

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

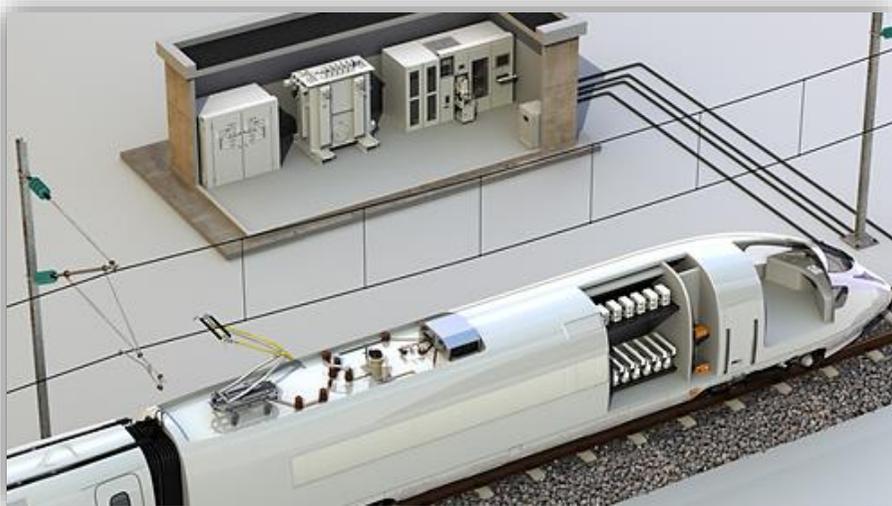
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

Кафедра «Электротехника»

В. А. ПАЦКЕВИЧ, М. В. НАФТОЛЬСКИЙ, Ю. А. КОРСУН

РАСЧЕТ СИЛОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Пособие



Гомель 2022

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Электротехника»

В. А. ПАЦКЕВИЧ, М. В. НАФТОЛЬСКИЙ, Ю. А. КОРСУН

РАСЧЕТ СИЛОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Гомель 2022

УДК 621. 314. 6.001.24 (075.8)

ББК 31. 264. 5

П21

Рецензенты: заведующий кафедрой «Электроснабжение», канд. тех. наук А. О. Добродей (ГГТУ им. П.О. Сухого); доцент кафедры «Электроснабжение», канд. тех. наук, доцент Т. В. Алфёрова (ГГТУ им. П.О. Сухого)

Пацкевич, В. А.

П21 Расчет силового выпрямителя: пособие для выполнения расчетно-графической работы по дисциплине «Электронная техника и преобразователи» / В. А. Пацкевич, М. В. Нафтольский, Ю. А. Корсун; М-во транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2022 – 38 с.

ISBN ...

Пособие предназначено для оказания помощи студентам при самостоятельной подготовке и выполнении расчетно-графической работы. Содержатся методические рекомендации по расчету выпрямителя тяговой подстанции электрифицированного транспорта. Предназначено для студентов специальности 1-37 02 01 «Тяговый состав железнодорожного транспорта», а также может быть полезна студентам электроэнергетических специальностей.

УДК 621. 314. 6.001.24 (075.8)

ББК 31. 264. 5

ISBN ...

© Пацкевич В. А., Нафтольский М. В., Корсун, Ю. А., 2022
© Оформление. УО «БелГУТ», 2022

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большая часть электроэнергии вырабатывается, передается и потребляется в виде переменного трехфазного тока. На его долю приходится более 75-80 % всей производимой электроэнергии. Однако есть отрасли народного хозяйства, для которых постоянный ток имеет существенное значение. Одна из таких отраслей – электрифицированный транспорт, использующий постоянный ток для работы тяговых двигателей локомотивов.

Получается постоянный ток из переменного с помощью регулируемых или нерегулируемых выпрямителей, основными элементами которых в настоящее время являются полупроводниковые диоды и тиристоры. На электрифицированном транспорте с питанием подвижного состава от контактной сети постоянного тока применяют мощные выпрямительные агрегаты, устанавливаемые на тяговых подстанциях. В состав таких агрегатов входят: силовой (вентильный) трансформатор, выпрямитель, сглаживающий фильтр, коммутационная и защитная аппаратура.

Вентильный трансформатор служит для изменения, подводимого к выпрямителю напряжения и для преобразования числа фаз на вторичной стороне.

Выпрямитель преобразует переменный ток в постоянный, точнее, пульсирующий с той или иной частотой, но имеющей одно направление.

Так как пульсация выпрямленного напряжения является нежелательным явлением, то на выходе выпрямителя включают сглаживающий фильтр, состоящий из катушек индуктивности и конденсаторов. С помощью фильтра ослабляются гармоники в кривой выпрямленного напряжения и снижается мешающее действие контактного провода на линии связи и автоблокировки.

Для эксплуатации выпрямительных агрегатов или их модернизации необходимы специалисты с глубокими знаниями в области теории силовых схем, методов построения систем управления и регулирования, физики полупроводниковых приборов. Специалисты такого профиля должны понимать принцип работы преобразовательных агрегатов, иметь представление об их возможностях. В некоторых случаях им приходится рассчитывать и собирать схемы выпрямителей.

Для закрепления теоретических знаний по дисциплине "Электронная техника и преобразователи" учебным планом предусмотрена расчетно-графическая работа, в ходе которой студенты проектируют выпрямитель для тяговой подстанции электрифицированного транспорта.

Данное пособие содержит рекомендации по проектированию мощных полупроводниковых выпрямителей в объеме, предусмотренном учебной программой. Предназначено для студентов электроэнергетических и электромеханических специальностей.

1 ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Выпрямителями называются устройства, превращающие переменный ток в пульсирующий одного направления. На практике они используются в виде выпрямительных агрегатов, состоящих из вентиляного трансформатора, выпрямителя, сглаживающего фильтра, защитной и коммутационной аппаратуры [1, 2, 5, 6].

Силовые выпрямители можно классифицировать по следующим основным признакам:

по выходной мощности – установки малой (единицы киловатт), средней (десятки киловатт) и большой мощности;

по числу фаз источника питания – выпрямители однофазного и трехфазного тока;

по возможности регулирования напряжения на нагрузке – неуправляемые и управляемые. В первом случае, в качестве вентилей используются диоды, а во втором случае – тиристоры.

Свойства выпрямительного агрегата зависят от числа фаз источника питания, схемного решения выпрямителя и сглаживающего фильтра. Однофазные установки используют двухполупериодные схемы: со средней точкой (рисунок 1, а) и мостовую (рисунок 1, б). В силовой электронике их чаще называют двухпульсовыми. Такое название происходит из-за того, что частота пульсации напряжения на выходе этих схем в два раза выше частоты сетевого напряжения. В трехфазных выпрямителях находят применение трех, шести, двенадцати и двадцатичетырехпульсовые схемы. Трехфазные выпрямители создаются на основе простых и сложных (комбинированных) схем. К первым относятся трехфазная схема с нулевой (средней) точкой (рисунок 2) и трехфазная мостовая (рисунок 3) а также трехфазная звезда-зигзаг с нулевой точкой (рисунок 4).

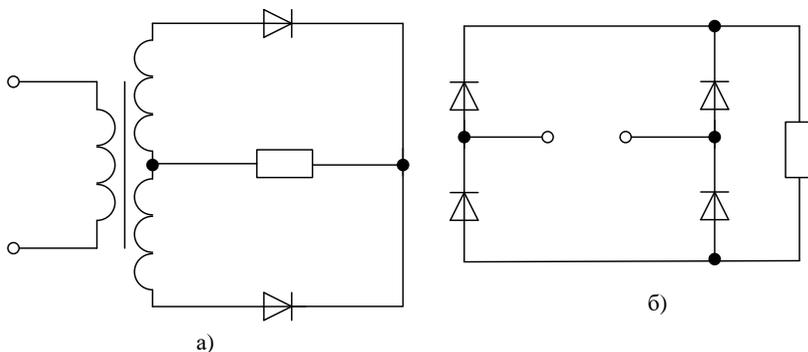


Рисунок 1 – Схемы однофазных выпрямителей

Ветвь выпрямителя, в которой находится диод, называется вентильным плечом. На представленных рисунках вентильные плечи всех схем состоят из одного диода. Реальные выпрямительные агрегаты большой мощности в вентильном плече содержат несколько диодов, которые включаются последовательно и параллельно.

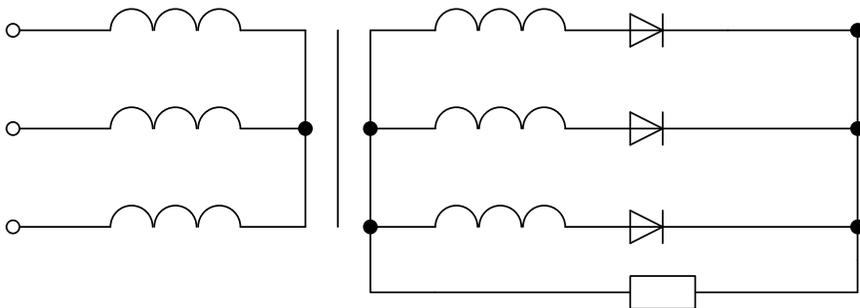


Рисунок 2 – Схемы трехфазного выпрямителя с нулевой точкой

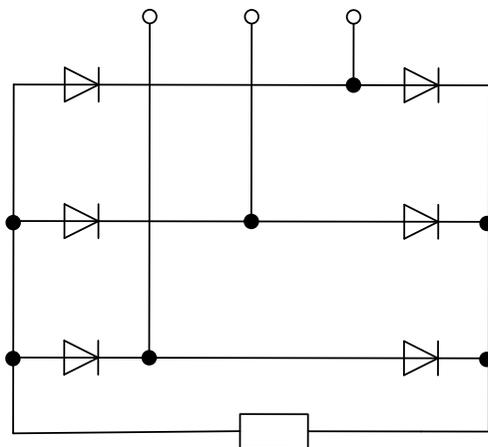


Рисунок 3 – Схема трехфазного мостового выпрямителя

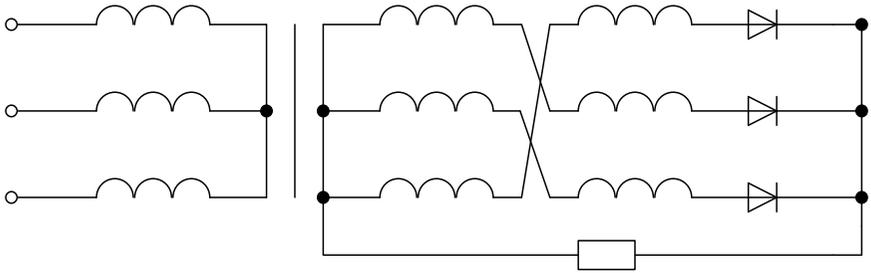


Рисунок 4 – Схема трехфазного выпрямителя звезда-зигзаг с нулевой точкой

Сложные схемы создаются на основе простых путем их параллельного или последовательного соединения.

Основные разновидности комбинированных трехфазных схем: две обратные звезды без уравнивающего реактора (рисунок 5), две обратные звезды с уравнивающим реактором (рисунок 6), две последовательные обратные звезды (рисунок 7), два трехфазных моста с уравнивающим реактором, два последовательно соединенных трехфазных моста.

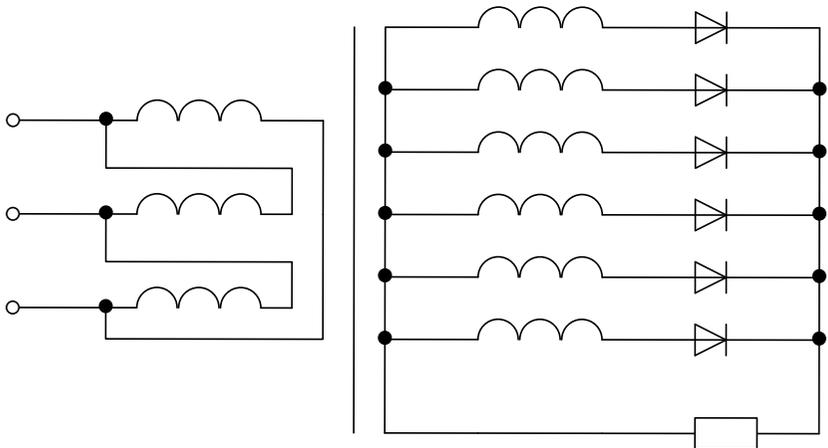


Рисунок 5 – Схема трехфазного выпрямителя – две обратные звезды без уравнивающего реактора

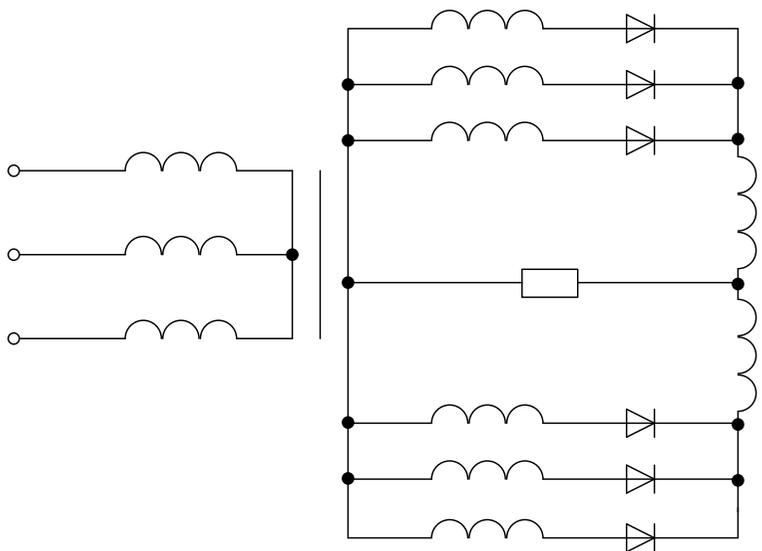


Рисунок 6 – Схема трехфазного выпрямителя – две обратные звезды с уравнивающего реактора

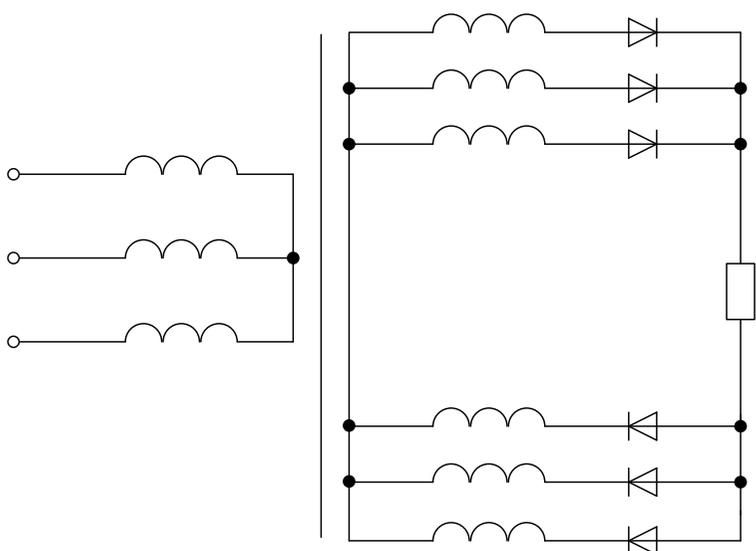


Рисунок 7 – Схема трехфазного выпрямителя – две последовательные обратные звезды

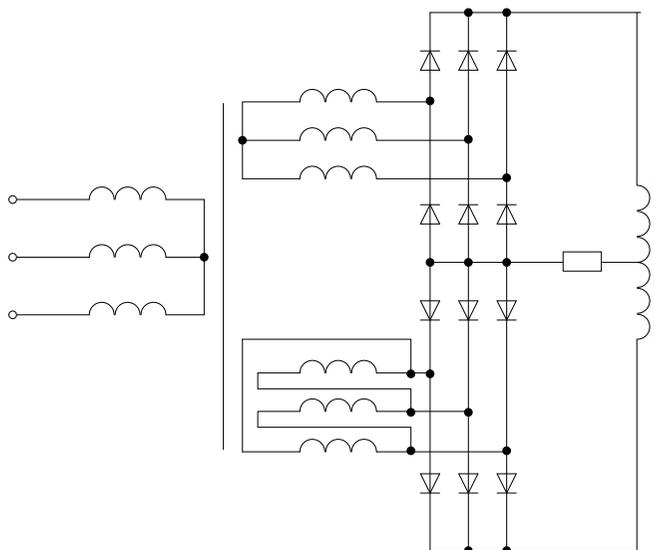


Рисунок 8 – Схема выпрямителя – два трехфазных моста с уравнивающим реактором

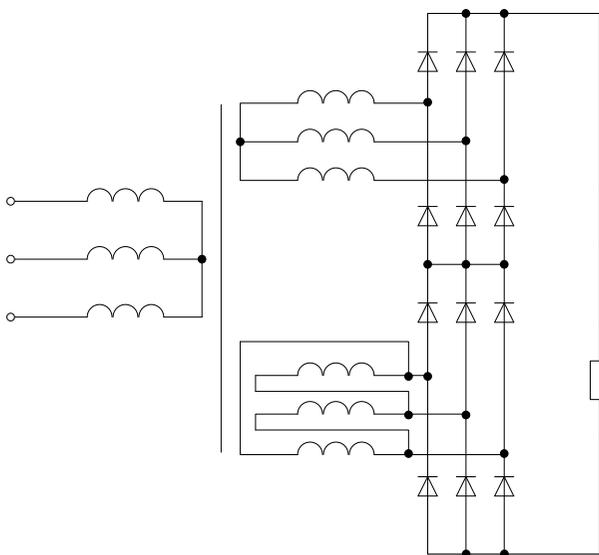


Рисунок 9 – Схема выпрямителя – два последовательно соединенных трехфазных моста

Важнейшие электрические соотношения для перечисленных схем представлены в таблице 1.

В этой таблице:

n – количество последовательно соединенных вентильных плеч, по которым одновременно протекает ток;

k_1 – отношение действующего значения фазного напряжения вентильной обмотки трансформатора к среднему значению напряжения на выходе выпрямителя;

k_2 – отношение максимального обратного напряжения на вентильном плече к среднему значению выходного напряжения;

k_3 – отношение среднего значения тока вентильного плеча к величине тока нагрузки выпрямителя;

k_4 – отношение максимального тока вентильного плеча к величине тока нагрузки;

k_5 – отношение действующего значения тока вторичной обмотки трансформатора к величине тока нагрузки;

k_6 – отношение действующего значения тока первичной обмотки трансформатора к величине тока нагрузки;

k_7 – отношение типовой мощности вентильного трансформатора к мощности на выходе выпрямителя;

A – коэффициент наклона внешней характеристики выпрямителя.

Таблица 1 – Электрические соотношения для различных схем выпрямителей

| Схема | n | k_1 | k_2 | k_3 | k_4 | k_5 | k_6 | k_7 | A |
|--------------------------------------------------|-----|--------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|------|
| Однофазная со средней точкой | 1 | 2,22 | 3,14 | 0,50 | 1,0 | 0,71 | 1,0 | 1,48 | 0,70 |
| Однофазная мостовая | 2 | 1,11 | 1,57 | 0,50 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,23 | 0,70 |
| Трёхфазная с нулевой точкой | 1 | 0,85 | 2,09 | 0,33 | 1,0 | 0,58 | 0,47 | 1,35 | 0,87 |
| Трёхфазная звезда-зигзаг с нулевой точкой | 1 | 0,49 | 2,09 | 0,33 | 1,0 | 0,58 | 0,47 | 1,46 | 0,58 |
| Трёхфазная мостовая | 2 | 0,42 | 1,05 | 0,33 | 1,0 | 0,81 | 0,81 | 1,05 | 0,50 |
| Две обратные звезды без уравнительного реактора | 1 | 0,74 | 2,09 | 0,16 | 1,0 | 0,41 | 0,58 | 1,55 | 0,50 |
| Две обратные звезды с уравнительным реактором | 1 | 0,85 | 2,09 | 0,16 | 0,5 | 0,29 | 0,41 | 1,33 | 0,50 |
| Две последовательные обратные звезды | 2 | 0,42 | 1,05 | 0,33 | 1,0 | 0,58 | 0,82 | 1,26 | 0,50 |
| Два трёхфазных моста с уравнительным реактором | 2 | 0,42 0,74 | 1,05 | 0,16 | 0,5 | 0,41 0,23 | 0,78 | 1,02 | 0,51 |
| Два последовательно соединенных трёхфазных моста | 4 | 0,21 0,37 | 0,52 | 0,33 | 1,0 | 0,82 0,47 | 1,57 | 1,02 | 0,52 |

Однофазная схема со средней точкой обеспечивает двухполупериодное (двухпульсовое) выпрямление при минимальном количестве вентилях. В каждом полупериоде ток проходит только через один диод, что повышает КПД выпрямителя, особенно при малых рабочих напряжениях. Недостатком схемы является повышенное обратное напряжение на вентилях, а также значительное (в 1,48 раза) превышение типовой мощности трансформатора над мощностью нагрузки выпрямителя.

Однофазная мостовая схема позволяет получить двухполупериодное (двухпульсовое) выпрямление при меньшей мощности вентиляльного трансформатора и меньшем обратном напряжении на диодах. Однако для своей реализации она требует наличия четырех вентилях. В каждом полупериоде ток проходит сразу по двум диодам, что снижает КПД выпрямителя, особенно при небольших рабочих напряжениях (единицы и десятки вольт).

Трехфазные выпрямители позволяют получить выпрямленное напряжение более высокого качества, поэтому при создании мощных агрегатов в промышленности они находят широкое распространение.

Простейшим трехфазным выпрямителем является схема с нулевой точкой, состоящая из трех диодов. Диоды работают поочередно, и в любой момент времени ток проходит только через один диод, что повышает КПД устройства. Недостатком схемы является наличие постоянного подмагничивания сердечника трансформатора, вследствие чего завышается его установленная мощность. Для устранения отмеченного недостатка каждую фазу вторичной обмотки вентиляльного трансформатора разделяют на две части, которые соединяются между собой в зигзаг. При такой схеме соединения ток фазы проходит через две полуобмотки, расположенные на соседних стержнях. МДС первичной и вторичной обмоток полностью компенсируются, и поток вынужденного подмагничивания не возникает. Выполнение вторичной обмотки по схеме зигзаг требует дополнительного расхода обмоточного провода и поэтому может быть рекомендовано лишь для низковольтных установок мощностью свыше 20-30 кВт.

Более высокие показатели по использованию трансформатора, обратному напряжению на диодах и магнитному равновесию (отсутствует постоянное подмагничивание) имеет трехфазная мостовая схема. Частота пульсации выпрямленного напряжения в шесть раз больше частоты входного переменного напряжения, что облегчает процесс фильтрации напряжения на нагрузке. Протекание тока одновременно по двум диодам снижает КПД выпрямителя. Однако это снижение заметно лишь в низковольтных установках. Данная схема находит широкое применение в выпрямительных агрегатах на полупроводниковых диодах, работающих от промышленной сети.

В мощных установках находят применение схемы, имеющие общую точку всех вентилях. К таким схемам можно отнести: две обратные звезды без уравнительного и с уравнительным реактором. По количеству пульсов напряжения на нагрузке они равнозначны мостовому выпрямителю, но с меньшей загрузкой вентилях по среднему току. Наличие реактора во второй

схеме разделяет ее на две одинаковые части, работающие независимо друг от друга. При этом длительность протекания тока через диод увеличивается, а потери в нем уменьшаются. Более благоприятные условия работы вентиля в схеме с уравнительным реактором обусловили ее широкое распространение в выпрямительных агрегатах [1, 2, 4, 6]. Однако свою функцию реактор выполняет лишь при токах нагрузки, превышающих некоторое минимально допустимое значение, ниже которого происходит увеличение напряжения на выходе выпрямителя, что неблагоприятно сказывается на потребителях.

Отмеченный недостаток устраняется в схеме, содержащей две последовательные обратные звезды. В ней уменьшается нагрузка диодов по напряжению при одновременном увеличении их среднего тока.

В установках большой мощности применяются двенадцатипульсовые выпрямители, позволяющие уменьшить величину переменной составляющей, которая создает помехи в линиях связи. Формируются эти схемы из шестипульсовых путем их параллельного или последовательного соединения. Достоинство первого варианта – в меньшей загрузке вентиля по току, а при последовательном соединении достигается меньшая нагрузка полупроводниковых приборов по напряжению. Недостатком двенадцатипульсовых выпрямителей является значительное усложнение схемы и большое количество диодов.

2 РАСЧЕТ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ДЛЯ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ТРАНСПОРТА

2.1 Исходные данные для расчета

Номинальное значение выпрямленного напряжения – $U_{dн}$, В.

Номинальный ток нагрузки выпрямителя – $I_{dн}$, А

Напряжение питающей сети переменного тока – U_c , В.

Мощность короткого замыкания питающей сети – S_k , МВА

Напряжение короткого замыкания трансформатора – u_k , %

Коэффициент технологической перегрузки выпрямителя по току – k_n .

Коэффициент повторяющейся перегрузки выпрямителя по напряжению – k_p .

Коэффициент неповторяющейся перегрузки выпрямителя по напряжению – $k_{пн}$.

Схема выпрямителя.

Конструктивное исполнение диодов, используемых в выпрямителе.

Температура окружающей среды – T_a , °С.

2.2 Содержание работы

Вычертить упрощенную схему выпрямителя при работе на активную нагрузку и описать его принцип действия, указать достоинства и недостатки.

Расчитать величины напряжений на основных элементах схемы.

Найти токи в цепях выпрямителя.

Определить мощность трансформатора и уравнивающего реактора (если он есть в схеме).

Рассчитать параметры диодов в номинальном и аварийном режимах, выбрать марку диодов.

Вычертить принципиальную схему выпрямительного агрегата.

2.3 Оформление пояснительной записки

Работа должна содержать анализ электромагнитных процессов в заданной схеме выпрямителя, а также расчеты и обоснования для выбора трансформатора, уравнивающего реактора и диодов вентильного плеча.

Формулы записывать в буквенном виде с расшифровкой всех параметров, входящих в них, а затем подставлять числовые значения и выполнять расчет.

На чертеже показать принципиальную схему выпрямительного агрегата с заданной схемой выпрямления и дать перечень элементов цепи.

Работу оформлять на бумаге формата А4 со штампами и нумерацией страниц.

2.4 Описание принципа действия выпрямителя

Выполнение расчетно-графической работы следует начать с рассмотрения принципа действия заданного выпрямителя. С этой целью необходимо изобразить упрощенную принципиальную схему установки. На схеме привести обозначения выводов вторичных обмоток вентильного трансформатора, нумерацию вентиляей, направления и наименования напряжений и токов. Условные обозначения должны быть едины во всей работе и соответствовать ГОСТу.

Изображение схемы следует дополнить описанием принципа работы: как соединены обмотки вентильного трансформатора и какую систему напряжений они формируют; какие и когда открыты вентили; если в схеме есть уравнивающий реактор, то указать его назначение и отметить особенности работы такой схемы при малых нагрузках.

Завершается описание принципа действия заданной схемы построением в одном временном масштабе графиков иллюстрирующих работу выпрямителя на активную нагрузку. Эту часть работы выполнять в такой последовательности:

- а) нарисовать временную зависимость мгновенного напряжения на вентильных обмотках трансформатора;
- б) показать временные диаграммы токов во всех диодах;
- в) сформировать кривые обратного напряжения на всех диодах;
- г) построить кривые токов вторичных обмоток трансформатора;
- д) изобразить ток первичной обмотки трансформатора;
- е) вычертить кривую выпрямленного напряжения;
- ж) нарисовать кривую тока на выходе выпрямителя.

2.5 Сравнительная характеристика схемы выпрямителя

Рассмотрев принцип действия заданной схемы, следует сравнить ее с подобными по свойствам (одинаковое число пульсов выходного напряжения) схемами. Необходимо отметить достоинства и недостатки заданной схемы. Сравнительный анализ проводить по максимальному и среднему току вентильного плеча в номинальном режиме, по максимальному обратному напряжению на плече, пульсации выпрямленного напряжения и типовой мощности трансформатора.

2.6 Расчет напряжений на элементах схемы выпрямителя

Среднее значение напряжения на выходе выпрямителя при холостом ходе

$$U_{d0} = \frac{U_{dн}}{1 - A \cdot \frac{u_k}{100}}, \quad (1)$$

где $U_{dн}$ – среднее значение выпрямленного напряжения, В, при номинальном токе нагрузки, берется из исходных данных;

A – коэффициент внешней характеристики, зависящий от схемы выпрямителя, приведен в таблице 1;

u_k – напряжение короткого замыкания вентильного трансформатора, берется из исходных данных, %.

Полученное значение напряжения на выходе выпрямителя в режиме холостого хода округляем в большую сторону с одновременным увеличением на 1-5 %, чтобы компенсировать потери напряжения в ошиновке, вентильях, защитной аппаратуре и т.д.

Действующее значение напряжения на фазе вентильной обмотки трансформатора определяется с учетом свойств конкретной схемы

$$U_{2ф} = U_{d0} \cdot K_1, \quad (2)$$

где K_1 – коэффициент, числовое значение которого зависит от схемы выпрямителя, выбирается из таблицы 1.

Коэффициент трансформации вентильного трансформатора при соединении первичной и вторичной обмоток звездой

$$K_T = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot U_{2ф}}, \quad (3)$$

где U_c – напряжение питающей сети, В, берется из исходных данных.

Для трехфазных трансформаторов, у которых вторичная обмотка соединена треугольником, и для однофазных трансформаторов коэффициент $\sqrt{3}$ исключается.

Максимальное обратное напряжение на вентильном плече выпрямителя

$$U_{в. макс} = U_{d0} \cdot \kappa_2, \quad (4)$$

где κ_2 – коэффициент, числовое значение которого зависит от свойств схемы, выбирается из таблицы.

Максимальное напряжение на уравнительном реакторе сложных шести-пульсовых схем выпрямления

$$U_p = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{2\phi}}{2}, \quad (5)$$

Максимальное напряжение на уравнительном реакторе сложных двенадцатипульсовых схем выпрямления

$$U_p = 0,24 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{2\phi}, \quad (6)$$

Для расчета и построения внешней характеристики (зависимости напряжения на выходе выпрямителя от тока нагрузки) использовать выражение

$$U_d = U_{d0} \cdot \left(1 - \frac{A \cdot u_k \cdot I_d}{100 \cdot I_{dH}}\right), \quad (7)$$

где U_{d0} – среднее значение напряжения на выходе выпрямителя при холостом ходе, В, определяется из формулы (1);

I_d – текущее значение тока нагрузки, А, (задаются 4-5 значений в пределах от 0 до $1,5 \cdot I_{dH}$);

I_{dH} – номинальное значение тока нагрузки выпрямителя, А, берется из исходных данных.

2.7 Расчет токов на элементах схемы выпрямителя

Среднее значение тока вентильного плеча при номинальном токе нагрузки

$$I_{в.ср} = I_{dH} \cdot \kappa_3, \quad (8)$$

где κ_3 – коэффициент, числовое значение которого приведено в таблице 1. Из этой же таблицы определяются и коэффициенты $\kappa_4 - \kappa_7$.

Максимальное значение тока вентильного плеча в номинальном режиме

$$I_{в.макс} = I_{dH} \cdot \kappa_4, \quad (9)$$

где κ_4 – коэффициент, зависящий от свойств схемы выпрямителя.

Действующее значение тока вторичной обмотки вентильного трансформатора в номинальном режиме

$$I_2 = I_{dH} \cdot \kappa_5, \quad (10)$$

где κ_5 – коэффициент, зависящий от свойств схемы выпрямителя.

Действующее значение тока первичной обмотки вентильного трансформатора в номинальном режиме работы

$$I_1 = I_{dH} \cdot \frac{\kappa_6}{\kappa_T}, \quad (11)$$

где κ_6 – коэффициент, зависящий от свойств схемы выпрямителя;

κ_T – коэффициент трансформации трансформатора, определяется по формуле (3).

2.8 Выбор вентильного трансформатора

Условная мощность выпрямителя, Вт,

$$P_{d0} = U_{d0} \cdot I_{dH}. \quad (12)$$

Типовая мощность вентильного трансформатора, кВА ,

$$S_T = P_{d0} \cdot \frac{\kappa_7}{1000}, \quad (13)$$

где κ_7 – коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя.

После расчета мощности вентильного трансформатора следует по справочнику подобрать типовой трансформатор. Мощность $S_{тн}$ этого трансформатора должна быть равна или несколько больше значения, рассчитанного с помощью выражения (13). Ряд номинальных значений мощностей трансформаторов, выпускаемых промышленностью, приведен в приложении А.

2.9 Выбор вентиля выпрямителя

Полупроводниковые вентили по свойствам структур бывают двух видов: простые и лавинные. В свою очередь простые и лавинные вентили по значениям максимально допустимого среднего прямого тока делятся на типы, а по значениям повторяющегося импульсного напряжения в закрытом состоянии на классы. По конструктивному исполнению корпуса вентили могут быть штыревыми или таблеточными. Вид вентиля, используемого в расчетно-графической работе, задается в исходных данных.

Необходимо выбрать диоды по допустимому среднему току и повторяющемуся импульсному обратному напряжению.

Наиболее ответственным является выбор по допустимому среднему току вентиляей. Исходными параметрами является величина среднего тока вентильного плеча, рассчитанная выше, и значение максимально допустимого среднего

тока диода. Под значением максимально допустимого тока подразумевается среднее за период значение прямого тока, протекающего через прибор в однофазной однополупериодной схеме выпрямления с активной нагрузкой при частоте 50 Гц, синусоидальной форме тока с углом проводимости 180° , когда в установившемся тепловом режиме температура корпуса равна заданному значению, а температура перехода - максимально допустимой [4].

В случае применения вентиляей в схеме с отличной от 180° продолжительностью проводящего состояния, иной формой тока и иной системой охлаждения максимально допустимый средний ток отличается от паспортного значения и его необходимо уточнять. Если максимально допустимый ток диода меньше тока вентиляйного плеча, то диоды в плече включаются параллельно. При выборе диодов следует учитывать, что чем меньше величина допустимого тока вентиля, тем больше число параллельных ветвей в плече и тем сложнее наладка и эксплуатация установки. На практике стараются выбирать такие диоды, чтобы число параллельных ветвей не превышало 10.

Способность диода выдерживать некоторое обратное напряжение без пробоя характеризуется классом. Первый класс позволяет работать диодам до 100 В, второй – до 200 В, третий – до 300 В и т.д. Выбор класса вентиля основан на сравнении максимального напряжения на вентиляйном плече, рассчитанного выше, с допустимым напряжением для выбранной марки вентиля, определяемым его классом. Для надежной работы выпрямительного агрегата допустимое напряжение должно превышать напряжение на вентиляйном плече на 15 – 20%.

Выбор диода по среднему току начинается с определения числа параллельных ветвей вентиляйного плеча в номинальном режиме работы. На данном этапе расчета из справочника на полупроводниковые вентиля [4] выбираем силовой выпрямительный диод, средний ток I_{FAVm} которого находится в пределах $0,2 I_{в.ср} < I_{FAVm} < 1,3 I_{в.ср}$. Для выбранного диода выписываем следующие предельно допустимые и характеризующие параметры:

I_{FAVm} – максимально допустимый средний прямой ток, А;

I_{RRM} – повторяющийся импульсный обратный ток, мА;

U_{RRM} – повторяющееся импульсное обратное напряжение, В;

U_{RWM} – импульсное рабочее обратное напряжение, В;

U_{RSM} – импульсное неповторяющееся обратное напряжение, В;

I_{FSM} – ударный неповторяющийся прямой ток, кА;

U_{FM} – импульсное прямое напряжение, В;

U_{TO} – пороговое напряжение, В;

r_m – дифференциальное прямое сопротивление, Ом;

T_{jm} – максимальная эффективная эквивалентная температура р-п перехода, $^\circ\text{C}$;

R_{thjc} – тепловое сопротивление (переход-корпус), $^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

$Z_{(th)jc}$ – переходное тепловое сопротивление (переход-корпус), $^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

$Z_{(th)ja}$ – переходное тепловое сопротивление (переход-среда), $^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

R_{thch} – тепловое сопротивление корпус-контактная поверхность охладителя, $^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

Дополнительно из справочника необходимо выбрать подходящий охладитель и выписать:

R_{thha} – тепловое сопротивление охладитель-окружающая среда, °C/Вт;

$Z_{(th)tha}$ – переходное тепловое сопротивление охладитель-окружающая среда, °C/Вт.

Тепловое сопротивление переход-среда для выбранного диода

$$R_{thja} = R_{thjc} + R_{thch} + R_{thha}, \quad (14)$$

где R_{thjc} – тепловое сопротивление переход-корпус, °C/Вт;

R_{thch} – тепловое сопротивление корпус диода-контактная поверхность охладителя, °C/Вт;

R_{thha} – тепловое сопротивление контактная поверхность охладителя-окружающая среда, °C/Вт.

Сопротивления R_{thjc} и R_{thch} берутся из справочных данных на диод. Если информация о R_{thch} отсутствует, то для вентилях штыревой конструкции можно брать $R_{thch} = 0,04...0,05$ °C/Вт, а для таблеточных – $R_{thch} = 0,01... 0,02$ °C/Вт.

Тепловое сопротивление R_{thha} приведено в справочных данных на выбранный охладитель. В справочнике может отсутствовать информация о переходном тепловом сопротивлении $Z_{(th)tja}$. В этом случае можно считать, что $Z_{(th)tja} = Z_{(th)jc} + Z_{(th)tha} + R_{thch}$

Максимально допустимый средний ток диода при заданных условиях работы

$$I'_{FAVm} = \frac{\sqrt{U_{то}^2 + 4 \cdot \kappa_{\phi}^2 \cdot r_m \cdot \frac{T_{jm} - T_a}{R_{thja}} - U_{то}}}{2 \cdot \kappa_{\phi}^2 \cdot r_m}, \quad (15)$$

где $U_{то}$ – пороговое напряжение для выбранного диода, В, берется из справочника;

T_{jm} – максимальная эффективная эквивалентная температура р-п-перехода этого диода, °C, берется из справочных данных на диод;

T_a – температура окружающей среды, °C, берется из исходных данных;

r_m – дифференциальное прямое сопротивление выбранного диода, Ом;

R_{thja} – тепловое сопротивление переход-среда диода, °C/Вт, определяется из формулы (14);

κ_{ϕ} – коэффициент формы кривой тока вентиля, зависящий от характера нагрузки и схемы выпрямителя. При прямоугольной форме тока (индуктивность сглаживающего реактора выпрямителя велика) значение κ_{ϕ} в зависимости от угла проводимости диода определяется из таблицы 2.

Таблица 2 – Значение κ_{ϕ} в зависимости от угла проводимости диода

| | | | | | |
|------------------|------|------|----|------|------|
| λ , град | 180 | 120 | 90 | 60 | 30 |
| κ_{ϕ} | 1,41 | 1,73 | 2 | 2,45 | 3,46 |

Число параллельных ветвей диодов вентильного плеча в номинальном режиме работы

$$a_n = \frac{I_{в.ср}}{I_{FAVm} \cdot 0,8}, \quad (16)$$

где $I_{в.ср}$ – средний ток вентильного плеча выпрямителя, А, определяется по формуле (8);

I_{FAVm} – максимально допустимый средний ток диода при заданных условиях работы, берется из (15).

За количество параллельных ветвей a_n для номинального режима работы принимается, округленное в большую сторону до целого, значение, полученное из выражения (16).

Ток одного вентиля в номинальном режиме работы выпрямителя

$$I_{FAV} = \frac{I_{в.ср}}{a_n}, \quad (17)$$

Мощность потерь в вентиле от тока предварительной нагрузки

$$P_{FAV} = U_{то} \cdot I_{FAV} + \kappa_{\phi}^2 \cdot r_t \cdot I_{FAV}^2, \quad (18)$$

где $U_{то}$ – пороговое напряжение диода, В;

κ_{ϕ} – коэффициент формы тока вентиля, выбираемый из таблицы 2;

r_t – дифференциальное сопротивление выбранного диода, Ом.

Температура нагрева полупроводниковой структуры диода от тока предварительной нагрузки

$$T_j = T_a + P_{FAV} \cdot R_{thja}, \quad (19)$$

где T_a – температура окружающей среды, °С;

R_{thja} – тепловое сопротивление переход-среда, °С/Вт, определяется из формулы (14).

Допустимый прямой ток перегрузки вентиля

$$I_{FOV} = \frac{1}{2r_T} \cdot \left(\sqrt{U_{To}^2 + 4r_T \cdot \frac{T_{jm} - T_j + P_{FAV} \cdot Z_{(th)tja}}{0,3 \cdot Z_{(th)tja} + 0,7 \cdot Z_{(th)tjc}} - U_{To}} \right), \quad (20)$$

где r_T – дифференциальное прямое сопротивление диода, Ом;

U_{To} – пороговое напряжение вентиля, В;

T_{jm} – максимально допустимая температура полупроводниковой структуры выбранного диода, °С;

T_j – температура нагрева полупроводниковой структуры током предварительной нагрузки, °С, берется из (19);

P_{FAV} – мощность потерь в диоде от тока предварительной нагрузки, Вт, рассчитывается по формуле (18);

$Z_{(th)tja}$ – переходное тепловое сопротивление переход-среда, °С/Вт, выбирается из справочника;

$Z_{(th)tjc}$ – переходное тепловое сопротивление переход-корпус, °С/Вт, находится по справочнику.

Число параллельных ветвей вентильного плеча преобразователя для режима перегрузки,

$$a_{п} = \frac{\kappa_{п} \cdot I_{в.макс}}{0,8 \cdot I_{FOV}}, \quad (21)$$

где $\kappa_{п}$ – коэффициент технологической перегрузки по току, приведен в исходных данных;

$I_{в.макс}$ – максимальный ток вентильного плеча, А, определяется из (9);

I_{FOV} – допустимый прямой ток перегрузки диода, А, получен в (20).

Ударный ток короткого замыкания выпрямителя, кА,

$$I_{уд} = \frac{2,55 \cdot I_2}{\frac{S_{тн}}{S_{к}} + 10 \cdot u_{к}}, \quad (22)$$

где I_2 – действующее значение номинального тока вторичной обмотки вентильного трансформатора, А, рассчитывается по формуле (10);

$S_{тн}$ – номинальная полная мощность вентильного трансформатора, кВА, выбранного в пункте 2.8;

$S_{к}$ – мощность короткого замыкания сети, МВА, берется из исходных данных.

Число параллельных ветвей вентильного плеча выпрямителя, способных выдержать ударный ток короткого замыкания,

$$a_{к} = \frac{I_{уд}}{I_{FSM}}, \quad (23)$$

где I_{FSM} – максимально допустимый неповторяющийся ток диода, кА, выбирается из справочных данных.

Для окончательного выбора числа параллельных ветвей в плече выпрямителя, рассчитанные значения a_n , a_{π} и a_k округляем до целого числа в большую сторону и сравниваем между собой. За число параллельных ветвей a принимаем большее из сравниваемых значений.

Число последовательно соединенных диодов в вентильном плече выпрямителя, работающего в номинальном режиме,

$$b_n = \frac{U_{в.макс}}{0,9 \cdot U_{RWM}}, \quad (24)$$

где $U_{в.макс}$ – максимальное обратное напряжение на вентильном плече выпрямителя, В, определяется с помощью выражения (4);

U_{RWM} – допустимое повторяющееся обратное напряжение, выдерживаемое диодом, В, берется из справочных данных на вентиль. Если нет значения U_{RWM} в справочнике, то можно взять $U_{RWM} = 0,8 \cdot U_{RRM}$,

где U_{RRM} – допустимое повторяющееся импульсное обратное напряжение выбранного диода, В.

Количество последовательно соединенных вентилях в плече, определяемое по повторяющемуся коммутационному перенапряжению,

$$b_k = \frac{U_{в.макс} \cdot \kappa_p}{0,9 \cdot U_{RWM}}, \quad (25)$$

где $U_{в.макс}$ – максимальное обратное напряжение на вентильном плече выпрямителя, В, рассчитывается по формуле (4);

κ_p – коэффициент повторяющейся перегрузки по напряжению, приводится в исходных данных;

U_{RWM} – допустимое повторяющееся импульсное обратное напряжение диода, В.

Число последовательно соединенных диодов, рассчитанное по неповторяющемуся перенапряжению,

$$b_{\pi} = \frac{U_{dн} \cdot \kappa_{\pi}}{U_{RSM}}, \quad (26)$$

где $U_{dн}$ – напряжение выпрямителя в номинальном режиме, В, берется из исходных данных;

κ_{π} – коэффициент неповторяющейся перегрузки выпрямителя по напряжению, приводится в исходных для расчета данных;

U_{RSM} – неповторяющееся обратное напряжение, выдерживаемое диодом, В, берется из паспортных данных. Если в справочнике отсутствует значение U_{RSM} , то можно принять

$$U_{RSM} = (1,16 \dots 1,25) U_{RRM},$$

где U_{RRM} – повторяющееся импульсное обратное напряжение, выдерживаемое диодом, В.

Округляем в сторону увеличения до целого значения b_n, b_k, b_p и за число последовательно соединенных диодов b выбираем большую из трех величин.

Рассчитав значения a и b , следует решить задачу по равномерному распределению токов в параллельно соединенных ветвях вентильного плеча и по равномерному распределению напряжения на последовательно соединенных диодах.

При последовательном соединении диодов обратное напряжение на них распределяется неравномерно вследствие разброса значений внутреннего сопротивления. С ростом температуры неравномерность может увеличиваться.

Для устранения этого явления параллельно диодам подключаются одинаковые резисторы. Сопротивление этих резисторов, кОм,

$$R = \frac{U_{RRM}}{4 \cdot a \cdot I_{RRM}}, \quad (27)$$

где U_{RRM} – допустимое повторяющееся импульсное обратное напряжение, В;
 a – число параллельных ветвей в вентильном плече, принято ранее;
 I_{RRM} – повторяющийся импульсный обратный ток, мА, берется из справочных данных на диод.

Равномерное распределение тока по параллельно соединенным диодным ветвям вентильного плеча достигается путем подбора вентиляей с одинаковым значением прямого падения напряжения.

В приложении Б представлены конструктивные и схемотехнические решения выпрямительных агрегатов для тяговых подстанций городского, железнодорожного электрического транспорта и метрополитена.

3 ПРИМЕР РАСЧЁТА ВЫПРЯМИТЕЛЯ

3.1 Исходные данные для расчета

| | |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Номинальное напряжение выпрямителя U_{dH} | – 1200 В |
| Номинальный ток нагрузки I_{dH} | – 1000 А |
| Напряжение питающей сети переменного тока U_c | – 6000 В |
| Мощность короткого замыкания питающей сети S_k | – 20 МВА |
| Напряжение короткого замыкания трансформатора u_k | – 8 % |
| Коэффициент технологической перегрузки выпрямителя по току k_T | – 2,5 |
| Коэффициент повторяющейся перегрузки выпрямителя по напряжению k_p | – 1,5 |
| Коэффициент неповторяющейся перегрузки выпрямителя по напряжению k_H | – 1,8 |
| Температура окружающей среды T_a | – 45°C |
| Тип диодов | – штыревые |
| Схема выпрямителя | – однофазная мостовая |

3.2 Расчет напряжений на элементах схемы выпрямителя

Среднее значение напряжения на выходе выпрямителя в режиме холостого хода

$$U_{d0} = \frac{U_{dH}}{I - A \cdot \frac{u_k}{100}} = \frac{1200}{1 - \frac{0,7 \cdot 8}{100}} = 1271 \text{ В.}$$

Для покрытия потерь в шинах (кабелях) питания и вентиллях увеличиваем полученное значение на 1-5 %.

Принимаем $U_{d0} = 1300 \text{ В}$.

Действующее значение напряжения на фазе вентильной обмотки трансформатора

$$U_{2\phi} = U_{d0} \cdot k_1 = 1300 \cdot 1,11 = 1443 \text{ В.}$$

Коэффициент трансформации вентильного трансформатора

$$k_T = \frac{U_c}{U_{2\phi}} = \frac{6000}{1443} = 4,17.$$

Максимальное обратное напряжение на вентильном плече

$$U_{в. макс} = U_{d0} \cdot k_2 = 1300 \cdot 1,57 = 2040 \text{ В.}$$

Используя выражение (7), рассчитываем значения напряжения на выходе выпрямителя при выбранных значениях тока нагрузки, а затем строим внешнюю характеристику выпрямителя $U_d = f(I_d)$, (рисунок 10).

Таблица 3 – Значение U_d в зависимости от тока нагрузки I_d

| | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| $U_d, В$ | 1300 | 1278 | 1256 | 1227 | 1205 | 1190 |
| $I_d, А$ | 0 | 300 | 600 | 1000 | 1300 | 1500 |

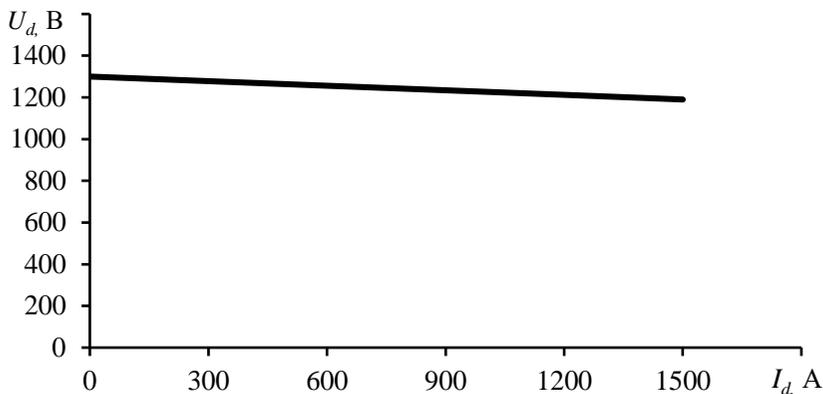


Рисунок 10 – Внешняя характеристика выпрямителя

3.3 Расчет токов на элементах схемы выпрямителя

Среднее значение тока вентильного плеча в номинальном режиме

$$I_{в.ср} = I_{дН} \cdot K_3 = 1000 \cdot 0,5 = 500 \text{ А.}$$

Максимальное значение тока вентильного плеча

$$I_{в.макс} = I_{дН} \cdot K_4 = 1000 \cdot 1 = 1000 \text{ А.}$$

Действующее значение тока вторичной обмотки вентильного трансформатора

$$I_2 = I_{дН} \cdot K_5 = 1000 \cdot 1 = 1000 \text{ А.}$$

Действующее значение тока первичной обмотки вентильного трансформатора

$$I_1 = I_{дН} \cdot \frac{K_6}{K_T} = \frac{1000 \cdot 1}{4,17} = 239,8 \text{ А.}$$

3.4 Выбор вентиляльного трансформатора

Условная мощность выпрямителя

$$P_{d0} = U_{d0} \cdot I_{dH} = 1300 \cdot 1000 = 13 \cdot 10^5 \text{ Вт.}$$

Типовая мощность вентиляльного трансформатора

$$S_T = P_{d0} \cdot \kappa_7 = 13 \cdot 10^5 \cdot 1,23 = 15,9 \cdot 10^5 \text{ ВА или } S_T = 1590 \text{ кВА.}$$

Используя ряд номинальных мощностей трансформаторов, выпускаемых промышленностью (см. приложение А), выбираем трансформатор мощностью $S_{ТН} = 1600 \text{ кВА}$.

3.5 Выбор типа диода выпрямителя

При определении марки вентиля из справочных данных на предельно допустимые значения выбираем для конкретного диода I_{FAV_m} и проверяем его на удовлетворение неравенству

$$0,2 I_{в.ср} < I_{FAV_m} < 1,3 I_{в.ср}. \quad (28)$$

Для рассматриваемого примера можно выбрать диод ВЛ-320, для которого $I_{FAV_m} = 320 \text{ А}$. Это значение удовлетворяет неравенству (28).

Выписываем предельно допустимые и характеризующие параметры диода ВЛ-320.

Максимально допустимый средний прямой ток $I_{FAV_m} = 320 \text{ А}$

Повторяющийся импульсный обратный ток $I_{RRM} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ А}$.

Ударный неповторяющийся прямой ток $I_{FSM} = 7,26 \cdot 10^3 \text{ А} = 7,26 \text{ кА}$.

Повторяющееся импульсное обратное напряжение $U_{RRM} = 1200 \text{ В}$.

Импульсное рабочее обратное напряжение $U_{RWM} = 960 \text{ В}$.

Импульсное неповторяющееся обратное напряжение $U_{RSM} = 1400 \text{ В}$.

Пороговое напряжение $U_{TO} = 1,08 \text{ В}$.

Импульсное прямое напряжение $U_{FM} = 1,6 \text{ В}$.

Дифференциальное прямое сопротивление диода $r_T = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$.

Максимально допустимая температура перехода $T_{jm} = 140 \text{ °С}$.

Тепловое сопротивление переход-корпус $R_{thjc} = 0,09 \text{ °С/Вт}$.

Переходное тепловое сопротивление переход-корпус $Z_{(th)jc} = 0,09 \text{ °С/Вт}$.

Переходное тепловое сопротивление переход-среда $Z_{(th)ja} = 0,14 \text{ °С/Вт}$.

Тепловое сопротивление $R_{thch} = 0,01 \text{ °С/Вт}$.

Выбираем для диода ВЛ-320 охладитель ОА-016, для которого тепловое сопротивление охладитель-окружающая среда $R_{thha} = 0,28 \text{ °С/Вт}$.

Переходное тепловое сопротивление $Z_{(th)tha} = 0,04 \text{ °С/Вт}$.

3.6 Определение числа параллельно соединенных диодов в вентильном плече выпрямителя

Тепловое сопротивление переход-среда

$$R_{thja} = R_{thjc} + R_{thch} + R_{thha} = 0,09 + 0,01 + 0,28 = 0,38 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

Максимально допустимый средний ток диода при заданных условиях работы

$$I_{FAV_m} = \frac{\sqrt{U_{TO}^2 + 4 \cdot k_\Phi^2 \cdot r_T \cdot \frac{T_{jm} - T_a}{R_{thja}} - U_{TO}}}{2 \cdot k_\Phi^2 \cdot r_T} =$$

$$= \frac{\sqrt{1,08^2 + 4 \cdot 1,41^2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{140 - 45}{0,38}} - 1,08}{2 \cdot 1,41^2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 196 \text{ А}$$

Число параллельных ветвей вентильного плеча для номинального режима

$$a_n = \frac{I_{в.сп}}{I_{FAV_m}} = \frac{500}{196 \cdot 0,8} = 3,18.$$

Округляем полученный результат в сторону увеличения и получаем искомое значение, т.е. $a_n = 4$.

Средний ток одного вентиля в номинальном режиме

$$I_{FAV} = \frac{I_{в.сп}}{a_n} = \frac{500}{4} = 125 \text{ А}.$$

Мощность потерь в диоде от тока предварительной нагрузки

$$P_{FAV} = U_{TO} \cdot I_{FAV} + k_\Phi^2 \cdot r_T \cdot I_{FAV}^2 =$$

$$= 1,08 \cdot 125 + 1,41^2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 125^2 = 150,5 \text{ Вт}.$$

Температура нагрева полупроводниковой структуры диода от тока предварительной нагрузки

$$T_j = T_a + P_{FAV} \cdot R_{thja} = 45 + 150,5 \cdot 0,38 = 102,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Допустимый прямой ток перегрузки вентиля

$$I_{FOV} = \frac{1}{2 \cdot r_T} \left(\sqrt{U_{TO}^2 + 4 \cdot r_T \cdot \frac{T_{jm} - T_j + P_{FAV} \cdot Z_{(th)lja}}{0,3 \cdot Z_{(th)lja} + 0,7 \cdot Z_{(th)tjc}} - U_{TO}} \right) =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} \left(\sqrt{1,08^2 + 4 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{140 - 102,2 + 150,5 \cdot 0,15}{0,3 \cdot 0,14 + 0,7 \cdot 0,09}} - 1,08 \right) = 420 \text{ А}$$

Число параллельных ветвей вентильного плеча выпрямителя, рассчитанное для режима перегрузки,

$$a_{\text{п}} = \frac{K_{\text{п}} \cdot I_{\text{в.макс}}}{0,8 \cdot I_{\text{FOV}}} = \frac{2,5 \cdot 1000}{0,8 \cdot 420} = 7,4$$

Ударный ток короткого замыкания выпрямителя

$$I_{\text{уд}} = \frac{2,55 \cdot I_2}{\frac{S_{\text{тн}}}{S_{\text{к}}} + 10 \cdot u_{\text{к}}} = \frac{1000 \cdot 2,55}{\frac{1600}{20} + 10 \cdot 8} = 15,9 \text{ кА.}$$

Количество параллельных ветвей вентильного плеча, способных выдержать ударный ток короткого замыкания выпрямителя,

$$a_{\text{к}} = \frac{I_{\text{уд}}}{I_{\text{FSM}}} = \frac{15,9}{7,26} = 2,2.$$

За число параллельных ветвей вентильного плеча принимаем большую из трех величин: $a_{\text{н}}$, $a_{\text{п}}$, $a_{\text{к}}$. В нашем примере это $a_{\text{п}}$. После округления получаем $a = 8$.

3.7 Определение числа последовательно соединенных диодов в вентильном плече выпрямителя

Количество последовательно соединенных диодов в вентильном плече агрегата, работающего в номинальном режиме,

$$b_{\text{н}} = \frac{U_{\text{в.макс}}}{0,9 \cdot U_{\text{RWM}}} = \frac{2040}{0,9 \cdot 960} = 2,36.$$

Число последовательно соединенных вентилей в плече, определяемое по повторяющемуся коммутационному перенапряжению,

$$b_{\text{к}} = \frac{U_{\text{в.макс}} \cdot K_{\text{р}}}{0,9 \cdot U_{\text{RRM}}} = \frac{2040 \cdot 1,5}{0,9 \cdot 1200} = 2,8.$$

и по неповторяющемуся перенапряжению

$$b_{\text{п}} = \frac{U_{\text{дн}} \cdot K_{\text{н}}}{U_{\text{RSM}}} = \frac{1200 \cdot 1,8}{1400 \cdot 2} = 0,7.$$

Из сравнения b_n , b_k , b_n между собой видно, что наибольшим из этих коэффициентов является b_k , поэтому после округления получаем $b = 3$.

Спротивление резисторов, шунтирующих диоды с целью равномерного распределения обратного напряжения,

$$R = \frac{U_{RRM}}{4 \cdot a \cdot I_{RRM}} = \frac{1200}{4 \cdot 8 \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = 1800 \text{ Ом.}$$

Для равномерного распределения тока по параллельно соединенным ветвям применяем подбор диодов по величине прямого падения напряжения.

На рисунке 11 изображена принципиальная схема рассчитанного выпрямителя. На его выходе подключен сглаживающий фильтр, состоящий из дросселей и конденсаторов. Элементы $L1 - L6$ и $C8 - C12$ образуют резонансные цепи, с помощью которых ослабляются гармоники, оказывающие наибольшее мешающее воздействие на линии связи. Конденсатор $C13$ служит для подавления высокочастотных гармоник, проникающих через сглаживающий фильтр.

Параллельно каждому плечу выпрямителя подключены разрядники $P2 - P5$, позволяющие предохранить вентили схемы от коммутационных перенапряжений. В связи с тем, что разрядники срабатывают за время от 2 до 20 мксек, а перенапряжения возникают в доли микросекунды, параллельно вентильному плечу подключается демпфирующая цепь состоящая из последовательно соединенных конденсатора и резистора ($C4R2$; $C5R3$; $C6R4$; $C7R5$). Наличие конденсатора снижает скорость нарастания напряжения на вентильном плече и ограничивает его амплитуду, а резистор служит для подавления колебательного процесса, вызванного емкостью подключаемого конденсатора и паразитной индуктивностью соединительных шин цепи. Спротивление демпфирующего резистора составляет несколько десятков Ом.

Для исключения короткого замыкания при пробое демпфирующего конденсатора, в отмеченную выше последовательную цепь, может включаться плавкий предохранитель ($FU1 - FU9$).

Принципиальная схема вентильного плеча (групповой вентиль) изображена на рисунке 12. Групповой вентиль состоит из восьми параллельно соединенных ветвей, каждая из которых образована тремя диодами. Число параллельных ветвей определяется максимальным током выпрямителя и током короткого замыкания (с учетом времени отключения защитой), а число последовательно соединенных вентилях повторяющимся напряжением в ветви с учетом колебания напряжения в питающей сети. С помощью резисторов, изображенных на схеме, осуществляется выравнивание режима работы всех полупроводниковых приборов. Резисторы $R_1 - R_3$ служат для равномерного распределения напряжения между последовательно соединенными диодами, а резисторы связи $R_4 - R_{17}$, сопротивлением в несколько десятых долей ома, улучшают распределение тока между параллельно включенными вентилями.

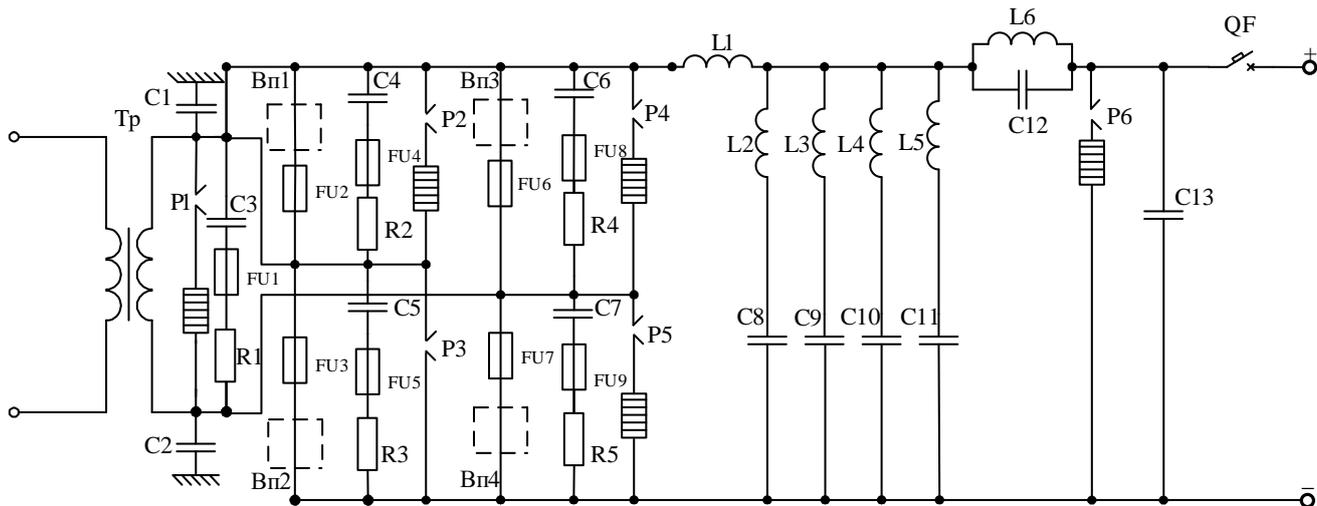


Рисунок 11 – Схема выпрямителя

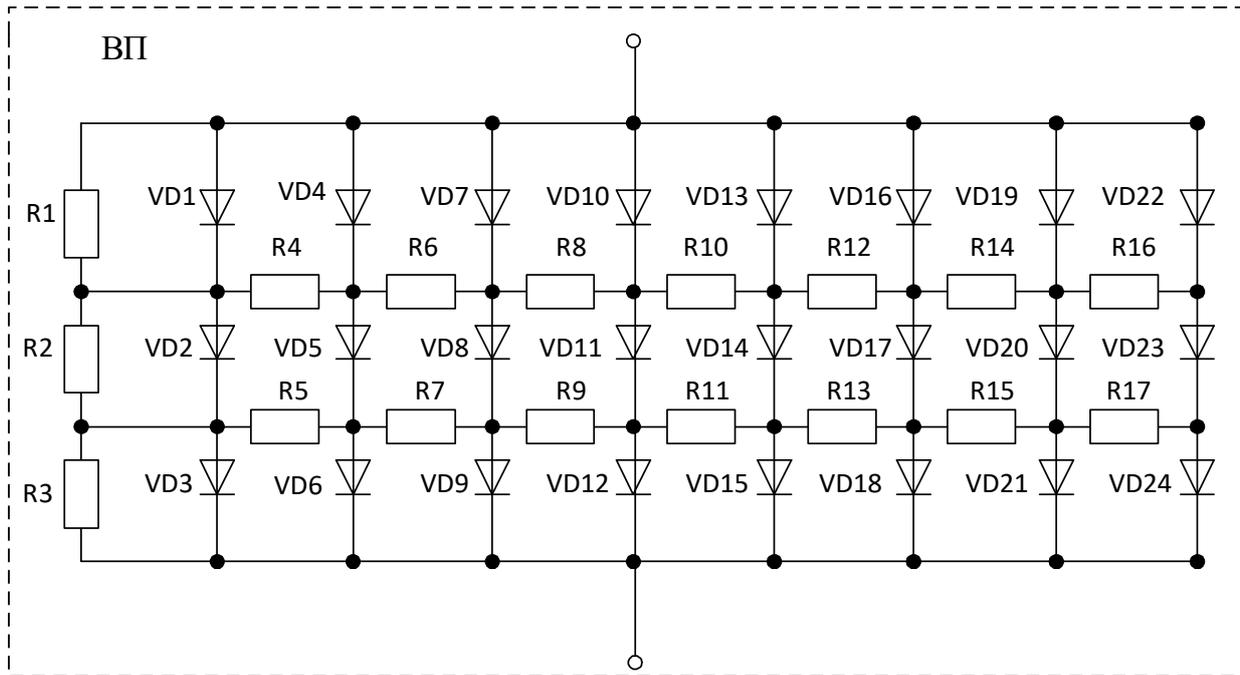


Рисунок 12 – Схема вентильного плеча

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**Ряд номинальных значений мощностей трансформаторов,
выпускаемых промышленностью, $S_{\text{тн}}$, кВА**

Таблица А.1 – Технические параметры силовых трансформаторов

| | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 10 | | 16 | | 25 | | 40 | | 63 |
| 100 | | 160 | | 250 | | 400 | | 630 |
| 1000 | | 1600 | | 2500 | | 4000 | | 6300 |
| 10000 | 12500 | 16000 | 20000 | 25000 | 32000 | 40000 | | 63000 |
| 100000 | 125000 | 160000 | 200000 | 250000 | 320000 | 400000 | 500000 | 630000 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Технические параметры некоторых выпрямительных агрегатов, выпускаемых промышленностью

Выпрямительные агрегаты для тяговых подстанций городского, железнодорожного электрического транспорта и метрополитена представлены следующими типами: ВАК-1600/600-Н, ВАК-2000/1500-Н и ВАК-3000/3000-Н [7]. Обозначения типов агрегатов расшифровываются следующим образом: выпрямительный агрегат с выпрямителем на кремниевых вентилях, на номинальный выпрямленный ток 1600, 2000 или 3000 А, номинальное выпрямленное напряжение 600 В, 1500 В и 3000 В, соответственно, работающий по нулевой схеме. Основные технические параметры стационарных выпрямителей приведены в таблице Б.1

Таблица Б.1– Основные технические параметры стационарных выпрямителей

| Наименование параметра | Ед. изм. | Исполнения выпрямителей по номинальному напряжению | | |
|-------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------|----------------|------------------|
| | | 600 В, 750 В, 825 В | 1500 В, 1650 В | 3000 В, 3300 В |
| Номинальное напряжение | В | 750 | 1500 , 1650 | 3000, 3300 |
| Номинальный ток | А | 1600 - 4000 | 2000 - 4000 | 2000 – 4000 |
| Напряжение сети собственных нужд | В | ≈ 110/220 | | |
| Схема выпрямления | – | 6-ти импульсная, 12-ти импульсная | | |
| Тип охлаждения | – | естественное, принудительное | | |
| Класс нагрузки (согласно EN 50328*) | – | VI | | |
| Максимальная температура окружающей среды | °С | 40 | | |
| IP класс | – | IP21 | IP21 | IP20, IP21, IP43 |

* – европейский комитет по электротехнической стандартизации (CENELEC)

На рисунке Б.1 представлен выпрямительный агрегат тяговой подстанции, состоящий из силового трансформатора (рисунок Б.2), выпрямительного блока (рисунок Б.3), система управления и диагностики (рисунок Б.4), шкафа гальванической развязки (рисунок Б.5), панелей защиты и быстродействующего катодного выключателя.



Рисунок Б.1 – Расположение шкафов выпрямительного агрегата тяговой подстанции



Рисунок Б.2 – Силовой трансформатор

В качестве силового трансформатора используются современные сухие трансформаторы, обмотки которых изготавливаются по технологии RESIBLOC® мощностью от 630 кВА с различными сочетаниями напряжений первичной и вторичной обмоток.

Трансформаторы имеют оригинальную конструкцию обмоток высокого и низкого напряжений, выполняемых из провода и фольги. Бандажируются обмотки стекловолоконной нитью, пропитанной эпоксидным компаундом.

Высокое содержание стекловолокна (около 80 %) и сочетание поперечного и продольного армирования создает блок обмотки с очень высокой поперечной и продольной прочностью. Трансформаторы работают в условиях 100 % влажности и в условиях конденсации водяных паров, а также в условиях химического загрязнения.

Трансформаторы могут быть оснащены радиальными вентиляторами с низким уровнем шумов. Принудительная система охлаждения позволяет увеличить номинальную мощность трансформаторов до 40 %.



Рисунок Б.3 – Выпрямительный блок

Выпрямитель разработан таким образом, чтобы быть в состоянии выдерживать внешнее короткое замыкание без повреждений до момента размыкания выключателя среднего напряжения.

Защита от внутренних коротких замыканий осуществляется с помощью силовых предохранителей, установленных последовательно с каждым диодом.

Выпрямители изготавливаются для различных режимов отказа полупроводниковых приборов (режимы T, F и R) согласно EN 50328.



Рисунок Б.4 – Система управления и диагностики

Выпрямители оснащены микропроцессорной системой управления и диагностики, с выдачей информации о состоянии каждого диода на панель визуализации по критериям: «нормальная работа», «ухудшение параметров», «пробой», а также о температуре диодов. Мониторинг параметров каждого диода ведется в динамике, во время эксплуатации выпрямителя.

Система построена на основе промышленного контроллера PP65 (с цветной панелью HMI), обеспечивает мониторинг параметров каждого диода в динамическом режиме в процессе эксплуатации выпрямителя, ведение журнала событий, визуализацию распределения температуры, напряжений и других параметров диодов, защиту от перегрева выпрямителя и трансформатора, защиту от пробоя диодов, связь с системой SCADA и др.

Платы гальванической развязки (рисунок Б.5) осуществляют защиту от перенапряжений RC-цепями, выдают информацию для анализа контроллером системы диагностики.

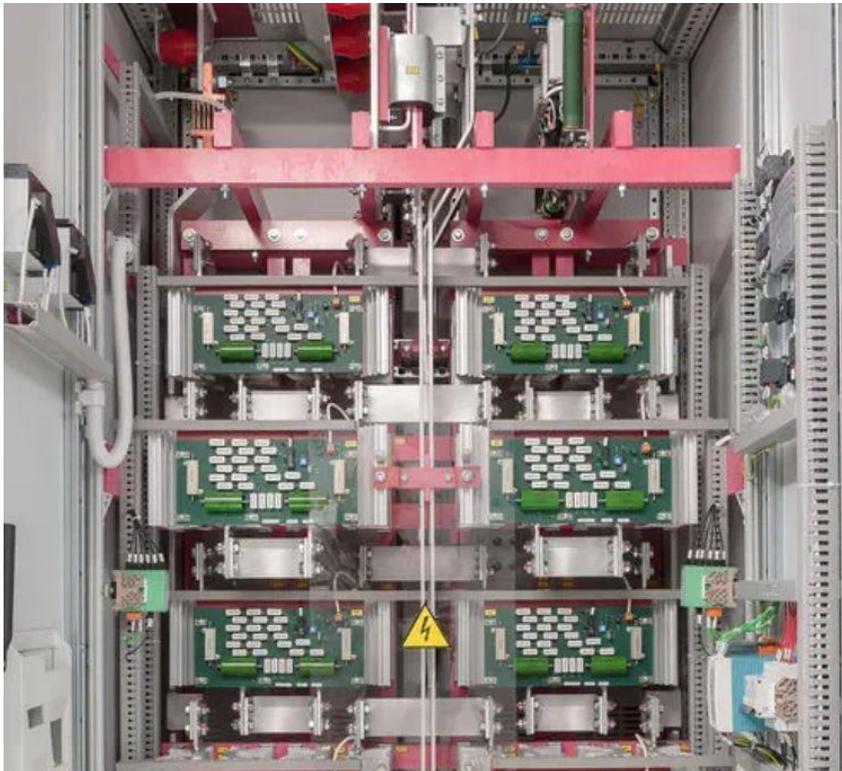


Рисунок Б.5 – Шкаф гальванической развязки

Упрощенные схемы силовой части выпрямителей представлены на рисунках Б.6 и Б.7.

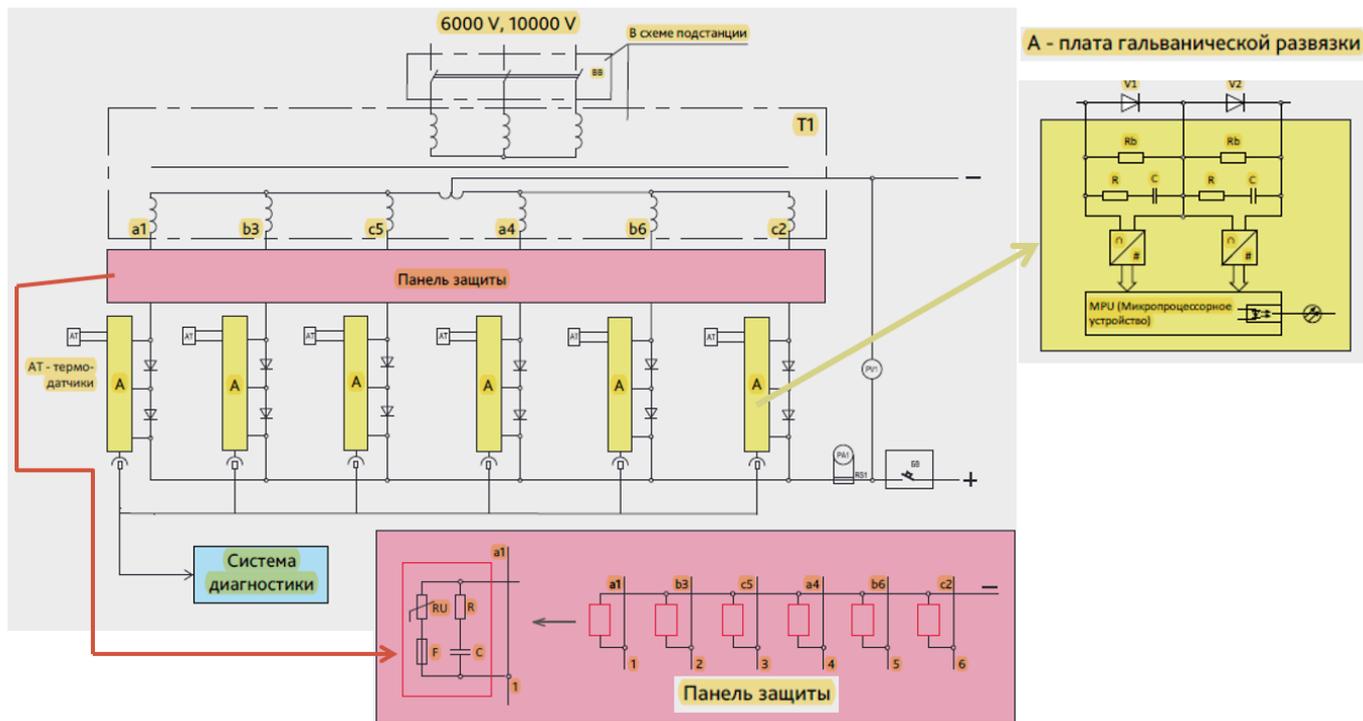
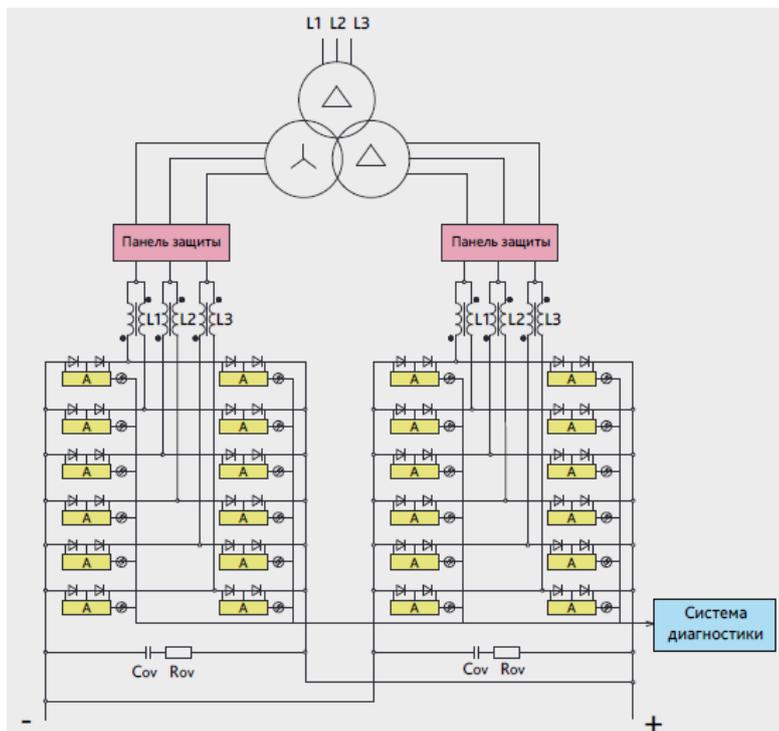
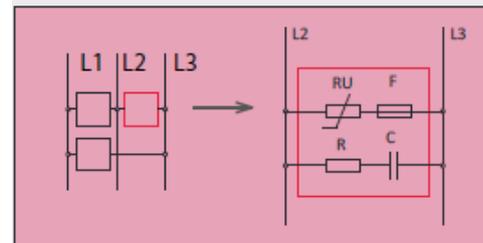


Рисунок Б.6 – Упрощенная схема силовой части выпрямителя (6-ти пульсовая 600 В, 2000 А)



Панель защиты



A - плата гальванической развязки

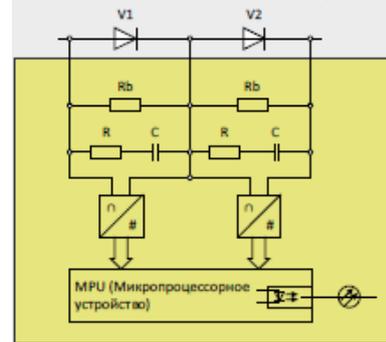


Рисунок Б.7 – Упрощенная схема силовой части выпрямителя (12-ти пульсовая 600 В, 2000 А)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. - М, 1999.-464с.
2. Засорин С. Н., Мицкевич И. А., Кучма К. Г. Электронная и преобразовательная техника: Учебник для вузов ж. д. трансп. Под редакцией С. Н. Засорина. – М:Транспорт, 1981, 319с
3. Прохорский А. А. Тяговые и трансформаторные подстанции: Учебник для техникумов жел.-дор. трансп. Изд. 4-е. М.: Транспорт, 1983. 496 с.
4. Чебовский О. Г. и др. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник. Изд. 2-е. М.: Энергоатомиздат, 1985. 400 с.
5. Полупроводниковые выпрямители/ Беркович В. И. и др. Изд. 2-е. М.: Энергия, 1978. 448 с.
6. Звездкин М. Н. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: Учебник для техникумов ж.-д. трансп. Изд. 4-е перераб. и доп. М.: Транспорт, 1985. 263 с.
7. Выпрямители. Городской электрический транспорт. Железные дороги. Метрополитен – Режим доступа: <http://www.pluton.ua> – Дата доступа: 10.01.2021.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| 1 ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ..... | 4 |
| 2 РАСЧЕТ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ДЛЯ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ТРАНСПОРТА..... | 11 |
| 2.1 Исходные данные для расчета..... | 11 |
| 2.2 Содержание работы..... | 11 |
| 2.3 Оформление пояснительной записки | 12 |
| 2.4 Описание принципа действия выпрямителя | 12 |
| 2.5 Сравнительная характеристика схемы выпрямителя | 13 |
| 2.6 Расчет напряжений на элементах схемы выпрямителя..... | 13 |
| 2.7 Расчет токов на элементах схемы выпрямителя..... | 14 |
| 2.8 Выбор вентиляного трансформатора..... | 15 |
| 2.9 Выбор вентиля выпрямителя..... | 15 |
| 3 ПРИМЕР РАСЧЁТА ВЫПРЯМИТЕЛЯ | 22 |
| 3.1 Исходные данные для расчета..... | 22 |
| 3.2 Расчет напряжений на элементах схемы выпрямителя..... | 22 |
| 3.3 Расчет токов на элементах схемы выпрямителя | 23 |
| 3.4 Выбор вентиляного трансформатора..... | 24 |
| 3.5 Выбор типа диода выпрямителя | 24 |
| 3.6 Определение числа параллельно соединенных диодов в вентильном плече выпрямителя | 25 |
| 3.7 Определение числа последовательно соединенных диодов в вентильном плече выпрямителя | 26 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А..... | 30 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б..... | 31 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 37 |
| ОГЛАВЛЕНИЕ | 38 |

Учебное издание

ПАЦКЕВИЧ Валерий Анатольевич
НАФТОЛЬКИЙ Михаил Владимирович
КОРСУН Юрий Анатольевич

РАСЧЕТ СИЛОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Пособие для выполнения расчетно-графической работы
по дисциплине «Электронная техника и преобразователи для студентов
электромеханических и электроэнергетических специальностей

Редактор ...
Технический редактор ...

Подписано в печать2022 г. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. Уч.-изд. л. Тираж 300 экз.
Зак. № _____. Изд. № 15.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный университет транспорта:
ЛИ № 02330/0133394 от 19.07.2004 г.
ЛП № 02330/0148780 от 30.04.2004 г.
246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.