Введение

В настоящее время в сетях передачи тока используется переменный ток частотой 50 Гц. Многие потребители электрической энергии, нуждающиеся в другом виде тока, на собственных электроустановках производят преобразование получаемого от энергетических систем тока в необходимый им вид.

Сейчас около 30% всей вырабатываемой в Российской Федерации электроэнергии преобразуется из энергии трёхфазного переменного тока преимущественно в энергию постоянного тока. Для этой цели применяются электрические преобразователи, основными элементами которых являются управляемые и неуправляемые электронные приборы.

Полупроводниковые приборы имеют ряд преимуществ как перед электровакуумными, так и перед и газоразрядными вентилями. Они компактны, имеет во много раз меньшие габариты и массу при равных токах. Падение напряжения в этих приборах мало зависит от тока, что обусловливает высокий к.п.д. преобразователей и возможность применения воздушного охлаждения в широком диапазоне токов вентилей.

В настоящее время на электроподвижном составе существуют два основных способа регулирования напряжения, подводимого к тяговым двигателям: за счет изменения момента открытия вентилей выпрямителя (электровозы ВЛ80 р, ВЛ85), а так же посредствам изменения подаваемого со вторичной обмотки трансформатора переменного напряжения (ВЛ80с, ВЛ80т).

Целью курсовой работы является расчет управляемого преобразователя, предназначенного для плавного регулирования напряжения на тяговом двигателе.

Данный курсовой проект содержит общие сведения для расчета преобразовательных устройств и анализа происходящих в них электромагнитных процессов. Все это послужит базой для проектирования выпрямительно-инверторных преобразователей электроподвижного состава.

**1. Расчет исходных данных для проектирования трансформатора**

**1.1 Определяем углы коммутации γ1 и γ2:**

Для расчета принимаем



рад



Угол сетевой коммутации γ2 определим по формулам:

,



где Id – ток нагрузки, Id = 1150 А;

Idн – номинальный ток нагрузки, Idн = 1150А;

uк – относительное значение напряжения короткого замыкания, uк = 0,13

γ2 = arccos (cos γ2) рад

Отсюда:



Подставляя, числовые значения в формулу получаем:

γ2 = arccos (0,909) = 0,429 рад

Угол фазной коммутации γ1 определим из выражения:



Получим:

рад



Определяем амплитудное значение Е2т и действующее значение Е2 ЭДС вторичной обмотки трансформатора

Условие получения заданного выпрямленного напряжения при номинальном режиме Udн:



Принимаем: α=αр, при Id = Idн

Величина Е2т определяется из условия по формуле:

,



где Udн – номинальное выпрямленное напряжение, Udн = 1050В:



Находим действующее значение ЭДС вторичной обмотки трансформатора по формуле:



Определяем коэффициент трансформации трансформатора КТ

,



где Е1 – ЭДС первичной обмотки трансформатора, В

Принимаем, что ЭДС первичной обмотки Е1 равна напряжению питания U:

Е1 = U1 = 25000 В

Подставим в формулу получим:



Определяем токи первичной и вторичной обмоток трансформатора в номинальном режиме

Токи обмоток рассчитываются для значения угла регулирования



Найдем ток:



Действующее значение тока первичной обмотки рассчитывается по формуле:



Найдем ток:



Определяем типовую мощность трансформатора в номинальном режиме.



Подставляя числовые значения в формулу получаем:

В⋅А



**2. Расчет и построение кривых тока протекающих через вентили во время коммутации**

**2.1 Определяем токи во время сетевой коммутации**

# Токи протекающие, через вентили VD1 и VD2 во время сетевой коммутации γ2 определяются по формулам:

Подставляя числовые значения в формулы, приведенные ниже формулы, получаем значения с интервалом времени Δt1, представленные в таблице 1



Результаты расчётов заносим в таблицу 1

Таблица 1 Токи во время коммутации

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| t | 0 | 0,0429 | 0,0858 | 0,1287 | 0,1716 | 0,2145 | 0,2574 | 0,3003 | 0,3432 | 0,3861 | 0,429 |
| ivd1 | 0 | 11,50 | 45,91 | 103,4 | 183,65 | 286,61 | 412,09 | 589,83 | 729,47 | 920,88 | 1150 |
| ivd2 | 1150 | 1138,5 | 1104,09 | 1046,6 | 966,35 | 863,39 | 737,91 | 590,17 | 420,53 | 229,12 | 0 |



Рисунок 1. Диаграмма сетевой коммутации

**2.2 Определяем токи фазной коммутации**

Рассчитаем несколько значений ivs1 и ivs2 с интервалом времени Δt2:



Результаты расчётов по формулам заносим в таблицу 2

Таблица 2 Токи во время фазной коммутации

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| T | 0 | 0,0137 | 0,0274 | 0,0411 | 0,0548 | 0,0685 | 0,0822 | 0,0959 | 0,1096 | 0,1233 | 0,137 |
| Ivs1 | 1150 | 1048,42 | 939,33 | 828,5 | 715,9 | 601,6 | 485,5 | 367,61 | 248,1 | 126,78 | 0 |
| Ivs2 | 0 | 101,58 | 210,67 | 321,5 | 434,1 | 548,4 | 664,5 | 782,9 | 901,9 | 1023,22 | 1150 |



Рисунок 2 Диаграмма фазной коммутации

**3. Расчет и построение характеристик выпрямителя**

**3.1 Расчет внешней характеристики выпрямителя**

Внешней характеристикой выпрямителя называется зависимость выпрямленного напряжения Ud от тока нагрузки Id при постоянном угле регулирования α

Расчет производим для трех значений угла α.

Расчёты производим по формуле:



Это выражение представляет собой уравнение прямой линии, поэтому для построения каждой внешней характеристики достаточно две точки

α = γ2 при Id = 0



1 α = γ2 при Id = Idн



α = αр при Id = 0



α = αр при Id = Idн



3.1.3 α = 1,4⋅αр при Id = 0



α = 1,4⋅αр при Id = Idн



Рисунок 3. Диаграмма внешней характеристики выпрямителя

**3.2 Расчёт регулировочной характеристики выпрямителя**

Расчёт производится по формуле для заданных значений угла регулирования αр при Id = 0 и Id = Idн



Результаты расчётов заносим в таблицу 3

Таблица 3 – Значения регулировочных характеристик выпрямителя

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| α, рад | 0,429 | 0,524 | 1,047 | 1,57 | 2,093 | 2,617 |
| Ud при Id = 0 | 1207 | 1180 | 949 | 633,10 | 313,7 | 85,06 |
| Ud при Id = Idн | 1133 | 1122 | 890,8 | 574,96 | 255,6 | 26,93 |



Рисунок 4. Регулировочная характеристика

**4. Выбор вентилей выпрямительной установки**

Определяем число параллельно включенных ветвей вентилей

При включении в плече выпрямителя nпар параллельных ветвей максимальный удельный ток короткого замыкания, проходящий через один вентиль рассчитывается по формуле:



Выразив получим:

,



где Iудпасп – ударный неповторяющийся ток в открытом состоянии, А

КН – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения тока по ветвям, КН = 0,9;

IКУД – ударный ток в момент возникновения короткого замыкания, А.

Ударным током называется амплитудное значение тока в диодах, которое достигается в момент ωt = π (t = 0,01 сек.) и рассчитывается по формуле:



где z – общее сопротивление контура короткого замыкания, Ом;

ϕ – угол сдвига между током короткого замыкания и напряжением вторичной обмотки трансформатора;

τ – постоянная составляющая контура короткого замыкания, t = 0,01 с

Общее сопротивление z находим по формуле:

,



где RT – активное сопротивление, Ом;

XT – индуктивное сопротивление, Ом

Активное сопротивление RT находим по заданной величине мощности потерь короткого замыкания PКЗ, которое определяется как 6–7% от типовой мощности трансформатора.

PКЗ = 0,06⋅S1, В⋅А

PКЗ = 0,06⋅1350000=81000В⋅А

,



Индуктивное сопротивление XT находим относительно напряжения короткого замыкания

,



где U2 – напряжение вторичной обмотки трансформатора, U2 = E2 =1283,06 В;

SТР – типовая мощность трансформатора, SТР = S1 = 1350000 В⋅А



Получаем:

Ом



Постоянную составляющую контура короткого замыкания τ найдем по формуле:

,



где LТ – индуктивность вторичной обмотки трансформатора, Гн;

,



где ω − угловая частота питающего напряжения,

ω = 2⋅π⋅F = 2⋅3,14⋅50 = 314 1/c



Угол сдвига фаз ϕ определяем по формуле:



рад



Подставив численные значения в формулу (4.1.3), получаем:



Для вентиля ударный неповторяющийся ток в открытом состоянии [1, прил. 1, прил. 2] равен: Iуд пасп =9000 А.

Подставляя численные значения в формулу, получаем:



Аналогичный расчет проводим для тиристора.

Принимаем число параллельных ветвей:

Для вентилей



Для тиристоров



**4.1 Проверка условий работы диодного и тиристорного плеча моста в длительном режиме**

,



где Kпер = 1,6;

KH – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение тока между параллельными ветвями, связанное с разбросом характеристик вентилей, KH = 0,9;

IП – предельный ток вентиля, А

Паспортный предельный ток вентиля определяется при температуре охлаждающего воздуха Т = 20° С. Поэтому заданный тип вентиля необходимо проверить на соответствие фактическому среднему допустимому прямому току.

Предельный средний прямой ток вентилей при заданных температурных условиях работы выпрямителя рассчитывается по формуле:



где Uто – пороговое напряжение вентиля в открытом состоянии, В;

КФ – коэффициент формы тока, зависящий от схемы выпрямителя, для мостовой схемы КФ = 1,57;

rτ − дифференциальное сопротивление в открытом состоянии, Ом;

Tjm – максимально допустимая температура р-n перехода, °С;

Та – температура охлаждающего воздуха, принимаем Та = 60° С;

Rt – сопротивление стоку тепла от р-n перехода в охлаждающую среду, С / Вт

Принимаем:

для не лавинных вентилей Тjm = 125° С;

для вентиля В500 для тиристора Т320

Uто = 1,1 В Uто = 1,05 В

rτ = 0,62 ⋅ 10−3 Ом rτ = 0,55 ⋅ 10−3 Ом

Rt = 0,1 С / Вт Rt = 0,22 С / Вт

Подставляя численные значения в приведенную выше, определим предельный ток и число параллельных ветвей:

для вентилей



окончательно принимаем для вентилей ;



для тиристоров



окончательно принимаем для тиристоров



Определим количество вентилей последовательно включенных в тиристорном и диодном плече моста

Количество вентилей последовательно включенных в тиристорном и диодном плече моста определим по формуле:

,



где Uв макс – максимальное обратное напряжение, воздействующее на вентильное плечо с учетом бросков и колебаний напряжения в сети, В;

К − коэффициент неравномерности распределения напряжения по вентилям, К = 0,8;

Uп – паспортное значение допустимого обратного напряжения, В

Принимаем 10-ый класс для вентиля и для тиристора:

Uп = 1000 В-для вентиля,

Uп = 1000 В-для тиристора

Величина Uв макс определяется с учётом коммутационных перенапряжений по формуле:

,



где Кк – коэффициент, учитывающий коммутационные перенапряжения,

Кк=1,2;

Кс – коэффициент, учитывающий возможное повышение напряжения в контактной сети, Кс = 1,16

Получим:



И для вентилей и для тиристоров принимаем



Расчет параметров защитных элементов выпрямительной установки.

Сопротивление шунтирующих резисторов последовательно соединённых вентилей определяем по формуле:

,



где m – количество последовательно включенных вентилей, m = 5;

Iо – максимальный обратный импульсный ток вентиля, А

Io = 0,03 А – для вентиля;

Io = 0,03 А – для тиристора

Для исключения возможности попадания бросков перенапряжения на закрытые вентили дополнительно, параллельно шунтирующим резисторам, подключаются демпфирующие цепочки СШ RД.

Значение емкости СШ определим по формуле:

,



где к = 0,9 – коэффициент неравномерного распределения напряжения

Найдем значения защитных элементов для вентиля и тиртистора:

Ом



Диодное плечо выпрямительной установки с защитными элементами показано на рисунке 5

Тиристорное плечо выпрямительной установки с защитными элементами показано на рисунке 6.



Рисунок 5. Диодное плечо моста выпрямителя с защитными элементами



Рисунок 6. Тиристорное плечо моста выпрямителя с защитными элементами

**5. Расчёт индуктивности цепи выпрямленного тока**

Определим амплитудное значение первой гармонической составляющей выпрямленного напряжения

Расчет ведется для значения α+γ1, равного заданному значению угла регулирования αр



где а и b – коэффициенты ряда Фурье



a1 = -670,7



b1 = −76,01

Получаем:



Рассчитаем индуктивность цепи выпрямительного тока

Расчет ведем для заданного значения Кп и Id = Idн

,



где f = 50 Гц – частота питающего напряжения;

Кп = 0,25 – коэффициент пульсации тока

Получаем:

**6. Силовая схема и временные диаграммы**



**7. Система управления выпрямителем**

**7.1 Построение структурной схемы управления и временных диаграмм**

Управляющие импульсы, подаваемые на тиристоры, вырабатываются системой управления выпрямителем. Функциональная схема одного из вариантов выполнения системы и временные диаграммы, иллюстрирующие её работу, приведены на рисунке 8.

Генератор пилообразного напряжения ГПН, формирует линейно изменяющееся напряжение, которое подается на один из входов компаратора К. На второй вход поступает управляющее напряжение Uупр, косвенно задающее величину угла управления. В момент, когда линейно возрастающее напряжение UГПН сравнивается с Uупр, на выходе компаратора появляется импульс напряжения uк, поступающий на вход формирователя Ф. На выходе формирователя в каждый полупериод образуются импульсы UФ по переднему фронту компаратора. Величина угла α, при этом, определяется величиной напряжения Uупр. Этот импульс должен проходить в один полупериод на тиристор VS1, а в другой – на тиристор VS2. Для разделения импульсов формирователя UФ по полупериодам в системе используются два однополупериодных выпрямителя ОПВ1 и ОПВ2, и логические элементы И. Высокий уровень напряжения на выходе элемента И будет тогда, когда на обоих его входах также будет напряжение высокого уровня. Из диаграмм на рисунке 8 следует, что импульс управляющего напряжения, например, Uу1 формируется только в первом полупериоде, когда на логический элемент И1 одновременно подаются напряжения UОПВ и UФ. Аналогично формируется управляющий импульс Uу2 во втором полупериоде. Далее импульсы усиливаются выходными усилителями ВУ1 и ВУ2 и через импульсные трансформаторы ИТ1 и ИТ2 подаются на управляющие электроды тиристоров. Трансформаторы обеспечивают гальваническую развязку цепей управления и высоковольтных цепей. Число вторичных полуобмоток трансформатора ИТ должно соответствовать количеству последовательно включённых тиристоров в одном плече моста.

**7.2 Расчёт параметров выходного усилителя**

Ток одной вторичной обмотки трансформатора найдем по формуле:

,



где n – число параллельно включенных ветвей вентилей;

IУПРСТ – отпирающий постоянный ток управления, IУПРСТ = 0,4 А

А



Суммарный ток вторичных обмоток трансформатора определим по формуле:

,



где m – число последовательно включённых тиристоров

А



Ток транзистора усилителя выбираем по максимальному напряжению между эмиттером и коллектором UКЭ макс и импульсному току коллектора IКИ макс.

,



где КТ – коэффициент трансформации импульсного трансформатора

Принимаем КТ = 4

А



По рекомендации [2] выбираем транзистор КТ815Г со следующими параметрами:

Максимальное напряжение коллектор – эмиттер: UКЭ макс = 80 В;

Импульсный ток коллектора: IКИ макс = 3 А;

Коэффициент усиления: h21э =70;

Обратный ток коллектора: Iко = 0,06 мкА.

Во время разряда конденсатора ток IК определяет сопротивление R1 усилителя и определяется по формуле:

,



Через этот же резистор осуществляется разрядка конденсатора. Максимальное значение зарядного тока определим как:



Определим сопротивление резистора R1:



где Еk – напряжение питания выходного усилителя, Ek = 60 В



Определим полуволну разрядного тока:

,



Определим емкость конденсатора:

,



где То – период собственных колебаний контура LC



где tВКЛ – наибольшее время включения, tВКЛ = 25 мкс



Определим индуктивность первичной обмотки трансформатора:

,



где ω0 – собственная частота колебательного контура, 1 / c



Получаем:



мкГн



Определим ток базы:



Принимаем:

h21э =70;

Получаем:



Согласно [1] отпирающее постоянное напряжение имеет величину 5,5 В, поэтому для открытия транзистора сопротивление определим:



,



где UКЭ нас – Напряжение насыщения коллектор-эмиттер, UКЭ нас = 0,2 В

Получаем:

Ом



Входное запирающее напряжение определим по формуле:

,



где UЭБ З – отрицательный потенциал, В;

Согласно [1] UЭБ З = 0,2 В

Получаем:



**Заключение**

Данный курсовой проект содержит общие сведения для расчета преобразовательных устройств и анализа происходящих в них электромагнитных процессов. Все это послужит базой для проектирования выпрямительно-инверторных преобразователей электроподвижного состава.

Общеизвестными недостатками полупроводниковых приборов являются малая перегрузочная способность и высокая чувствительность к перенапряжениям. Однако из данного курсового проекта следует, что правильный выбор числа необходимых вентилей с учётом возможных перегрузок и перенапряжений позволяет получить преобразователи, существенно превосходящие преобразователи на электровакуумных и газоразрядных вентилях.