которые пригодны к отключению тока в безиндуктивной цепи как минимум 30 кА по ГОСТ Р 58365—2019 (подпункт 5.1.1.2), индуктивность сглаживающего реактора принимают 2 мГн для схем однозвенных сглаживающих устройств. При воздушных линиях связи и линиях железнодорожной электросвязи, расположенных вдоль магистрали железной дороги, на прилегающих межподстанционных зонах индуктивность сглаживающего реактора принимают 4,5 мГн для схем однозвенных сглаживающих устройств.

6.4.5 На тяговых подстанциях с одним или несколькими неуправляемыми статическими выпрямительными преобразователями с эквивалентной двенадцатифазной схемой выпрямления и использовании выключателей постоянного тока, которые пригодны к отключению тока в безиндуктивной цепи менее 30 кА по ГОСТ Р 58365—2019 (подпункт 5.1.1.2), индуктивность сглаживающего реактора принимают 3 мГн для схем однозвенных сглаживающих устройств. При воздушных линиях связи и линиях железнодорожной электросвязи, расположенных вдоль магистрали железной дороги, на прилегающих межподстанционных зонах индуктивность сглаживающего реактора принимают 4,5 мГн для схем однозвенных сглаживающих устройств.

6.4.6 На тяговых подстанциях с одним или несколькими управляемыми статическими выпрямительными преобразователями и (или) статическими выпрямительно-инверторными преобразователями принимают индуктивность сглаживающего реактора на ступень больше по ГОСТ 32676—2014 (пункт 5.1.3), чем указано в 6.4.3—6.4.5.

6.4.7 Если после расчета и проверки основных параметров сглаживающего устройства в 6.6—6.7 установлено, что не обеспечивается выполнение требований 4.7, значение индуктивности сглаживающего реактора увеличивают на одну ступень по ГОСТ 32676—2014 (пункт 5.1.3) и повторяют расчет по 6.6—6.7. Для двухзвенных сглаживающих устройств необходимо увеличить сначала индуктивность сглаживающего реактора первого звена, а затем, при необходимости, второго звена.

6.4.8 Если сглаживающий реактор с индуктивностью, выбранной в 6.4.3—6.4.7, не прошел проверку по (5), значение индуктивности сглаживающего реактора увеличивают на одну ступень по ГОСТ 32676—2014 (пункт 5.1.3) и повторяют проверку по (5).

6.4.9 Результатом выбора основных параметров последовательной части является определение индуктивности реактора $L_р$, мГн, и номинального значения сопротивления реактора постоянному току $R_р$, Ом.

### 6.5 Выбор типа конденсатора сглаживающего устройства

6.5.1 Для использования в сглаживающем устройстве необходимо выбирать фильтровые конденсаторы с допустимым отклонением емкости не более ±20 % в диапазоне частот от 100 до 2000 Гц. Если емкости одного конденсатора не достаточно для установки в сглаживающее устройство, используют параллельное соединение однотипных конденсаторов. Число параллельно соединенных конденсаторов апериодической части определяют по формуле (29), резонансных контуров по формуле (41), фильтра-пробки по формуле (55).

6.5.2 Для предварительного выбора типа конденсатора должна быть проведена проверка по номинальному напряжению конденсатора $U_{к.ном}$, В:

$$U_{к.ном} \geq U_{н.р.к}, \quad (6)$$

где $U_{н.р.к}$ — наибольшее рабочее напряжение в месте установки конденсаторов, В. Принимают для конденсаторов по ГОСТ 29322 $U_{н.р.к}$ = 3600 В.

6.5.3 При выполнении условия (6) выбранный тип конденсатора принимают к расчетам для определения основных параметров параллельной части. После определения количества конденсаторов апериодической части, резонансных контуров и фильтра-пробки проводят окончательную проверку. Вид проверки зависит от параметров, указанных в стандартах и (или) технических условиях на конденсаторы данного типа. Методика окончательной проверки выбранного типа конденсаторов приведена в 6.6.9 и 6.7.

### 6.6 Расчет и проверка основных параметров апериодической части сглаживающего устройства

6.6.1 Емкость и количество конденсаторов выбранного типа определяют графоаналитическим методом. Для этого рассчитываются следующие зависимости для выбранной схемы сглаживающего устройства с выбранными параметрами последовательной части:

- при кабельных и (или) воздушных линиях железнодорожной электросвязи на прилегающих межподстанционных зонах вычисляют зависимость псофометрического напряжения на выходе сглаживающего устройства от емкости апериодической части по формуле (3);
- при рельсовых цепях частотой 50 Гц на прилегающих межподстанционных зонах вычисляют зависимость напряжения второй гармоники выпрямленного напряжения на выходе сглаживающего устройства от емкости апериодической части по формуле (4);
- при рельсовых цепях, работающих в диапазоне частот от 400 до 925 Гц, на прилегающих межподстанционных зонах вычисляют зависимости напряжения восьмой, десятой, двенадцатой, четырнадцатой, шестнадцатой и восемнадцатой гармоник выпрямленного напряжения на выходе сглаживающего устройства от емкости апериодической части по формуле (4).

Вышеуказанные зависимости рассчитываются в диапазоне изменения емкости апериодической части от номинальной емкости конденсатора выбранного типа до 1000 мкФ, с шагом не более 10 мкФ.

6.6.2 При вычислении зависимостей, указанных в 6.6.1, коэффициент сглаживания $n$-й гармоники выпрямленного напряжения с учетом допустимого отклонения значения индуктивности сглаживающего реактора (сглаживающих реакторов) по ГОСТ 32676 — «минус 10 %» для однозвенных сглаживающих устройств вычисляют по формуле (1), для двухзвенных сглаживающих устройств — по формуле (2).

6.6.3 При вычислении зависимостей, указанных в 6.6.1, и выборе действующих значений э. д. с. $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства по таблицам 3—6, необходимо учесть, что действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства $U_{1n}$, В, всегда меньше значения э. д. с. $n$-й гармоники выпрямленного напряжения $E_n$. Для двухзвенных сглаживающих устройств при статическом выпрямительном преобразователе $U_{1n}$, В, вычисляют по формуле

$$U_{1n} = \frac{10^{-3}\omega_n\left(L_{p1}+L_{p2}\right)}{X_{вп}+10^{-3}\omega_n\left(L_{p1}+L_{p2}\right)}E_n, \tag{7}$$

где $\omega_n$ — угловая частота $n$-й гармонической составляющей выпрямленного напряжения, рад/с, вычисляемая по формуле

$$\omega_n = 2\pi \cdot f \cdot n, \tag{8}$$

где $f$ — частота питающей сети (принимают равной 50 Гц).

Для двухзвенных сглаживающих устройств при статическом выпрямительно-инверторном преобразователе $U_{1n}$, В, вычисляют по формуле

$$U_{1n} = \frac{10^{-3}\omega_n\left(L_{p1}+L_{p2}\right)}{X_{вп}+10^{-3}\omega_n\left(L_{p1}+L_{p2}+\sum L_{инi}\right)}E_n, \tag{9}$$

где $\sum L_{инi}$ — суммарная индуктивность реакторов, установленных на входе инвертора, мГн.

Для однозвенных сглаживающих устройств при статическом выпрямительном преобразователе $U_{1n}$, В, вычисляют по формуле

$$U_{1n} = \frac{10^{-3}\omega_n L_p}{X_{вп}+10^{-3}\omega_n L_p}E_n. \tag{10}$$

Для однозвенных сглаживающих устройств при статическом выпрямительном преобразователе с вольтодобавочным устройством $U_{1n}$, В, вычисляют по формуле

$$U_{1n} = \frac{10^{-3}\omega_n L_р}{X_{вп} + X_{ВДУn} + 10^{-3}\omega_n L_р}\left(E_n + E_{ВДУn}\right). \quad (11)$$

Для однозвенных сглаживающих устройств при статическом выпрямительно-инверторном преобразователе $U_{1n}$, В, вычисляют по формуле

$$U_{1n} = \frac{10^{-3}\omega_n L_р}{X_{вп} + 10^{-3}\omega_n\left(L_р + \sum L_{инi}\right)}E_n. \quad (12)$$

При использовании в последовательной части реакторов общей индуктивностью 6 мГн и более, результирующее индуктивное сопротивление цепи коммутации статического выпрямительного преобразователя $X_{вп}$ при выборе схем и параметров сглаживающих устройств не учитывают, принимая $U_{1n} = E_n$.

Результирующее индуктивное сопротивление цепи коммутации статического выпрямительного преобразователя $X_{вп}$, Ом, вычисляют по формуле

$$X_{вп} = \left(\frac{1}{S_{к.з}} + \frac{u_{к.п}}{100}\frac{1}{k_п S_{н.п}} + \frac{u_{к.т}}{100}\frac{1}{k_т S_{н.т}}\right)U_2^2 n, \quad (13)$$

где $S_{к.з}$ — мощность короткого замыкания на шинах высшего напряжения тяговой подстанции (в максимальном режиме работы питающей сети), МВ·А;

$U_2$ — линейное напряжение вентильной обмотки преобразовательного трансформатора. Для эквивалентных шестифазных нулевых выпрямителей $U_2$ = 5,220 кВ; для эквивалентных двенадцатифазных выпрямителей с параллельным соединением мостов и для эквивалентных шестифазных мостовых выпрямителей $U_2$ = 2,610 кВ; для эквивалентных двенадцатифазных выпрямителей с последовательным соединением мостов $U_2$ = 1,305 кВ;

$S_{н.п}$, $S_{н.т}$ — номинальные мощности соответственно понижающего и преобразовательного трансформаторов, МВ·А;

$u_{к.п}$, $u_{к.т}$ — напряжения короткого замыкания соответственно понижающего и преобразовательного трансформатора, %;

$k_п$, $k_т$ — количество параллельно включенных соответственно понижающих и преобразовательных трансформаторов, шт.

Результирующее индуктивное сопротивление цепи коммутации статического выпрямительно-инверторного преобразователя $X_{вп}$, Ом, вычисляют по формуле

$$X_{вп} = \left(\frac{1}{S_{к.з}} + \frac{u_{к.п}}{100}\frac{1}{k_п S_{н.п}} + \frac{u_{к.т}}{100}\frac{1}{k_т S_{н.т}}\right)U_{2ин}^2 n, \quad (14)$$

где $U_{2ин}$ — линейное напряжение вентильной обмотки преобразовательного трансформатора выпрямительно-инверторного преобразователя, кВ, вычисляют по формуле $U_{2ин} = 1{,}1U_2$.

Результирующее индуктивное сопротивление цепи коммутации вольтодобавочного устройства $X_{ВДУn}$, Ом, вычисляют по формуле

$$X_{ВДУn} = \left(\frac{1}{S_{к.з}} + \frac{u_{к.п}}{100}\frac{1}{k_п S_{н.п}} + \frac{u_{к.т}}{100}\frac{1}{k_т S_{н.т}}\right)U_{2ВДУ}^2 n, \quad (15)$$

где $U_{2ВДУ}$ — линейное напряжение вентильной обмотки трансформатора вольтодобавочного устройства. Для эквивалентных двенадцатифазных вольтодобавочных устройств с параллельным соединением мостов $U_{2ВДУ}$ = 0,436 кВ; для эквивалентных двенадцатифазных вольтодобавочных устройств с последовательным соединением мостов $U_{2ВДУ}$ = 0,218 кВ.

На подстанциях с высшим напряжением, равным первичному напряжению преобразовательного трансформатора, второе слагаемое в скобках в формулах (13) — (15) принимают равным нулю.

При выборе схем и параметров сглаживающего устройства результирующее индуктивное сопротивление цепи коммутации статического преобразователя необходимо учитывать для случая параллельной работы всех понижающих и преобразовательных трансформаторов тяговой подстанции.

6.6.4 При расчете коэффициента сглаживания $n$-й гармоники выпрямленного напряжения необходимо принять предварительные параметры резонансных контуров и фильтра-пробки для всех схем сглаживающих устройств в соответствии с данными таблицы 7, активные сопротивления резонансных контуров и апериодической части в соответствии с 4.1. Параметры резонансных контуров и фильтра-пробки после определения требуемого количества конденсаторов апериодической части должны быть уточнены в порядке, приведенном в 6.7.1.

Таблица 7 — Предварительные параметры резонансных контуров и фильтра-пробки

| Элемент схемы | Частота, Гц | Индуктивность, мГн | Емкость, мкФ |
|---|---|---|---|
| Резонансный контур | 100 | 17,59 | 144 |
| | 200 | 5,86 | 108 |
| | 300 | 2,93 | 96 |
| | 400 | 2,64 | 60 |
| | 500 | 2,11 | 48 |
| | 600 | 1,95 | 36 |
| Фильтр-пробка | 300 | 18,40 | 2 |

6.6.5 Сопротивление последовательной части однозвенных сглаживающих устройств для $n$-й гармоники выпрямленного напряжения $Z_{\text{послn}}$, Ом, вычисляют по формуле

$$Z_{\text{послn}} = R_{\text{р}} + 10^{-3} j\omega_n L_{\text{р}}, \tag{16}$$

где $R_{\text{р}}$ — активное сопротивление реактора, Ом;

$L_{\text{р}}$ — индуктивность реактора, мГн.

Сопротивление параллельной части однозвенного апериодического сглаживающего устройства $Z_{\text{парn}}$, Ом, вычисляют по формуле

$$Z_{\text{парn}} = R_C - j\frac{10^6}{\omega_n C}, \tag{17}$$

где $R_C$ — активное сопротивление апериодической части однозвенного сглаживающего устройства, Ом, принимают в соответствии с 4.1, равным 0,2 Ом;

$C$ — емкость апериодической части, мкФ.

Сопротивление параллельной части однозвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с резонансным контуром 100 Гц $Z_{\text{парn}}$, Ом, вычисляют по формуле

$$Z_{\text{парn}} = \left[\left(R_1 + j\left(10^{-3}\omega_n L_1 - \frac{10^6}{\omega_n C_1}\right)\right)^{-1} + \left(R_C - j\frac{10^6}{\omega_n C}\right)^{-1}\right]^{-1}, \tag{18}$$

где $R_1$ — активное сопротивление резонансного контура 100 Гц, Ом, принимают в соответствии с таблицей 1;

$L_1$ и $C_1$ — индуктивность, мГн, и емкость, мкФ, резонансного контура 100 Гц принимают в соответствии с таблицей 7.

6.6.6 Сопротивление последовательной части первого звена двухзвенных сглаживающих устройств для $n$-й гармоники выпрямленного напряжения $Z_{\text{посл1}n}$, Ом, вычисляют по формуле

$$Z_{\text{посл1}n} = R_{\text{р1}} + 10^{-3} j\omega_n L_{\text{р1}}, \tag{19}$$

где $R_{\text{р1}}$ — активное сопротивление реактора первого звена, Ом;

$L_{\text{р1}}$ — индуктивность реактора первого звена, мГн.

Сопротивление последовательной части второго звена двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с фильтром-пробкой $Z_{посл2n}$, Ом, вычисляют по формуле

$$Z_{посл2n} = \left[\left(R_{фп} + j\left(10^{-3}\omega_n L_{фп} - \frac{10^6}{\omega_n C_{фп}}\right)\right)^{-1} + \frac{1}{R_{p2} + 10^{-3} j\omega_n L_{p2}}\right]^{-1}, \quad (20)$$

где $R_{фп}$ — активное сопротивление последовательно соединенных емкостного и индуктивного контуров фильтра-пробки, Ом, принимают в соответствии с таблицей 1;

$L_{фп}$ и $C_{фп}$ — индуктивность, мГн, и емкость, мкФ, фильтра-пробки, настроенной на частоту 300 Гц, принимают в соответствии с таблицей 7;

$R_{p2}$ — активное сопротивление реактора второго звена, Ом;

$L_{p2}$ — индуктивность реактора второго звена, мГн.

Сопротивление последовательной части второго звена двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства $Z_{посл2n}$, Ом, вычисляют по формуле

$$Z_{посл2n} = R_{p2} + 10^{-3} j\omega_n L_{p2}, \quad (21)$$

где $R_{p2}$ — активное сопротивление реактора второго звена, Ом.

Сопротивление параллельной части второго звена двухзвенных сглаживающих устройств $Z_{пар2n}$, Ом, вычисляют по формуле

$$Z_{пар2n} = R_C - j\frac{10^6}{\omega_n C}, \quad (22)$$

где $R_C$ — активное сопротивление апериодической параллельной части второго звена, Ом, принимают в соответствии с 4.1;

$C$ — емкость апериодической части, мкФ.

Сопротивление параллельной части первого звена двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства $Z_{пар1n}$, Ом, вычисляют по формуле

$$Z_{пар1n} = \left[\left(R_1 + j\left(10^{-3}\omega_n L_1 - \frac{10^6}{\omega_n C_1}\right)\right)^{-1} + \left(R_2 + j\left(10^{-3}\omega_n L_2 - \frac{10^6}{\omega_n C_2}\right)\right)^{-1} + \left(R_3 + j\left(10^{-3}\omega_n L_3 - \frac{10^6}{\omega_n C_3}\right)\right)^{-1}\right]^{-1}, \quad (23)$$

где $R_1$, $R_2$, $R_3$ — активные сопротивления резонансных контуров 100, 200 и 300 Гц, Ом, принимают в соответствии с таблицей 1;

$L_1$, $L_2$, $L_3$ — индуктивности резонансных контуров 100, 200 и 300 Гц, мГн, принимают в соответствии с таблицей 7;

$C_1$, $C_2$, $C_3$ — емкости резонансных контуров 100, 200 и 300 Гц, мкФ, принимают в соответствии с таблицей 7.

Сопротивление параллельной части первого звена двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с фильтром-пробкой $Z_{пар1n}$, Ом, вычисляют по формуле

$$Z_{пар1n} = \left[\begin{array}{l}\left(R_1 + j\left(10^{-3}\omega_n L_1 - \frac{10^6}{\omega_n C_1}\right)\right)^{-1} + \left(R_2 + j\left(10^{-3}\omega_n L_2 - \frac{10^6}{\omega_n C_2}\right)\right)^{-1} + \left(R_3 + j\left(10^{-3}\omega_n L_3 - \frac{10^6}{\omega_n C_3}\right)\right)^{-1} + \\ + \left(R_4 + j\left(10^{-3}\omega_n L_4 - \frac{10^6}{\omega_n C_4}\right)\right)^{-1} + \left(R_5 + j\left(10^{-3}\omega_n L_5 - \frac{10^6}{\omega_n C_5}\right)\right)^{-1} + \left(R_6 + j\left(10^{-3}\omega_n L_6 - \frac{10^6}{\omega_n C_6}\right)\right)^{-1}\end{array}\right]^{-1}, \quad (24)$$

где $R_1$, $R_2$, $R_3$, $R_4$, $R_5$, $R_6$ — активные сопротивления резонансных контуров 100, 200, 300, 400, 500, 600 Гц соответственно, Ом, принимают в соответствии с таблицей 1;

$L_1$, $L_2$, $L_3$, $L_4$, $L_5$, $L_6$ — индуктивности резонансных контуров 100, 200, 300, 400, 500, 600 Гц, мГн, принимают в соответствии с таблицей 7;

$C_1$, $C_2$, $C_3$, $C_4$, $C_5$, $C_6$ — емкости резонансных контуров 100, 200, 300, 400, 500, 600 Гц, мкФ, принимают в соответствии с таблицей 7.

6.6.7 Результаты расчета по формулам (3) и (4) представляют в графическом виде, пример которого представлен на рисунке 7. По полученным зависимостям определяется диапазон изменения емкости апериодической части от минимального значения $C_{мин.доп}$ до максимального $C_{макс.доп}$. В случае наличия нескольких диапазонов выбирают тот, в котором находится минимальное значение емкости.

Предварительное значение емкости апериодической части с учетом отклонения емкости конденсаторов $C'$, мкФ, вычисляют по формуле

$$C' = k_C k_{ст} C_{мин.доп}, \quad (25)$$

где $k_C$ — коэффициент, учитывающий допустимое отклонение емкости конденсаторов, указанное в стандартах и технических условиях на конденсаторы данного типа. Например, при допустимом отклонении емкости ±20 % $k_C$ = 1,2;

$k_{ст}$ — коэффициент старения, учитывающий уменьшение номинальной емкости конденсаторов в течение срока службы. Коэффициент принимают $k_{ст}$ = 1,05 и не учитывают для вновь строящихся тяговых подстанций.

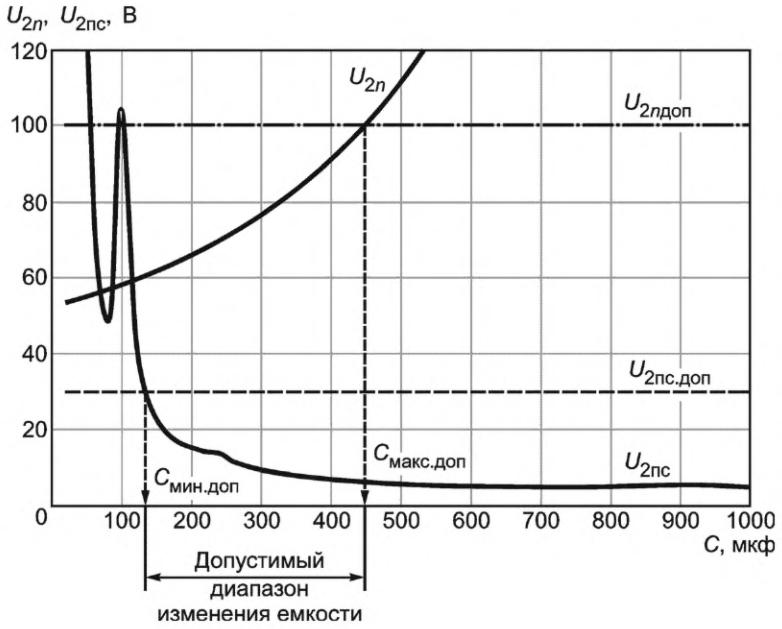
Необходимое число конденсаторов апериодической части $N'_C$, шт., вычисляют по формуле (полученное значение округляют в большую сторону до ближайшего целого числа)

$$N'_C = C'/ c_к, \quad (26)$$

где $c_к$ — номинальная емкость конденсатора выбранного типа, мкФ.

Для проверки соответствия рассчитанного значения емкости допустимому диапазону изменения емкости апериодической части применяют неравенство, мкФ

$$N'_C \cdot c_к < C_{макс.доп} \quad (27)$$




$U_{2n}$ — действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на выходе сглаживающего устройства;
$U_{2пс}$ — псофометрическое напряжение на выходе сглаживающего устройства; $C$ — емкость резонансных контуров;
$C_{мин.доп}$, $C_{макс.доп}$ — минимально допустимое и максимально допустимое значения изменения емкости апериодической части;
$U_{2nдоп}$ — допустимое действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на выходе сглаживающего устройства;
$U_{2пс.доп}$ — допустимое псофометрическое напряжение на выходе сглаживающего устройства

Рисунок 7 — Примерный вид зависимостей псофометрического напряжения и напряжения второй гармоники выпрямленного напряжения от емкости апериодической части на выходе сглаживающего устройства для вычисления емкости апериодической части

В случае выполнения неравенства (27) за значение емкости конденсаторов апериодической части, учитывающее отклонение параметров параллельной и последовательной части сглаживающего устройства в пределах допустимых значений и обеспечивающее выполнение требований 4.7, необходимо принять значение $C$, мкФ, вычисляемое по формуле

$$C = N'_C \cdot c_к, \quad (28)$$

а число конденсаторов $N_C$ , шт., по формуле

$$N_C = C / c_к. \quad (29)$$

По условию исключения опасных резонансных явлений между элементами сглаживающего устройства значение $C$, мкФ, принятое по формуле (28), должно быть проверено на принадлежность к недопустимым диапазонам емкости апериодической части, указанным в таблицах 8 и 9.

Таблица 8 — Недопустимые диапазоны емкости апериодической части однозвенных сглаживающих устройств

| Индуктивность реактора, Гн | Емкость апериодической части, мкФ |
|---|---|
| 2 | Менее 200; от 250 до 400; от 850 до 1650 |
| 3 | Менее 135; от 160 до 270; от 550 до 1150 |
| 4,5 | Менее 90; от 115 до 175; от 380 до 800 |
| 5 | Менее 80; от 100 до 160; от 340 до 700 |
| 7 | Менее 55; от 70 до 115; от 250 до 500 |

Таблица 9 — Недопустимые диапазоны емкости апериодической части двухзвенных сглаживающих устройств

| Индуктивность реактора первого звена, Гн | Индуктивность реактора второго звена, Гн | Емкость апериодической части, мкФ |
|---|---|---|
| 3 | 3 | Менее 135; от 280 до 590 |
| 5 | 3 | Менее 100; от 210 до 440 |
| 4,5 | 4,5 | Менее 90; от 190 до 400 |
| 5 | 5 | Менее 80; от 170 до 360 |
| 7 | 5 | Менее 70; от 145 до 310 |
| 7 | 7 | Менее 60; от 120 до 260 |

В случае принадлежности значения $C$, мкФ, принятого по формуле (28), к недопустимому диапазону емкости апериодической части необходимо увеличить значение $C$ и число конденсаторов $N_C$, до тех пор, пока значение С не будет находиться за пределами недопустимого диапазона емкости апериодической части.

6.6.8 В случае невыполнения неравенства (27) необходимо, при наличии, выбрать следующий диапазон допустимых значений: $C_{мин.доп} – C_{макс.доп}$ и повторить расчет и проверку по формулам (25), (26), (28), (29) и неравенству (27).

В случае невыполнения неравенства (27) и отсутствия другого диапазона допустимых значений $C_{мин.доп} – C_{макс.доп}$ необходимо выбрать другую схему сглаживающего устройства в соответствии с 6.3.1—6.3.6 с той же индуктивностью реактора, повторить расчет и проверку по 6.6.1—6.6.7.

В случае невыполнения неравенства (27) после перерасчета в этом случае значение индуктивности сглаживающего реактора увеличивают на одну ступень из номинального ряда по ГОСТ 32676—2014 (пункт 5.1.3) и вычисления по 6.6.1—6.6.7 повторяют. При этом необходимо провести технико-экономическое сравнение двух вариантов сглаживающих устройств в соответствии с приложением В:

- вариант 1 — сглаживающее устройство с индуктивностью реактора, принятой по 6.4.3—6.4.6 и емкостью апериодической части, повторно вычисленной по 6.6.1—6.6.7, для диапазона от номинальной емкости конденсатора выбранного типа до 2000 мкФ;

- вариант 2 — сглаживающее устройство с увеличенной на одну ступень индуктивностью реактора и емкостью апериодической части, вычисленной по 6.6.1—6.6.7, для диапазона от номинальной емкости конденсатора выбранного типа до 1000 мкФ.

6.6.9 После вычисления по формуле (29) числа конденсаторов необходимо выполнить окончательную проверку в зависимости от требований стандарта и технических условий на конденсаторы данного типа по мощности выделяемой всеми гармониками в апериодической части или по току гармоники $n$-го порядка, протекающему в апериодической части, и напряжению гармоники $n$-го порядка, приложенному к апериодической части.

Проверка по току гармоники $n$-го порядка, протекающему в апериодической части, и напряжению гармоники $n$-го порядка, приложенному к апериодической части, или мощности выделяемой всеми гармониками в апериодической части заключается в проверке выполнения условий:

$$I_{\text{апер}n} \le I_{\text{доп.апер}n},\ U_{\text{апер}n} \le U_{\text{доп.апер}n}, \tag{30}$$

$$S_{\text{апер}n} \le S_{\text{доп.апер}n}, \tag{31}$$

где $I_{\text{апер}n}$ — действующее значение тока гармоники $n$-го порядка, протекающего в апериодической части, А;

$I_{\text{доп.апер}n}$ — допустимое действующее значение тока гармоники $n$-го порядка, протекающего через апериодическую часть, А;

$U_{\text{апер}n}$ — действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения, приложенное к апериодической части, В;

$U_{\text{доп.апер}n}$ — допустимое действующее значение напряжения гармоники $n$-го порядка, приложенного к апериодической части, В;

$S_{\text{апер}n}$ — мощность, выделяемая гармониками $n$-го порядка в апериодической части, кВ·А;

$S_{\text{доп.апер}n}$ — допустимое значение мощности выделяемой гармониками $n$-го порядка в апериодической части, кВ·А.

Для однозвенных сглаживающих устройств ток $n$-й гармоники, протекающий через апериодическую часть $I_{\text{апер}n}$, А, вычисляют по формуле

$$I_{\text{апер}n} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{\left(R_{\text{р}} + R_C\right)^2 + \left(10^{-3}\omega_n L_{\text{р}} - \dfrac{10^6}{\omega_n C}\right)^2}}, \tag{32}$$

где $R_C$ — активное сопротивление апериодической части сглаживающего устройства, Ом, принимают равным 0,1 Ом.

Для двухзвенных сглаживающих устройств ток $n$-й гармоники, протекающий через апериодическую часть $I_{\text{апер}n}$, А, вычисляют по формуле

$$I_{\text{апер}n} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{\left(R_{\text{р}1} + R_{\text{р}2} + R_C\right)^2 + \left(10^{-3}\omega_n \left(L_{\text{р}1} + L_{\text{р}2}\right) - \dfrac{10^6}{\omega_n C}\right)^2}}, \tag{33}$$

где $R_C$ — активное сопротивление апериодической части сглаживающего устройства, Ом, принимают равным 0,1 Ом;

$C$ — емкость апериодической части, мкФ, принимают значение, вычисленное по формуле (28).

Действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения, приложенное к апериодической части, $U_{\text{апер}n}$, В:

$$U_{\text{апер}n} = U_{2n}. \tag{34}$$

Действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на выходе сглаживающего устройства $U_{2n}$ вычисляют по формуле (4).

Мощность, выделяемая всеми гармониками в апериодической части, $S_{\text{апер}}$, кВ·А, вычисляют по формуле

$$S_{\text{апер}} = \sqrt{\sum_n \left(S_{\text{апер}n}\right)^2}. \tag{35}$$

Мощность, выделяемая гармониками $n$-го порядка в апериодической части, $S_{\text{апер}n}$, кВ·А, вычисляют по формуле

$$S_{\text{апер}n} = 10^{-3}\, U_{2n}\, I_{\text{апер}n}. \tag{36}$$

Действующее значение тока в апериодической части $I_{\text{апер}}$, А, вычисляют по формуле

$$I_{\text{апер}} = \sqrt{\sum_n \left(I_{\text{апер}n}\right)^2}. \tag{37}$$

Допустимое значение тока гармоники $n$-го порядка $I_{\text{доп.апер}n}$, допустимое напряжение гармоники $n$-го порядка $U_{\text{доп.апер}n}$, допустимая мощность, выделяемая всеми гармониками в апериодической части $S_{\text{доп.апер}}$, определяется техническими характеристиками конденсатора выбранного типа.

Допустимое действующее значение тока гармоники $n$-го порядка, протекающего через апериодическую часть, $I_{\text{доп.апер}n}$, А, вычисляют по формуле

$$I_{\text{доп.апер}n} = I^{*}_{\text{доп.к}n}\,C, \tag{38}$$

где $I^{*}_{\text{доп.к}n}$ — отношение допустимого значения тока гармоники $n$-го порядка к значению емкости конденсатора, А/мкФ.

Допустимое действующее значение напряжения гармоники $n$-го порядка, приложенное к апериодической части, $U_{\text{доп.апер}n}$, В:

$$U_{\text{доп.апер}n} = U_{\text{доп.к}n}, \tag{39}$$

где $U_{\text{доп.к}n}$ — действующее значение допустимого напряжения для гармоники $n$-го порядка, В.

Допустимую мощность конденсаторов выбранного типа, выделяемую всеми гармониками в апериодической части, $S_{\text{доп.апер}}$, кВ·А, вычисляют по формуле

$$S_{\text{доп.апер}} = N_C S_{\text{доп.к}}, \tag{40}$$

где $S_{\text{доп.к}}$ — допустимое значение мощности одного конденсатора выбранного типа, кВ·А.

### 6.7 Расчет и проверка основных параметров резонансных контуров и фильтра-пробки сглаживающего устройства

6.7.1 Число конденсаторов выбранного типа $i$-го резонансного контура $N_{C_{\text{р.к}i}}$, шт., вычисляют по формуле (полученное значение округляется в большую сторону до ближайшего целого числа)

$$N_{C_{\text{р.к}i}} = C'_{\text{р.к}i} \cdot c_{\text{к}}, \tag{41}$$

где $C'_{\text{р.к}i}$ — емкость $i$-го резонансного контура, принятая в соответствии с таблицей 7, мкФ.

Значение емкости конденсаторов $i$-го резонансного контура $C_{\text{р.к}i}$, мкФ, вычисляют по формуле

$$C_{\text{р.к}i} = N_{C_{\text{р.к}i}} \cdot c_{\text{к}}. \tag{42}$$

6.7.2 После вычисления по формуле (41) числа конденсаторов необходимо выполнить окончательную проверку в зависимости от требований стандарта и (или) технических условий на конденсаторы данного типа по току гармоники $n$-го порядка, протекающему в резонансном контуре, и напряжению гармоники $n$-го порядка, приложенному к резонансному контуру, или мощности выделяемой всеми гармониками в резонансном контуре.

Проверка по току гармоники $n$-го порядка, протекающему в резонансном контуре, и напряжению гармоники $n$-го порядка, приложенному к резонансному контуру, или мощности выделяемой всеми гармониками в резонансном контуре заключается в проверке выполнения условий:

$$I_{\text{р.к}in} \le I_{\text{доп.р.к}n},\ U_{\text{р.к}in} \le U_{\text{доп.р.к}n}, \tag{43}$$

$$S_{\text{р.к}i} \le S_{\text{доп.р.к}}, \tag{44}$$

где $I_{\text{р.к}in}$ — действующее значение тока гармоники $n$-го порядка, протекающего в $i$-м резонансном контуре, А;

$I_{\text{доп.р.к}n}$ — допустимое действующее значение тока гармоники $n$-го порядка, протекающего через $i$-й резонансный контур, А;

$U_{\text{р.к}in}$ — действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения, приложенное к конденсаторам $i$-го резонансного контура, В;

$U_{\text{доп.р.к}n}$ — допустимое действующее значение напряжения гармоники $n$-го порядка, приложенное к конденсаторам $i$-го резонансного контура, В;

$S_{\text{р.к}i}$ — мощность, выделяемая всеми гармониками в конденсаторах $i$-го резонансного контура, кВ·А;

$S_{\text{доп.р.к}}$ — допустимое значение мощности выделяемой всеми гармониками в конденсаторах $i$-го резонансного контура, кВ·А.

Для однозвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с резонансным контуром 100 Гц действующее значение тока гармоники $n$-го порядка, протекающего в $i$-м резонансном контуре $I_{\text{р.к}in}$, А, вычисляют по формуле

$$I_{\text{р.к}in} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{\left(R_{\text{р}} + R_{\text{р.к}i}\right)^2 + \left(10^{-3}\omega_n\left(L_{\text{р}} + L_{\text{р.к}i}\right) - \dfrac{10^6}{\omega_n C_{\text{р.к}i}}\right)^2}}. \quad (45)$$

Для двухзвенных сглаживающих устройств действующее значение тока $n$-го порядка, протекающий в $i$-м резонансном контуре $I_{\text{р.к}in}$, А, вычисляют по формуле

$$I_{\text{р.к}in} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{\left(R_{\text{р}} + R_{\text{р.к}i}\right)^2 + \left(10^{-3}\omega_n\left(L_{\text{р1}} + L_{\text{р.к}i}\right) - \dfrac{10^6}{\omega_n C_{\text{р.к}i}}\right)^2}}, \quad (46)$$

где $R_{\text{р.к}i}$ — минимальное активное сопротивление $i$-го резонансного контура, Ом, принимают равным 0,1 Ом;

$L_{\text{р.к}i}$ — индуктивность $i$-го резонансного контура, мГн.

Индуктивность $i$-го резонансного контура $L_{\text{р.к}i}$, мГн, вычисляют по формуле

$$L_{\text{р.к}i} = \frac{10^3}{4\pi^2 f_{\text{р.к}i}^2 C_{\text{р.к}i}}, \quad (47)$$

где $f_{\text{р.к}i}$ — частота настройки $i$-го резонансного контура, Гц.

Чтобы иметь возможность настраивать контур в резонанс, индуктивность катушки должна изменяться в пределах ±10 % от уточненного значения. Для этого катушка индуктивности должна иметь соответствующие отпайки или в каждом контуре должны быть две катушки — основная и регулировочная. Размер и форму катушки определяют в каждом отдельном случае для разных сечений проводов, исходя из вычисленного по формуле (47) значения индуктивности катушки.

Действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения, приложенное к конденсаторам $i$-го резонансного контура $U_{\text{р.к}in}$, В, вычисляют по формуле

$$U_{\text{р.к}in} = I_{\text{р.к}in}\sqrt{R_{\text{р.к}i}^2 + \left(\frac{10^6}{\omega_n C_{\text{р.к}i}}\right)^2}. \quad (48)$$

Мощность, выделяемую всеми гармониками в $i$-м резонансном контуре $S_{\text{р.к}i}$, кВ·А, вычисляют по формуле

$$S_{\text{р.к}i} = \sqrt{\sum_n \left(S_{\text{р.к}in}\right)^2}. \quad (49)$$

Мощность, выделяемую гармониками $n$-го порядка в $i$-м резонансном контуре $S_{\text{р.к}in}$, кВ·А, вычисляют по формуле

$$S_{\text{р.к}in} = \frac{10^{-3} U_{1n} I_{\text{р.к}in}}{K_n}. \quad (50)$$

Действующее значение тока в $i$-м резонансном контуре $I_{\text{р.к}i}$, А, вычисляют по формуле

$$I_{\text{р.к}i} = \sqrt{\sum_n \left(I_{\text{р.к}in}\right)^2}. \quad (51)$$

Допустимое значение тока гармоники $n$-го порядка $I_{\text{доп.р.к}in}$, допустимое напряжение гармоники $n$-го порядка $U_{\text{доп.р.к}in}$, допустимая мощность, выделяемая всеми гармониками в $i$-м резонансном контуре $S_{\text{доп.р.к}i}$, определяется техническими характеристиками конденсатора выбранного типа.

Допустимое действующее значение тока гармоники $n$-го порядка, протекающего в $i$-м резонансном контуре $I_{\text{доп.р.к}in}$, А, вычисляют по формуле

$$I_{\text{доп.р.к}in} = I^{*}_{\text{доп.к}n} C_{\text{р.к}i}. \quad (52)$$

Допустимое действующее значение напряжение гармоники $n$-го порядка, приложенное к $i$-му резонансному контуру $U_{\text{доп.р.к}in}$, В:

$$U_{\text{доп.р.к}in} = U_{\text{допк}n}. \quad (53)$$

Допустимую мощность, выделяемую всеми гармониками в $i$-м резонансном контуре, конденсаторов, выбранного типа $S_{\text{доп.р.к}i}$, кВ·А, вычисляют по формуле

$$S_{\text{доп.р.к}i} = N_{C_{\text{р.к}i}} S_{\text{доп.к}}. \quad (54)$$

6.7.3 Значение индуктивности катушек индуктивности и емкости конденсаторов фильтра-пробки, приведенное в таблице 4, не требует уточнения при условии возможности регулирования параметров катушки индуктивности фильтра-пробки $L_{\text{фп}}$ в пределах: ±10 %.

6.7.4 Число конденсаторов выбранного типа фильтра-пробки $N_{C_{\text{фп}}}$, шт. вычисляют по формуле (полученное значение округляется в большую сторону до ближайшего целого числа)

$$N_{C_{\text{фп}}} = C'_{\text{фп}} / c_{\text{к}}, \quad (55)$$

где $C'_{\text{фп}}$ — емкость фильтра-пробки, принятая в соответствии с таблицей 4, мкФ.

Значение емкости конденсаторов фильтра-пробки $C_{\text{фп}}$, мкФ, вычисляют по формуле

$$C_{\text{фп}} = N_{C_{\text{фп}}} \cdot c_{\text{к}}. \quad (56)$$

6.7.5 После вычисления по формуле (55) числа конденсаторов необходимо выполнить окончательную проверку в зависимости от требований стандарта и технических условий на конденсаторы данного типа по току гармоники $n$-го порядка, протекающему в фильтре-пробке, и напряжению гармоники $n$-го порядка, приложенному к фильтру-пробке, или мощности выделяемой всеми гармониками в фильтре-пробке.

Проверка по току гармоники $n$-го порядка, протекающему в резонансном контуре фильтра-пробки, и напряжению гармоники $n$-го порядка, приложенному к конденсаторам фильтра-пробки, или мощности выделяемой всеми гармониками в резонансном контуре фильтра-пробки заключается в проверке выполнения условий:

$$I_{\text{р.к.фп}n} \le I_{\text{доп.р.к.фп}n},\ U_{\text{р.к.фп}n} \le U_{\text{доп.р.к.фп}n}. \quad (57)$$

$$S_{\text{р.к.фп}} \le S_{\text{доп.р.к.фп}}, \quad (58)$$

где $I_{\text{р.к.фп}n}$ — действующее значение тока гармоники $n$-го порядка, протекающего в резонансном контуре фильтра-пробки, А;

$I_{\text{доп.р.к.фп}n}$ — допустимое действующее значение тока гармоники $n$-го порядка, протекающего через резонансный контур фильтра-пробки, А;

$U_{\text{р.к.фп}n}$ — действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения, приложенное к конденсаторам резонансного контура фильтра-пробки, В;

$U_{\text{доп.р.к.фп}n}$ — допустимое действующее значение напряжения гармоники $n$-го порядка, приложенное к конденсаторам резонансного контура фильтра-пробки, В;

$S_{\text{р.к.фп}}$ — мощность, выделяемая всеми гармониками в конденсаторах резонансного контура фильтра-пробки, кВ·А;

$S_{\text{доп.р.к.фп}}$ — допустимое значение мощности выделяемой всеми гармониками в конденсаторах резонансного контура фильтра-пробки, кВ · А.

Сопротивление фильтра-пробки для тока $n$-й гармоники $Z_{\text{фп}n}$, Ом, вычисляют по формуле

$$Z_{\text{фп}n} = \left[ \left( R_{\text{фп}} + j \left( 10^{-3} \omega_n L_{\text{фп}} - \frac{10^6}{\omega_n C_{\text{фп}}} \right) \right)^{-1} + \left( R_{\text{р2}} + 10^{-3} j \omega_n L_{\text{р2}} \right)^{-1} \right]^{-1}, \quad (59)$$

где $R_{\text{фп}}$ — минимальное активное сопротивление резонансного контура фильтра-пробки, Ом, принимают равным 0,1 Ом;

$L_{\text{р2}}$ — индуктивность реактора второго звена, мГн;

$L_{\text{фп}}$ — индуктивность резонансного контура фильтра-пробки, мГн.

Индуктивность фильтра-пробки $L_{\text{фп}}$, мГн, вычисляют по формуле

$$L_{\text{фп}} = \frac{10^3}{4\pi^2 f_{\text{фп}}^2 C_{\text{фп}}} - L_{\text{р2}}, \quad (60)$$

где $f_{\text{фп}}$ — частота настройки фильтра-пробки, Гц.

Размер и форму катушки определяют в каждом отдельном случае для разных сечений проводов, исходя из вычисленного по формуле (64) значения индуктивности катушки.

Действующее значение тока гармоники $n$-го порядка, протекающего в резонансном контуре фильтра-пробки $I_{\text{р.к.фп}n}$, А, вычисляют по формуле

$$I_{\text{р.к.фп}n} = \left| \frac{R_{\text{р2}} + 10^{-3} j\omega_n L_{\text{р2}}}{Z_{\text{фп}n}} \right| I_{\text{фп}n}. \quad (61)$$

Для двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с фильтром-пробкой действующее значение тока $n$-й гармоники, протекающего в фильтре-пробке, $I_{\text{фп}n}$, А:

$$I_{\text{фп}n} = I_{\text{апер}n}. \quad (62)$$

Для двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с фильтром-пробкой ток $n$-й гармоники $I_{\text{апер}n}$, А, вычисляют по формуле (33).

Действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения, приложенное к конденсаторам фильтра-пробки $U_{\text{фп}n}$, В, вычисляют по формуле

$$U_{\text{фп}n} = I_{\text{р.к.фп}n} \sqrt{R_{\text{фп}}^2 + \frac{10^{12}}{\omega_n C_{\text{фп}}}}. \quad (63)$$

Мощность, выделяемую всеми гармониками в фильтре-пробке $S_{\text{фп}}$, кВ·А, вычисляют по формуле

$$S_{\text{фп}} = \sqrt{\sum_n \left(S_{\text{фп}n}\right)^2}. \quad (64)$$

Мощность, выделяемую гармониками $n$-го порядка на конденсаторах фильтра-пробки $S_{\text{фп}n}$, кВ·А, вычисляют по формуле

$$S_{\text{фп}n} = 10^{-3} U_{\text{р.к.}n} I_{\text{р.к.фп}n}. \quad (65)$$

Действующее значение тока в резонансном контуре фильтра-пробки $I_{\text{р.к.фп}}$, А, вычисляют по формуле

$$I_{\text{р.к.фп}} = \sqrt{\sum_n (I_{\text{р.к.фп}n})^2}. \quad (66)$$

Допустимое значение тока гармоники $n$-го порядка $I_{\text{доп.р.к.фп}n}$, допустимое напряжение гармоники $n$-го порядка $U_{\text{доп.р.к.фп}n}$, допустимая мощность, выделяемая всеми гармониками в резонансном контуре фильтра-пробки $S_{\text{доп.р.к.фп}}$, определяется техническими характеристиками конденсатора выбранного типа.

Допустимое действующее значение тока гармоники $n$-го порядка, протекающего в резонансном контуре фильтра-пробки $I_{\text{доп.р.к.фп}n}$, А, вычисляют по формуле

$$I_{\text{доп.р.к.фп}n} = I^*_{\text{доп.к}n} C_{\text{фп}}. \quad (67)$$

Допустимое действующее значение напряжения гармоники $n$-го порядка, приложенное к резонансному контуру фильтра-пробки $U_{\text{доп.р.к.фп}n}$, В:

$$U_{\text{доп.р.к.фп}n} = U_{\text{доп.к}n}. \quad (68)$$

Допустимую мощность, выделяемую всеми гармониками в резонансном контуре фильтра-пробки, конденсаторов выбранного типа $S_{\text{доп.р.к.фп}}$, кВ·А, вычисляют по формуле

$$S_{\text{доп.р.к.фп}} = N_{C_{\text{фп}}} S_{\text{доп.к}}. \quad (69)$$

### 6.8 Расчет параметров предохранителя параллельной части

6.8.1 Для защиты конденсаторов сглаживающего устройства используют токоограничивающие предохранители класса 1 с цоколем в однополюсном исполнении с неизменным положением заменяемого элемента, с характеристиками, соответствующими ГОСТ 2213. Заменяемый элемент должен быть выполнен в виде одиночного патрона.

6.8.2 Номинальное напряжение предохранителя $U_{ном.п}$, В:

$$U_{ном.п} \geq U_{нр.п}, \quad (70)$$

где $U_{нр.п}$ — наибольшее рабочее напряжение в месте установки предохранителя, В. Принимают для предохранителей по ГОСТ 29322 $U_{нр.п}$ = 3600 В.

Номинальный ток предохранителя $I_{ном.п}$, А, вычисляют по формуле

$$I_{ном.п} = k_{пр} I_{ож.п}, \quad (71)$$

где $k_{пр}$ — коэффициент, учитывающий изменение номинального тока предохранителя. Принимают по ГОСТ 2213—79 (пункт 3.6.4) $k_{пр}$ от 1,3 до 2;

$I_{ож.п}$ — ожидаемое действующее значение наибольшего рабочего тока, протекающего в защищаемой цепи, А.

Для однозвенного апериодического сглаживающего устройства, второго звена двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства, второго звена двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с фильтром-пробкой ожидаемое действующее значение наибольшего рабочего тока, протекающего в защищаемой цепи, $I_{ож.п}$ , А:

$$I_{ож.п} = I_{апер}. \quad (72)$$

Для однозвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с резонансным контуром 100 Гц ожидаемое действующее значение наибольшего рабочего тока, протекающего в защищаемой цепи, $I_{ож.п}$, А, вычисляют по формуле

$$I_{ож.п} = I_{апер} + I_{р.к}. \quad (73)$$

Для первого звена двухзвенных сглаживающих устройств ожидаемое действующее значение наибольшего рабочего тока, протекающего в защищаемой цепи, $I_{ож.п}$, А, вычисляют по формуле

$$I_{ож.п} = \sum_{i=1}^{\nu} I_{р.к i}, \quad (74)$$

где $\nu$ — общее число резонансных контуров первого звена двухзвенного сглаживающего устройства;

$I_{р.к i}$ — действующее значение тока, протекающего в $i$-м резонансном контуре, А, вычисляемое по формуле (51).

Для двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с фильтром-пробкой ожидаемое действующее значение наибольшего рабочего тока, протекающего в защищаемой цепи $I_{ож.п}$, А:

$$I_{ож.п} = I_{р.к.фп}. \quad (75)$$

Номинальный ток заменяемого элемента $I_{ном.э}$, А:

$$I_{ном.э} = I_{ном.п}. \quad (76)$$

Номинальный ток основания $I_{ном.ос}$, А:

$$I_{ном.ос} \geq I_{ном.п}. \quad (77)$$

Номинальный ток патрона $I_{ном.пт}$, А:

$$I_{ном.пт} = I_{ном.э}. \quad (78)$$

Номинальный ток держателя $I_{ном.д}$, А:

$$I_{ном.д} \geq I_{ном.п}. \quad (79)$$

Номинальный ток отключения предохранителя $I_{ном.о}$, А:

$$I_{ном.о} \geq 50 I_{ном.э}. \quad (80)$$

6.8.3 Предохранители, предназначенные для защиты конденсаторов, должны выдерживать предельно допустимую перегрузку, для этого они проверяются по условию

$$I_{нб.о} \geq I_{а.нб}, \quad (81)$$

где $I_{нб.о}$ — наибольший ток отключения предохранителя, определяемый из время-токовой характеристики предельно допустимых перегрузок для времени 0,01 с, А;

$I_{а.нб}$ — наибольший аварийный ток, протекающий в защищаемой цепи, А.

Наибольший аварийный ток, протекающий в защищаемой цепи, $I_{а.нб}$, А, вычисляют по формуле

$$I_{а.нб} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\sqrt{3\left(R_а^2 + X_а^2\right)}}, \quad (82)$$

где $R_а$, $X_а$ — минимальные значения активного и реактивного сопротивлений цепи протекания аварийного тока, Ом.

Для однозвенного апериодического сглаживающего устройства и однозвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с резонансным контуром 100 Гц минимальные значения активного $R_а$ и реактивного $X_а$ сопротивлений цепи протекания аварийного тока, Ом, вычисляют по формуле

$$R_а = \left(\frac{P_{к.п}}{k_п S_{н.п}^2} + \frac{P_{к.т}}{k_т S_{н.т}^2}\right) U_2^2 + R_р, \quad (83)$$

$$X_а = X_{в(1)} + 0{,}1\pi L_р, \quad (84)$$

где $P_{к.п}$ и $P_{к.т}$ — мощность короткого замыкания, соответственно понижающего и преобразовательного трансформаторов, МВт;

$X_{в(1)}$ — результирующее индуктивное сопротивление цепи коммутации статического выпрямительного или выпрямительно-инверторного преобразователя для первой гармонической составляющей, Ом.

Для первого звена двухзвенных сглаживающих устройств и фильтра-пробки двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства минимальные значения активного $R_а$ и реактивного $X_а$ сопротивлений цепи протекания аварийного тока, Ом, вычисляют по формуле

$$R_а = \left(\frac{P_{к.п}}{k_п S_{н.п}^2} + \frac{P_{к.т}}{k_т S_{н.т}^2}\right) U_2^2 + R_{р1}, \quad (85)$$

$$X_а = X_{в(1)} + 0{,}1\pi L_р. \quad (86)$$

Для второго звена двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства минимальные значения активного $R_а$ и реактивного $X_а$ сопротивлений цепи протекания аварийного тока, Ом, вычисляют по формуле

$$R_а = \left(\frac{P_{к.п}}{k_п S_{н.п}^2} + \frac{P_{к.т}}{k_т S_{н.т}^2}\right) U_2^2 + \left(R_{р1} + R_{р2}\right). \quad (87)$$

$$X_а = X_{в(1)} + 0{,}1\pi(L_{р1} + L_{р2}). \quad (88)$$

Для второго звена двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с фильтром-пробкой минимальные значения активного $R_а$ и реактивного $X_а$ сопротивлений цепи протекания аварийного тока, Ом, вычисляют по формуле

$$R_а = \left(\frac{P_{к.п}}{k_п S_{н.п}^2} + \frac{P_{к.т}}{k_т S_{н.т}^2}\right) U_2^2 + \left(R_{р1} + \frac{R_{р2} R_{фп}}{R_{р2} + R_{фп}}\right), \quad (89)$$

$$X_а = X_{в(1)} + 0{,}1\pi\left(L_{р1} + \frac{L_{р2} L_{фп}}{L_{р2} + L_{фп}}\right). \quad (90)$$

6.8.4 Значения номинальных параметров предохранителя выбирают из числа стандартных значений, приведенных в ГОСТ 2213—79 (таблица 1).

## Приложение А
## (обязательное)

## Формы для представления результатов выбора схемы и основных параметров сглаживающего устройства

А.1 Формы для представления исходных данных для выбора схемы и основных параметров сглаживающего устройства представлены в таблицах А.1—А.8.

Таблица А.1 — Значения э. д. с. и действующие значения $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства (для интегральной вероятности 0,95)

| $n$ | $E_n$, В* | $U_{1n}$, В** | $n$ | $E_n$, В* | $U_{1n}$, В** |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | | | 22 | | |
| 4 | | | 24 | | |
| 6 | | | 26 | | |
| 8 | | | 28 | | |
| 10 | | | 30 | | |
| 12 | | | 32 | | |
| 14 | | | 34 | | |
| 16 | | | 36 | | |
| 18 | | | 38 | | |
| 20 | | | 40 | | |

* При получении данных путем непосредственных измерений графа не заполняется.

** При невозможности получения действующих значений $n$-й гармоники выпрямленного напряжения путем непосредственного измерения графа не заполняется.

Таблица А.2 — Коэффициенты гармонических составляющих первичного напряжения статического преобразователя и коэффициент несимметрии по обратной последовательности напряжения первичного напряжения статического преобразователя (для интегральной вероятности 0,95)*

| Показатели качества электрической энергии | Значение показателей качества электрической энергии |
|---|---|
| $K_{U5}$, % | |
| $K_{U7}$, % | |
| $K_{U11}$, % | |
| $K_{U13}$, % | |
| $K_{2U}$, % | |

Таблица А.3 — Параметры тяговой подстанции

| $S_{к.з}$, МВА | $S_{н.п}$, МВА | $S_{н.т}$, МВА | $u_{к.п}$, % | $u_{к.т}$, % | $P_{к.п}$, МВт | $P_{к.т}$, МВт | $\sum I_{ст.пр i}$, А | $k_п$, шт. | $k_т$, шт. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | |

* При невозможности получения коэффициентов гармонических составляющих первичного напряжения статического преобразователя и коэффициента несимметрии по обратной последовательности напряжения первичного напряжения статического преобразователя путем непосредственного измерения таблица не заполняется.

Таблица А.4 — Схемы статических выпрямительных и (или) выпрямительно-инверторных преобразователей для системы (железнодорожного) тягового электроснабжения

| На данной тяговой подстанции | На тяговых подстанциях участка |
|---|---|
| | |

Таблица А.5 — Типы быстродействующих выключателей (БВ) фидеров контактной сети и разрядных устройств сглаживающего реактора (УР)

| Типы БВ | Типы УР |
|---|---|
| | |

Таблица А.6 — Частота рельсовых цепей, типы и конструктивное исполнение линий связи на прилегающих межподстанционных зонах

| Частота рельсовых цепей, Гц | Типы линий проводной электросвязи |
|---|---|
| | |

Таблица А.7 — Вольтодобавочные устройства и блоки автоматического регулирования напряжения (при наличии)

| Вольтодобавочные устройства | Блоки автоматического регулирования напряжения |
|---|---|
| | |

Таблица А.8 — Схема сглаживающего устройства и его параметры для расчетного участка, находящегося в эксплуатации

| Схема | Первое звено | | | | Второе звено (при наличии) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $L_{р1}$, мГн | $L_i$, мГн | $C_{р.кi}$, мкФ | С, мкФ | $L_{р2}$, мГн | $L_{фп}$, мГн | $C_{фп}$, мкФ | С, мкФ |
| | | | | | | | | |

А.2 Формы для представления результатов выбора схемы и основных параметров сглаживающего устройства представлены в таблицах А.9—А.14.

Таблица А.9 — Результаты расчета коэффициента сглаживания *n*-й гармоники выпрямленного напряжения для выбранной схемы сглаживающего устройства при емкости апериодической части $C_i$ мкФ

| $f(n)$, Гц | $Z_{послn}$,Ом | $Z_{парn}(C_i)$, Ом | $K_n(C_i)$ |
|---|---|---|---|
| 100 | | | |
| …. | | | |
| 2000 | | | |

Таблица А.10 — Результаты расчета псофометрического напряжения на выходе тяговой подстанции (выходе сглаживающего устройства) для выбранной схемы сглаживающего устройства

| $C$, мкФ | $U_{2пс}$, В |
|---|---|
| $c_к$ | |
| …. | …. |
| 1000 | |

Таблица А.11 — Результаты выбора схемы и основных параметров апериодического сглаживающего устройства

| Показатели | | Результаты |
|---|---|---|
| Схема сглаживающего устройства | | |
| Параметры последовательной части | индуктивность $L_р$, мГн | |
| | активное сопротивление $R_р$, Ом | |

*Окончание таблицы А.11*

| Показатели | | Результаты |
|---|---|---|
| Параметры параллельной части | емкость апериодической части $C$, мкФ | |
| | число конденсаторов апериодической части $N_C$, шт. | |
| Псофометрическое напряжение на выходе $U_{2пс}$, В, не более | | |
| Действующее значение гармоники частотой 100 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | |
| Действующее значение гармоники частотой 400 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | |
| Действующее значение гармоники частотой 500 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | |
| Действующее значение гармоники частотой 600 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | |
| Действующее значение гармоники частотой 700 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | |
| Действующее значение гармоники частотой 800 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | |
| Действующее значение гармоники частотой 900 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | |

Таблица А.12 — Результаты выбора схемы и основных параметров однозвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с резонансным контуром 100 Гц

| Показатели | | | Результаты |
|---|---|---|---|
| Схема сглаживающего устройства | | | |
| Параметры последовательной части | | индуктивность $L_р$, мГн | |
| | | активное сопротивление $R_р$, Ом | |
| Параметры параллельной части | апериодическая часть | емкость С, мкФ | |
| | | число конденсаторов $N_C$, шт. | |
| | резонансный контур | емкость, $C_{р.к1}$, мкФ | |
| | | число конденсаторов $N_{C_{р.к1}}$, шт. | |
| | | индуктивность $L_1$, мГн | |
| Псофометрическое напряжение на выходе $U_{2пс}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 100 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 400 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 500 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 600 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 700 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 800 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 900 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |

Таблица А.13 — Результаты выбора схемы и основных параметров двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства с фильтром-пробкой

| Показатели | | Результаты |
|---|---|---|
| Схема сглаживающего устройства | | |
| Параметры последовательной части первого звена | индуктивность $L_{р1}$, мГн | |
| | активное сопротивление $R_{р1}$, Ом | |
| Параметры последовательной части второго звена | индуктивность $L_{р2}$, мГн | |
| | активное сопротивление $R_{р2}$, Ом | |

*Продолжение таблицы А.13*

| Показатели | | | Результаты |
|---|---|---|---|
| | | индуктивность $L_{фп}$, мГн | |
| | | емкость $C_{фп}$, мкФ | |
| | | число конденсаторов фильтра-пробки $N_{C_{фп}}$, шт. | |
| | | активное сопротивление $R_{фп}$, Ом | |
| Параметры параллельной части первого звена | резонансный контур 100 Гц | емкость $C_{р.к1}$, мкФ | |
| | | число конденсаторов $N_{C_{р.к1}}$, шт. | |
| | | индуктивность $L_1$, мГн | |
| | | активное сопротивление $R_1$, Ом | |
| | резонансный контур 200 Гц | емкость $C_{р.к2}$, мкФ | |
| | | число конденсаторов $N_{C_{р.к2}}$, шт. | |
| | | индуктивность $L_2$, мГн | |
| | | активное сопротивление $R_2$, Ом | |
| | резонансный контур 300 Гц | емкость $C_{р.к3}$, мкФ | |
| | | число конденсаторов $N_{C_{р.к3}}$,шт. | |
| | | индуктивность $L_3$, мГн | |
| | | активное сопротивление $R_3$, Ом | |
| | резонансный контур 400 Гц | емкость $C_{р.к4}$, мкФ | |
| | | число конденсаторов $N_{C_{р.к4}}$, шт. | |
| | | индуктивность $L_4$, мГн | |
| | | активное сопротивление $R_4$, Ом | |
| | резонансный контур 500 Гц | емкость $C_{р.к5}$, мкФ | |
| | | число конденсаторов $N_{C_{р.к5}}$, шт. | |
| | | индуктивность $L_5$, мГн | |
| Параметры параллельной части первого звена | резонансный контур 500 Гц | активное сопротивление $R_5$, Ом | |
| | резонансный контур 600 Гц | емкость $C_{р.к6}$, мкФ | |
| | | число конденсаторов $N_{C_{р.к6}}$, шт. | |
| | | индуктивность $L_6$, мГн | |
| | | активное сопротивление $R_6$, Ом | |
| Параметры параллельной части второго звена | | емкость апериодической части $C$, мкФ | |
| | | число конденсаторов апериодической части $N_C$, шт. | |
| Псофометрическое напряжение на выходе $U_{2пс}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 100 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 400 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 500 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |

*Окончание таблицы А.13*

| Показатели | Результаты |
|---|---|
| Действующее значение гармоники частотой 600 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | |
| Действующее значение гармоники частотой 700 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | |
| Действующее значение гармоники частотой 800 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | |
| Действующее значение гармоники частотой 900 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | |

Таблица А.14 — Результаты выбора схемы и основных параметров двухзвенного резонансно-апериодического сглаживающего устройства

| Показатели | | | Результаты |
|---|---|---|---|
| Схема сглаживающего устройства | | | |
| Параметры последовательной части первого звена | | индуктивность $L_{р1}$, мГн | |
| | | активное сопротивление $R_{р1}$, Ом | |
| Параметры последовательной части второго звена | | индуктивность $L_{р2}$, мГн | |
| | | активное сопротивление $R_{р2}$, Ом | |
| Параметры параллельной части первого звена | резонансный контур 100 Гц | емкость $C_{р.к1}$, мкФ | |
| | | число конденсаторов $N_{C_{р.к1}}$, шт. | |
| | | индуктивность $L_1$, мГн | |
| | | активное сопротивление $R_1$, Ом | |
| | резонансный контур 200 Гц | емкость $C_{р.к2}$, мкФ | |
| | | число конденсаторов $N_{C_{р.к2}}$, шт. | |
| | | индуктивность $L_2$, мГн | |
| | | активное сопротивление $R_2$, Ом | |
| | резонансный контур 300 Гц | емкость $C_{р.к3}$, мкФ | |
| | | число конденсаторов $N_{C_{р.к1}}$, шт. | |
| | | индуктивность $L_3$, мГн | |
| | | активное сопротивление $R_3$, Ом | |
| Параметры параллельной части второго звена | | емкость апериодической части $C$, мкФ | |
| | | число конденсаторов апериодической части $N_C$, шт. | |
| Псофометрическое напряжение на выходе $U_{2пс}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 100 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 400 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 500 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 600 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 700 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 800 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |
| Действующее значение гармоники частотой 900 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | | |

**Приложение Б**
**(справочное)**

## Пример выбора схемы и основных параметров сглаживающего устройства

### Б.1 Исходные данные для выбора схемы и основных параметров сглаживающего устройства

Вновь строящаяся тяговая подстанция А расположена между смежными подстанциями Б и В, получает питание по одним и тем же линиям электропередачи.

Результаты измерения показателей качества электрической энергии первичного напряжения статического преобразователя (коэффициент несимметрии по обратной последовательности напряжения $K_{2U}$ и коэффициенты гармонических составляющих напряжения $K_{Un}$) смежных подстанций Б и В приведены в таблице Б.1. Анализ полученных значений показателей качества электрической энергии и исходная информация о схемах статических выпрямительных и (или) выпрямительно-инверторных преобразователей для системы (железнодорожного) тягового электроснабжения на участке, указанных в таблице Б.2, позволяет выбрать в соответствии с таблицей 3, значения э.д.с. $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства. Результаты выбора приведены в таблице Б.3.

Таблица Б.1 — Коэффициенты гармонических составляющих первичного напряжения статического преобразователя и коэффициент несимметрии по обратной последовательности напряжения первичного напряжения статического преобразователя (для интегральной вероятности 0,95) смежных тяговых подстанций Б и В

| Показатели качества электрической энергии | Значение показателей качества электрической энергии | |
|---|---|---|
| | Тяговая подстанция Б | Тяговая подстанция В |
| $K_{U5}$, % | 0,30 | 0,31 |
| $K_{U7}$, % | 0,20 | 0,23 |
| $K_{U11}$, % | 1,50 | 1,60 |
| $K_{U13}$, % | 1,00 | 1,10 |
| $K_{2U}$, % | 0,8 | 1,0 |

Таблица Б.2 — Схемы статических выпрямительных и (или) выпрямительно-инверторных преобразователей для системы (железнодорожного) тягового электроснабжения

| На данной тяговой подстанции | На тяговых подстанциях участка |
|---|---|
| Эквивалентный двенадцатифазный статический выпрямительный преобразователь (последовательное соединение мостов) | Эквивалентные двенадцатифазные статические выпрямительные преобразователи |

Таблица Б.3 — Значения э. д. с. и действующие значения $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на входе сглаживающего устройства для тяговой подстанции А

| $n$ | $E_n$, В | $U_{1n}$, В | $n$ | $E_n$, В | $U_{1n}$, В |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 55 | 54,0 | 22 | 7 | 6,9 |
| 4 | 5 | 4,9 | 24 | 42 | 41,2 |
| 6 | 20 | 19,6 | 26 | 4 | 3,9 |
| 8 | 3 | 2,9 | 28 | 3 | 2,9 |
| 10 | 13 | 12,8 | 30 | 1 | 1,0 |
| 12 | 114 | 111,9 | 32 | 4 | 3,9 |
| 14 | 11 | 10,8 | 34 | 4 | 3,9 |
| 16 | 5 | 4,9 | 36 | 28 | 27,5 |
| 18 | 1 | 1,0 | 38 | 6 | 5,9 |
| 20 | 1 | 1,0 | 40 | 4 | 3,9 |

**Б.2 Определение схемы сглаживающего устройства**

На тяговой подстанции А планируется использовать эквивалентный двенадцатифазный статический выпрямительный преобразователь. На смежных межподстанционных зонах, в соответствии с исходными данными, представленными в таблице Б.4, используются кабельные и оптоволоконные линии связи. В соответствии с исходными данными, представленными в таблице Б.1, значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности напряжения $K_{2U}$ не превышают 2 %, а значения коэффициента гармонической составляющей напряжения $K_{Un}$ не превышают допустимые значения по ГОСТ 32144. Поэтому в соответствии с 6.3.5 выбирают схему однозвенного апериодического сглаживающего устройства.

Таблица Б.4 — Частота рельсовых цепей, типы и конструктивное исполнение линий связи на прилегающих межподстанционных зонах

| Частота рельсовых цепей, Гц | Типы линий связи |
|---|---|
| 50 | Кабельные, оптоволоконные |

**Б.3 Определение параметров сглаживающего реактора**

На тяговой подстанции А по исходным данным, приведенным в таблице Б.5, планируется использовать выключатели постоянного тока, которые пригодны к отключению тока в безиндуктивных цепях как минимум 30 кА. Поэтому в соответствии с 6.4.4 принимают индуктивность сглаживающего реактора 2 мГн.

Таблица Б.5 — Типы быстродействующих выключателей фидеров контактной сети и разрядных устройств сглаживающего реактора

| Типы БВ | Типы УР |
|---|---|
| ВАБ-206 | УР-3 |

Для выбора типа сглаживающего реактора проводим проверку по номинальному току реактора $I_р$, в соответствии с формулой (5), А.

$$6500 \geq 6300. \qquad (Б.1)$$

Условие (Б.1) выполняется, в результате чего определена индуктивность реактора $L_р$ = 2 мГн, номинальное значение сопротивления реактора постоянного тока, $R_р$ = 0,003 Ом.

Планируется использовать в последовательной части реактор с индуктивностью 2 мГн, поэтому в соответствии с 6.6.2 необходимо учесть результирующее индуктивное сопротивление цепи коммутации статического преобразователя $X_{вл}$ при выборе схем и параметров сглаживающих устройств.

Расчет результирующего индуктивного сопротивления цепи коммутации статического преобразователя выполняют по формуле (13) в соответствии с параметрами тяговой подстанции, приведенными в таблице Б.6.

$$X_{в2} = \left(\frac{1}{1000} + \frac{9,5 \cdot 1}{100 \cdot 2 \cdot 25} + \frac{7,5 \cdot 1}{100 \cdot 2 \cdot 11,4}\right) \cdot 2 \cdot 1,305^2 = 0,021 \text{ Ом}. \qquad (Б.2)$$

Таблица Б.6 — Параметры тяговой подстанции

| $S_{к.з}$, МВА | $S_{н.п}$, МВА | $S_{н.т}$, МВА | $U_{к.п}$, % | $U_{к.т}$, % | $P_{к.п}$, МВт | $P_{к.т}$, МВт | $\sum I_{ст.пр i}$, А | $k_п$, шт. | $k_т$, шт. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1000 | 25 | 11,4 | 9,5 | 7,5 | 0,0910 | 0,0715 | 6300 | 2 | 2 |

Для реактора индуктивностью 2 мГн для 2-й гармоники выпрямленного напряжения вычисляют по формуле (10).

$$U_{1n} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3}}{0,021 + 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3}} \cdot 55 = 54 \text{ В}. \qquad (Б.3)$$

Для гармоник выпрямленного напряжения от 4 до 40 включительно значение напряжения по формуле (10) вычисляют аналогично (Б.3).

**Б.4 Определение параметров последовательной части сглаживающего устройства**

Сопротивление последовательной части выбранной схемы с учетом допустимого отклонения значения индуктивности ±10 % по ГОСТ 32676 вычисляют по формуле (16).

$$Z_{посл2} = 0,003 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3} = 0,003 + 1,131j \text{ Ом}. \qquad (Б.4)$$

Результаты расчета сопротивления последовательной части для $n$-й гармоники выпрямленного напряжения приведены в таблице Б.7.

Таблица Б.7 — Результаты расчета коэффициента сглаживания *n*-й гармоники выпрямленного напряжения для выбранной схемы сглаживающего устройства при емкости апериодической части 150 мкФ

| *f*, Гц | $Z_{послп}$, Ом | $Z_{парл}(150)$, Ом | $K_n(150)$ |
|---|---|---|---|
| 100 | 0,003 + 1,131*j* | 0,2 – 10,61*j* | 0,9 |
| 200 | 0,003 + 2,262*j* | 0,2 – 5,31*j* | 0,6 |
| 300 | 0,003 + 3,393*j* | 0,2 – 3,54*j* | 0,1 |
| 400 | 0,003 + 4,524*j* | 0,2 – 2,65*j* | 0,7 |
| 500 | 0,003 + 5,655*j* | 0,2 – 2,12*j* | 1,7 |
| 600 | 0,003 + 6,786*j* | 0,2 – 1,77*j* | 2,8 |
| 700 | 0,003 + 7,917*j* | 0,2 – 1,52*j* | 4,2 |
| 800 | 0,003 + 9,048*j* | 0,2 – 1,33*j* | 5,8 |
| 900 | 0,003 + 10,179*j* | 0,2 – 1,18*j* | 7,5 |
| 1000 | 0,003 + 11,31*j* | 0,2 – 1,06*j* | 9,5 |
| 1100 | 0,003 + 12,441*j* | 0,2 – 0,96*j* | 11,7 |
| 1200 | 0,003 + 13,572*j* | 0,2 – 0,88*j* | 14,0 |
| 1300 | 0,003 + 14,703*j* | 0,2 – 0,82*j* | 16,5 |
| 1400 | 0,003 + 15,834*j* | 0,2 – 0,76*j* | 19,2 |
| 1500 | 0,003 + 16,965*j* | 0,2 – 0,71*j* | 22,1 |
| 1600 | 0,003 + 18,096*j* | 0,2 – 0,66*j* | 25,2 |
| 1700 | 0,003 + 19,227*j* | 0,2 – 0,62*j* | 28,4 |
| 1800 | 0,003 + 20,358*j* | 0,2 – 0,59*j* | 31,8 |
| 1900 | 0,003 + 21,488*j* | 0,2 – 0,56*j* | 35,3 |
| 2000 | 0,003 + 22,619*j* | 0,2 – 0,53*j* | 39,0 |

Для использования в сглаживающем устройстве выбираем фильтровой конденсатор с допустимым отклонением емкости в диапазоне частот от 100 до 2000 Гц $k_c$ = 1,15.

Для предварительного выбора типа конденсатора проводится проверка по номинальному напряжению конденсатора по формуле (6), В.

$$4000 \geq 3600. \qquad (Б.5)$$

Условие (Б.2) выполняется, выбранный тип конденсатора с номинальными параметрами, указанными в таблице Б.8, принимаем к расчетам для определения основных параметров параллельной части.

Таблица Б.8 — Основные параметры конденсатора, планируемого к установке

| Номинальная емкость $c_к$, мкФ | Отношение допустимого значения тока гармоники *n*-го порядка к значению емкости конденсатора $I_{доп.кл}$, А/мкФ, не более | Допустимое значение мощности $S_{доп.к}$, кВ·А, не более |
|---|---|---|
| 150 | Не нормируется | 100 |

### Б.5 Определение параметров апериодической части сглаживающего устройства

Для обеспечения электромагнитной совместимости сглаживающее устройство тяговой подстанции А в соответствии с типом автоблокировки и линий проводной электросвязи на прилегающих межподстанционных зонах, указанных в таблице Б.4, должно удовлетворять следующим требованиям, указанным в ГОСТ 34062—2017 (пункт 4.6.2):

- действующее значение псофометрического напряжения на выходе сглаживающего устройства должно быть не более 20 В (30 В — при интегральной вероятности 0,95);
- действующее значение гармоники частотой 100 Гц в выпрямленном напряжении при рельсовых цепях частотой 50 Гц должно быть не более 100 В.

Для определения емкости и количества конденсаторов в апериодической части рассчитываются следующие зависимости для выбранной схемы сглаживающего устройства с выбранными параметрами последовательной части:

- при кабельных и оптоволоконных линиях железнодорожной электросвязи на прилегающих межподстанционных зонах вычисляют зависимость псофометрического напряжения на выходе сглаживающего устройства от емкости апериодической части по формуле (3);
- при кодовой автоблокировке с рельсовыми цепями частотой 50 Гц на прилегающих межподстанционных зонах вычисляют зависимость напряжения второй гармоники выпрямленного напряжения на выходе сглаживающего устройства от емкости апериодической части по формуле (4).

Сопротивление апериодической части выбранной схемы для 2-й гармоники выпрямленного напряжения при емкости апериодической части С = 150 мкФ вычисляют по формуле (17).

$$Z_{\text{пар2}} = 0,2 - \frac{j}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2 \cdot 150 \cdot 10^{-6}} = 0,2 - 10,61j \text{ Ом}. \quad (\text{Б.6})$$

Результаты расчета сопротивления параллельной части для *n*-й гармоники выпрямленного напряжения приведены в таблице Б.7. Для емкостей апериодической части *С* = 160 мкФ и от 170 до 1000 мкФ, с шагом 10 мкФ, расчет выполняют аналогично.

Значение коэффициента сглаживания 2-й гармоники выпрямленного напряжения для выбранной схемы сглаживающего устройства при емкости апериодической части 150 мкФ вычисляют по формуле (1).

$$K_2 = \left| 1 + \frac{0,003 + 1,131j}{0,2 - 10,61j} \right| = 0,9. \quad (\text{Б.7})$$

Значение псофометрического напряжения на выходе сглаживающего устройства для выбранной схемы сглаживающего устройства вычисляют при емкости апериодической части $C = c_к$ = 150 мкФ по формуле (3).

$$U_{2\text{пс}} = \sqrt{\begin{aligned} &\left(\frac{54 \cdot 0,0089}{0,9}\right)^2 + \left(\frac{4,9 \cdot 0,0891}{0,6}\right)^2 + \left(\frac{19,6 \cdot 0,295}{0,1}\right)^2 + \left(\frac{2,9 \cdot 0,484}{0,7}\right)^2 + \left(\frac{12,8 \cdot 0,661}{1,7}\right)^2 + \\ &+ \left(\frac{111,9 \cdot 0,794}{2,8}\right)^2 + \left(\frac{10,8 \cdot 0,902}{4,2}\right)^2 + \left(\frac{4,9 \cdot 1,000}{5,8}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 1,072}{7,5}\right)^2 + \left(\frac{1,0 \cdot 1,122}{9,5}\right)^2 + \\ &+ \left(\frac{6,9 \cdot 1,072}{11,7}\right)^2 + \left(\frac{41,2 \cdot 1,000}{14,0}\right)^2 + \left(\frac{3,9 \cdot 0,955}{16,5}\right)^2 + \left(\frac{2,9 \cdot 0,905}{19,2}\right)^2 + \left(\frac{1,0 \cdot 0,861}{22,1}\right)^2 + \\ &+ \left(\frac{3,9 \cdot 0,824}{25,2}\right)^2 + \left(\frac{3,9 \cdot 0,791}{28,4}\right)^2 + \left(\frac{27,5 \cdot 0,760}{31,8}\right)^2 + \left(\frac{5,9 \cdot 0,733}{35,3}\right)^2 + \left(\frac{3,9 \cdot 0,709}{39,0}\right)^2 \end{aligned}} = 88,5 \text{ В}. \quad (\text{Б.8})$$

Значение напряжения второй гармоники выпрямленного напряжения на выходе сглаживающего устройства для выбранной схемы сглаживающего устройства вычисляют при емкости апериодической части $C = c_к$ = 150 мкФ по формуле (4).

$$U_{2n} = \frac{54}{0,9} = 60 \text{ В}. \quad (\text{Б.9})$$

Результаты расчета значения напряжения второй гармоники выпрямленного напряжения на выходе сглаживающего устройства приведены в таблице Б.9. Для емкостей апериодической части *С* = 160 мкФ и от 170 до 1000 мкФ, с шагом 10 мкФ расчет выполняют аналогично.

Таблица Б.9 — Результаты расчета псофометрического напряжения на выходе тяговой подстанции (выходе сглаживающего устройства) для выбранной схемы сглаживающего устройства

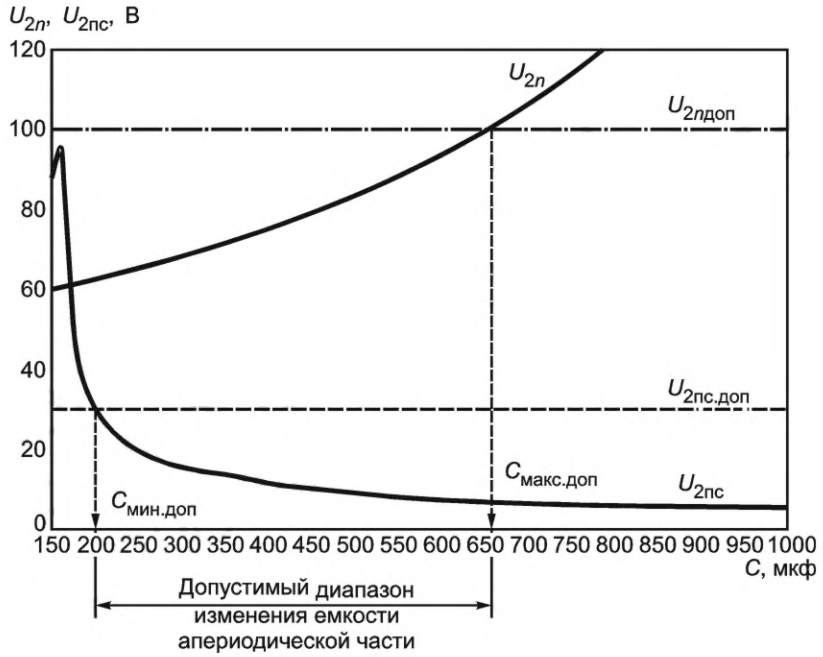
| *С*, мкФ | $U_{2\text{пс}}$, В | $U_{2n}$, В |
|---|---|---|
| 150 | 88,5 | 60 |
| …. | …. | …. |
| 1000 | 5,0 | 172 |

Результаты расчета по (Б.8) и (Б.9) представляют в виде рисунка Б.1.

По полученным зависимостям вычисляют диапазон изменения емкости апериодической части от минимального значения $C_{\text{мин.доп}}$ до максимального $C_{\text{макс.доп}}$.

$$C_{\text{мин.доп}} = 200 \text{ мкФ}, \quad (\text{Б.10})$$

$$C_{\text{макс.доп}} = 660 \text{ мкФ}. \quad (\text{Б.11})$$




$U_{2n}$ — действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на выходе сглаживающего устройства;
$U_{2пс}$ — псофометрическое напряжение на выходе сглаживающего устройства; $C$ — емкость резонансных контуров;
$C_{мин.доп}$, $C_{макс.доп}$ — минимально допустимое и максимально допустимое значения изменения емкости апериодической части;
$U_{2nдоп}$ — допустимое действующее значение $n$-й гармоники выпрямленного напряжения на выходе сглаживающего устройства;
$U_{2пс.доп}$ — допустимое псофометрическое напряжение на выходе сглаживающего устройства

Рисунок Б.1 — Результаты расчета зависимостей псофометрического напряжения $U_{2пс} = f(C)$ и напряжения второй гармоники напряжения $U_{2n} = f(C)$ на выходе сглаживающего устройства

Предварительное значение емкости апериодической части с учетом отклонения емкости конденсаторов вычисляют по формуле (25).

$$C' = 1{,}15 \cdot 200 = 230 \text{ мкФ}. \quad (Б.12)$$

Необходимое число конденсаторов апериодической части вычисляют по формуле (26).

$$N'_C = 230/150 = 2. \quad (Б.13)$$

Для проверки соответствия рассчитанного значения емкости допустимому диапазону изменения емкости апериодической части должно выполняться неравенство (27).

$$2 \cdot 150 < 660 \text{ — неравенство выполняется.} \quad (Б.14)$$

Значение емкости конденсаторов апериодической части, учитывающее отклонение параметров параллельной и последовательной части сглаживающего устройства в пределах допустимых значений и обеспечивающее выполнение требований 4.7 необходимо принять $C$ = 300 мкФ.

По условию исключения опасных резонансных явлений между элементами сглаживающего устройства значение $C$ = 300 мкФ должно быть проверено на принадлежность к недопустимым диапазонам емкости апериодической части, указанным в таблице 8. Значение $C$ = 300 мкФ принадлежит к недопустимому диапазону емкости апериодической части, поэтому необходимо увеличить значение до $C$ = 450 мкФ и число конденсаторов $N_C$ = 3.

Значение емкости конденсаторов апериодической части, учитывающее отклонение параметров параллельной и последовательной части сглаживающего устройства в пределах допустимых значений, обеспечивающее выполнение требований 4.7 и исключение опасных резонансных явлений между элементами сглаживающего устройства, необходимо принять $C$ = 450 мкФ.

При выполнении апериодической части из конденсаторов необходимо выполнить проверку по мощности выделяемой гармониками в апериодической части.

Для однозвенного апериодического сглаживающего устройства действующее значение тока 2-й гармоники, протекающее через апериодическую часть, А, вычисляют по формуле (3).

$$I_{апер2} = \frac{54}{\sqrt{(0{,}003+0{,}2)^2 + \left(10^{-3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2 \cdot 1{,}8 - \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2 \cdot 450}\right)^2}} = 32{,}8 \text{ А}. \quad (Б.15)$$

Мощность, выделяемую гармониками 2-го порядка в апериодической части, вычисляют по формуле (36), кВ·А.

$$S_{\text{апер}n} = 10^{-3} \cdot 79 \cdot 32{,}8 = 2{,}59 \text{ кВ·А}. \quad (Б.16)$$

Действующие значения токов для остальных гармоник $n$-го порядка вычисляют аналогично.

Мощность, выделяемую всеми гармониками в апериодической части, вычисляют по формуле (35).

$$S_{\text{апер}} = \sqrt{\begin{matrix}(2{,}59)^2 + (0{,}502)^2 + (0{,}05)^2 + (0{,}000)^2 + (0{,}001)^2 + (0{,}020)^2 + (0{,}000)^2 + \\ + (0{,}000)^2 + (0{,}000)^2 + (0{,}000)^2 + (0{,}000)^2 + (0{,}000)^2 + (0{,}000)^2 + = \\ + (0{,}000)^2 + (0{,}000)^2 + (0{,}000)^2 + (0{,}000)^2 + (0{,}000)^2 + (0{,}000)^2\end{matrix}} = 2{,}64 \text{ кВ·А}. \quad (Б.17)$$

Допустимую мощность, выделяемую всеми гармониками в апериодической части, конденсаторов, выбранного типа, вычисляют по формуле (40).

$$S_{\text{доп.апер}} = 3 \cdot 100 = 300 \text{ кВ·А}. \quad (Б.18)$$

Проверка по мощности, выделяемой гармониками в апериодической части, заключается в проверке выполнения условия (31).

$$2{,}64 < 300 \text{ — неравенство выполняется.} \quad (Б.19)$$

### Б.6 Определение параметров предохранителя сглаживающего устройства

Для защиты конденсаторов сглаживающего устройства используют токоограничивающие предохранители класса 1 с цоколем в однополюсном исполнении с неизменным положением заменяемого элемента, с характеристиками соответствующими ГОСТ 2213. Заменяемый элемент выполнен в виде одиночного патрона.

Номинальное напряжение предохранителя $U_{\text{ном.п}}$, В, вычисляют по выражению (70).

$$4000 \geq 3600. \quad (Б.20)$$

Условие выполняется, поэтому $U_{\text{ном.п}} = 4000$ В.

Действующее значение тока в апериодической части вычисляют по формуле (37).

$$I_{\text{апер}} = \sqrt{\begin{matrix}(32{,}8)^2 + (30{,}7)^2 + (4{,}7)^2 + (0{,}2)^2 + (0{,}4)^2 + (1{,}8)^2 + (0{,}1)^2 + (0{,}0)^2 + (0{,}0)^2 + (0{,}0)^2 + \\ + (0{,}0)^2 + (0{,}1)^2 + (0{,}0)^2 + (0{,}0)^2 + (0{,}0)^2 + (0{,}0)^2 + (0{,}0)^2 + (0{,}0)^2 + (0{,}0)^2 + (0{,}0)^2\end{matrix}} = 45{,}2 \text{ А}. \quad (Б.21)$$

Для однозвенного апериодического сглаживающего устройства ожидаемое действующее значение наибольшего рабочего тока, протекающего в защищаемой цепи, вычисляют по формуле (72).

$$I_{\text{ож.п}} = 45{,}2 \text{ А}. \quad (Б.22)$$

Номинальный ток предохранителя, $I_{\text{ном.п}}$, А, вычисляют по формуле (71).

$$I_{\text{ном.п}} = 1{,}5 \cdot 45{,}2 = 67{,}8 \text{ А}. \quad (Б.23)$$

Выбирают предохранитель с ближайшим значением номинального тока предохранителя — $I_{\text{ном.п}} = 80$ А.

Номинальный ток заменяемого элемента $I_{\text{ном.э}}$, вычисляют по формуле (76).

$$I_{\text{ном.э}} = 80 \text{ А}. \quad (Б.24)$$

Номинальный ток основания $I_{\text{ном.ос}}$ вычисляют по выражению (77), принимают ближайшее значение по ГОСТ 2213.

$$I_{\text{ном.ос}} = 100 \text{ А}. \quad (Б.25)$$

Номинальный ток патрона $I_{\text{ном.пт}}$ вычисляют по формуле (78), принимают ближайшее значение по ГОСТ 2213.

$$I_{\text{ном.пт}} = 80 \text{ А}. \quad (Б.26)$$

Номинальный ток держателя $I_{\text{ном.д}}$ вычисляют по формуле (79), принимают ближайшее значение по ГОСТ 2213.

$$I_{\text{ном.д}} = 100 \text{ А}. \quad (Б.27)$$

Номинальный ток отключения предохранителя $I_{\text{ном.о}}$ вычисляют по формуле (80).

$$I_{\text{ном.о}} \geq 80 \cdot 50 = 4000 \text{ А}. \quad (Б.28)$$

Принимаем ближайшее значение по ГОСТ 2213 $I_{\text{ном.о}} = 4000$ А.

Для однозвенного апериодического сглаживающего устройства минимальные значения активного и реактивного сопротивлений цепи протекания аварийного тока вычисляют по формулам (83) и (84), Ом.

$$R_{\text{а}} = \left(\frac{0{,}091}{2 \cdot 25^2} + \frac{0{,}0715}{2 \cdot 11{,}4^2}\right) 1{,}305^2 + 0{,}003 = 0{,}0036 \text{ Ом}. \quad (Б.29)$$

$$X_a = \left(\frac{1}{1000} + \frac{9,5 \cdot 1}{100 \cdot 2 \cdot 25} + \frac{7,5 \cdot 1}{100 \cdot 2 \cdot 11,4}\right) \cdot 1 \cdot 1,305^2 + 0,1 \cdot \pi \cdot 1,8 = 0,58 \text{ Ом}. \quad (Б.30)$$

Наибольший аварийный ток, протекающий в защищаемой цепи, вычисляют по формуле (82).

$$I_{а.нб} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 1305}{\sqrt{3\left(0,0036^2 + 0,58^2\right)}} = 3674 \text{ А}. \quad (Б.31)$$

Предохранители, предназначенные для защиты конденсаторов, должны выдерживать предельно допустимую перегрузку, для этого их проверяют по условию (81), А.

$$4000 \geq 3674 \text{ выполняется}. \quad (Б.32)$$

### Б.7 Результаты выбора схемы и основных параметров сглаживающего устройства

Результаты выбора схемы и основных параметров сглаживающего устройства для вновь строящейся тяговой подстанции приведены в таблице Б.10.

Таблица Б.10 — Результаты выбора схемы и основных параметров сглаживающего устройства

| Показатели | | Результаты |
|---|---|---|
| Схема сглаживающего устройства | | Однозвенное апериодическое сглаживающее устройство |
| Параметры последовательной части | индуктивность $L_р$, мГн | 2 |
| | активное сопротивление $R_р$, Ом | 0,003 |
| Параметры параллельной части | емкость апериодической части $C$, мкФ | 450 |
| | число конденсаторов апериодической части $N_C$, шт. | 3 |
| Псофометрическое напряжение на выходе $U_{2пс}$, В, не более | | 30 |
| Действующее значение гармоники частотой 100 Гц на выходе $U_{2n}$, В, не более | | 100 |

## Приложение В
## (обязательное)

## Методика технико-экономического сравнения вариантов оснащения тяговой подстанции сглаживающими устройствами различных типов или в различном сочетании параметров

В.1 Для определения экономических преимуществ одного варианта оснащения тяговой подстанции сглаживающим устройством различных типов по сравнению с другим используют показатели сравнительной экономической эффективности, для чего достаточно учесть только изменяющиеся по вариантам части затрат и результата. Основные показатели сравнительной эффективности:

- сравнительная величина интегрального эффекта;
- приведенные затраты;
- срок окупаемости дополнительных инвестиций;
- коэффициент сравнительной эффективности.

В.2 Сравнительная величина интегрального эффекта характеризует дополнительную величину интегрального эффекта, полученную от внедрения одного варианта оснащения тяговой подстанции сглаживающим устройством по сравнению с другим, тыс. руб.

$$\Delta Э_{инт} = \sum_{t=0}^{T_р} \Delta P_t \cdot \eta_t - \sum_{t=0}^{T_р} \Delta З_t \cdot \eta_t - \sum_{t=0}^{T_р} \Delta K_t \cdot \eta_t, \quad (В.1)$$

где $T_р$ — расчетный период, лет;

$t$ — текущий расчетный шаг;

$\Delta P_t$ — разница результатов по сравниваемым вариантам оснащения тяговой подстанции сглаживающим устройством, тыс. руб.;

$\eta_t$ — коэффициент дисконтирования;

$\Delta З_t$ — разница текущих затрат по сравниваемым вариантам оснащения тяговой подстанции сглаживающим устройством, тыс. руб.;

$\Delta K_t$ — разница инвестиционных затрат (капитальных вложений) по сравниваемым вариантам оснащения тяговой подстанции сглаживающим устройством, тыс. руб.

Результатом реализации любого варианта оснащения тяговой подстанции сглаживающим устройством выступает увеличение пропускной (провозной) способности расчетного участка и вызванный этим рост дохода или прибыли железной дороги.

В состав капитальных вложений входят затраты на осуществление технико-экономических исследований, разработку технико-экономического обоснования, затраты на выполнение научно-исследовательских работ, разработку проектно-сметной документации, выполнение проектно-изыскательских работ, затраты на строительно-монтажные работы и др. мероприятия, связанные с оснащением тяговой подстанции сглаживающими устройствами.

Коэффициент дисконтирования применяют для приведения разновременных (относящихся к разным шагам расчета) денежных потоков к одному моменту времени, обычно начальному году реализации инвестиционного проекта

$$\eta_t = \frac{1}{(1+d)^t}, \quad (В.2)$$

где $d$ — норма дисконта, выражаемая в долях единицы или в процентах в год.

Критерием выбора варианта оснащения тяговой подстанции сглаживающим устройством служит максимум сравнительного интегрального эффекта.

В.3 Приведенные затраты представляют собой частный случай сравнительного интегрального эффекта. Их определяют, если отличие сравниваемых вариантов оснащения тяговой подстанции сглаживающим устройством друг от друга состоит только в размерах потребных инвестиционных вложений и текущих затратах. Наиболее эффективное решение соответствует минимуму приведенных затрат. Приведенные затраты, тыс. руб., рассчитывают по формуле

$$З_{прив} = \sum_{t=0}^{T_р} З_t \cdot \eta_t + \sum_{t=0}^{T_р} K_t \cdot \eta_t, \quad (В.3)$$

где $З_t$ — текущие затраты, возникающие в ходе реализации варианта тяговой подстанции сглаживающим устройством, тыс. руб.;

$K_t$ — инвестиционные затраты для реализации варианта оснащения тяговой подстанции сглаживающим устройством, тыс. руб.

В.4 Срок окупаемости дополнительных инвестиций представляет собой временной период, за который дополнительные инвестиционные затраты на более капиталоемкий вариант будут возмещены благодаря приросту экономических результатов, обусловленному их реализацией. В общем случае срок окупаемости дополнительных инвестиций вычисляют по формуле

$$\sum_{t=0}^{T_{ок}^{доп}} \Delta Э_{pt} \cdot \eta_t = \sum_{t=0}^{T_{ок}^{доп}} \Delta K_t \cdot \eta_t, \quad (В.4)$$

где $\Delta Э_{pt}$ — прирост экономических результатов от реализации более капиталоемкого варианта оснащения тяговой подстанции сглаживающим устройством, тыс. руб.;

$\Delta K_t$ — дополнительные инвестиционные вложения для реализации варианта оснащения тяговой подстанции сглаживающим устройством, тыс. руб.;

$T_{ок}^{доп}$ — срок окупаемости дополнительных инвестиций, лет.

Если отличие экономических результатов по сравниваемым вариантам оснащения тяговой подстанции сглаживающим устройством состоит только в величине текущих затрат, то срок окупаемости дополнительных инвестиций вычисляют по формуле

$$\sum_{t=0}^{T_{ок}^{доп}} \Delta З_t \cdot \eta_t = \sum_{t=0}^{T_{ок}^{доп}} \Delta K_t \cdot \eta_t. \quad (В.5)$$

Срок окупаемости дополнительных инвестиций для сравниваемых вариантов оснащения тяговой подстанции сглаживающим устройством при одноэтапных инвестиционных вложениях и отсутствии необходимости в дисконтировании денежных потоков (небольшой расчетный период), лет, вычисляют по формуле

$$T_{ок}^{доп} = \frac{\Delta K}{\Delta З}. \quad (В.6)$$

Для выбора варианта оснащения тяговой подстанции сглаживающим устройством значение срока окупаемости дополнительных вложений сравнивают с его нормативным значением. Капиталоемкий вариант принимают к реализации, если срок окупаемости дополнительных инвестиций ниже своего нормативного значения, в противном случае выбирают более ресурсоемкий вариант.

В.5 Коэффициент эффективности дополнительных инвестиций (коэффициент сравнительной эффективности инвестиций) — величина, обратная сроку окупаемости дополнительных инвестиций

$$Э_{ср} = \frac{\Delta Э_р}{\Delta K}. \quad (В.7)$$

Данный коэффициент показывает эффект в виде повышения годового экономического результата при увеличении инвестиций на единицу.

Расчетное значение коэффициента сравнительной эффективности инвестиций сравнивают с нормативным значением. При его превышении нормативной величины реализуют инвестиционноемкий вариант оснащения тяговой подстанции сглаживающим устройством, в противном случае — ресурсоемкий.

## Приложение Г
## (справочное)

## Методика оценки потерь электроэнергии в сглаживающем устройстве

Г.1 Потери электроэнергии в сглаживающем устройстве определяются потерями в сглаживающем реакторе.

Г.2 Потери в сглаживающем реакторе тяговой подстанции за год, Вт · ч:

$$\Delta W = \sum_{i=1}^{k_m} \Delta W_i, \qquad (Г.1)$$

где $\Delta W_i$ — потери в сглаживающем реакторе при протекании выходного тока $i$-го статического преобразователя, Вт·ч.

Г.3 Потери за год в сглаживающем реакторе при протекании выходного тока $i$-го статического преобразователя для однозвенных сглаживающих устройств $\Delta W_i$, Вт · ч, вычисляют по формуле

$$\Delta W_i = k_{эi}^2 I_{срi}^2 R_р t_i, \qquad (Г.2)$$

где $k_{эi}$ — коэффициент эффективности тока $i$-го статического преобразователя. Допустимый диапазон коэффициента эффективности тока нагрузки $k_{эi}$ от 1,0 до 1,15;

$I_{срi}$ — среднегодовой выходной ток $i$-го статического преобразователя, А;

$R_р$ — активное сопротивление однозвенного сглаживающего устройства, Ом;

$t_i$ — время работы $i$-го статического преобразователя за год, ч.

Г.4 Потери в сглаживающем реакторе за год для двухзвенных сглаживающих устройств $\Delta W_i$, Вт · ч, вычисляют по формуле

$$\Delta W_i = k_{эi}^2 I_{срi}^2 (R_{р1} + R_{р2}) t_i. \qquad (Г.3)$$

Г.5 Среднегодовой выходной ток $i$-го статического преобразователя $I_{срi}$, А, вычисляют по формуле

$$I_{срi} = \frac{W_{тi}}{U_{ном} t_i}, \qquad (Г.4)$$

где $W_{тi}$ — энергия, расходуемая $i$-м статическим преобразователем тяговой подстанции на тягу поездов в течение года, Вт·ч;

$U_{ном}$ — номинальное напряжение постоянного тока тяговой подстанции, принимается равным 3300 В.

УДК 621.331:006.354 ОКС 29.180

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, тяговая подстанция постоянного тока, сглаживающие устройства, качество электрической энергии, токи высших гармоник, резонансный контур

Редактор *Л.В. Коретникова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *М.В. Бучная*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 14.09.2022. Подписано в печать 22.09.2022. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 5,58. Уч.-изд. л. 5,05.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «РСТ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru