

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИДО

С.И. Качин

« 30 » 03 2009г.

СИЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Методические указания к выполнению курсовой работы
для студентов специальности 140211 «Электроснабжение»
Института дистанционного образования



УДК 658.26:621.32

Силовые преобразователи в электроснабжении. Расчет режимов работы выпрямителя: Методические указания к выполнению курсовой работы для студентов спец. 140211 «Электроснабжение» ИДО / сост. Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев.– Томск: Изд. ТПУ, 2009. – 28 с.

Методические указания к выполнению курсовой работы рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» 2 октября 2008 года.

Зав. кафедрой ЭСПП

доктор технических наук, профессор _____ Б.В. Лукутин

Аннотация

Методические указания по выполнению курсовой работы по дисциплине «Силовые преобразователи в электроснабжении» предназначены для студентов специальности 140211 «Электроснабжение» ИДО. Курсовая работа выполняется в восьмом семестре. Форма отчетности – дифференцированный зачёт.

Приведено содержание основных этапов курсовой работы, указан состав текстового раздела курсовой работы. Приведены варианты заданий для курсовой работы.

1. ЗАДАЧИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Задачей курсовой работы является обучение студентов основным методам расчета энергетических характеристик силовых полупроводниковых преобразователей и их влияние на качество напряжения питания сети на примере наиболее характерного устройства – выпрямителя.

При выполнении курсовой работы студенты закрепляют теоретические знания практическим выполнением расчетов рабочих режимов управляемого выпрямителя, выбором силовых вентилялей и анализом их температурного режима, расчетом искажений токов и напряжений питающей сети и выбором фильтрокомпенсирующих устройств. Расчет коэффициента использования мощности питающего трансформатора и потерь электроэнергии при выпрямлении переменного тока позволяет глубже изучить эффективность процесса преобразования энергии.

2. ТЕМАТИКА КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Темой курсового проекта является управляемый выпрямитель, выполненный по трехфазной мостовой схеме. Выпрямитель может использоваться для питания якорных цепей двигателей постоянного тока в электроприводах станков и других машин, а также может использоваться в качестве регулятора напряжения в цепях с активной или активно-индуктивной нагрузкой.

В задании на курсовую работы указываются следующие данные.

1. Схема выпрямления – трехфазная мостовая. Выпрямитель управляемый. Нагрузка активно-индуктивного характера, ток нагрузки идеально сглажен. Диапазон изменения углов управления вентилями

$$\alpha = 0 - \pi / 2.$$

2. Параметры схемы в относительных единицах (за базисные величины принимаются параметры номинального режима схемы):

- действующее значение фазной э.д.с. вторичной обмотки трансформатора $E_o = 1$ [о. е];
- индуктивное сопротивление фазы питающего трансформатора x_ϕ [о.е];
- активное сопротивление нагрузки выпрямителя R_n [о. е];

3. Параметры схемы в именованных единицах:

- действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора $U_{фн}$ [В];
- номинальный ток нагрузки I_d [А], соответствующий расчетному в о. е.

4. Режим нагрузки цепи постоянного тока: длительный или повторно-кратковременный.

Условия охлаждения силовых вентилялей: температурный диапазон окружающей среды, тип охлаждения.

Вариант задания для выполнения курсового проекта соответствует порядковому номеру студента в группе. В соответствии с таблицей *вариантов заданий* необходимо заполнить *Лист задания по курсовой работе* (Приложение 1 Лист задания по курсовой работе и Варианты заданий).

3. СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа для своего выполнения и оформления требует от студента около 70 часов самостоятельной работы. Расчеты оформляются в виде пояснительной записки объемом 25-30 страниц формата А4.

Рекомендуется следующая структура курсовой работы:

- титульный лист;
- техническое задание на специальном бланке;
- вводная часть;
- составление структурной схемы системы фазового управления выпрямителем;
- расчет номинального режима работы выпрямителя при угле управления вентилями $\alpha = 0$;
- построение временных диаграмм работы выпрямителя по расчетным данным и графическое определение пульсаций выпрямленного напряжения для $\alpha = 0$;
- расчет и построение регулировочной и внешних характеристик выпрямителя для режима номинальной нагрузки;
- расчет энергетических характеристик выпрямителя: K_u , K_I , K_p , $\cos \varphi_1$ и определение их зависимости от α ;
- расчет гармонического состава и коэффициентов искажения синусоидальности фазных токов и напряжений выпрямителя для номинального режима;
- расчет баланса мощностей выпрямителя;
- выбор вентиля выпрямителя и проверка их теплового режима;
- расчет параметров силового фильтра.

Образец листа задания по курсовой работе показан в приложении 1.

4. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ФАЗОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Наиболее распространенным способом регулирования углов включения тиристорov является вертикальное управление. Принцип вертикального управления заключается в сравнении синхронизирующего напряжения пилообразной формы с управляющим напряжением. Синхронизирующее напряжение формируется синхронно и синфазно с сетевым напряжением выпрямителя. В результате точка сравнения синхронизирующего U_c и управляющего U_y сигналов определяет соответствующее значение угла управления тиристором.

Канал управления плечом трехфазного мостового выпрямителя показан

на рис. 1.

На рисунке обозначены: **ГПН** – генератор пилообразного напряжения, **К** – компаратор, **ФИ** – формирователь импульса, **У** – усилитель.

Аналогичные каналы управления имеются и в фазах В, С.

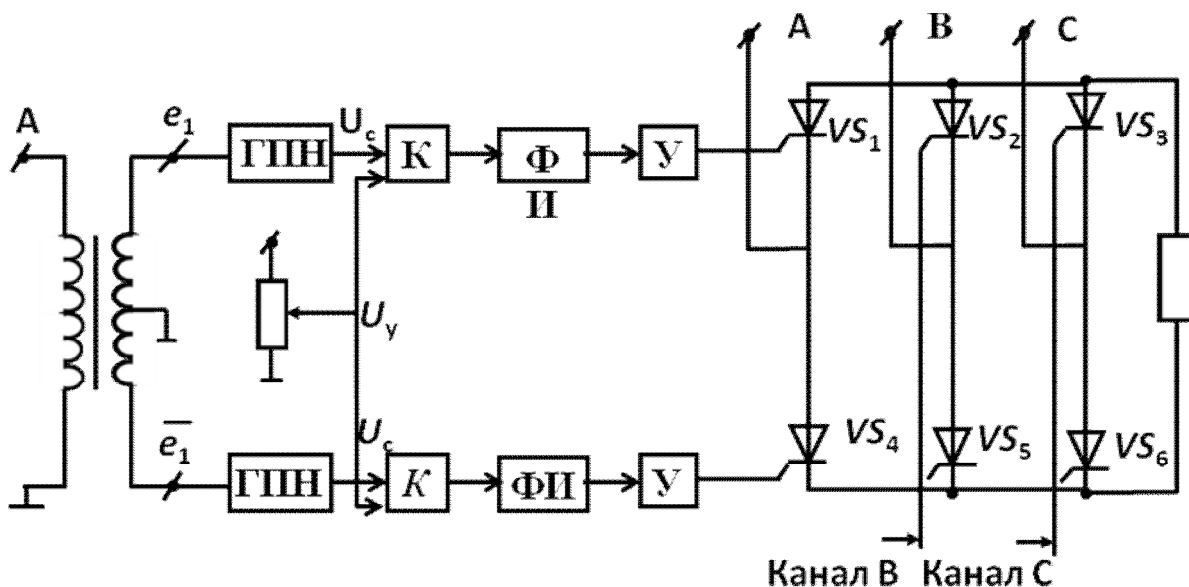


Рис. 1. Блок –схема фазового управления вентилями фазы А выпрямителя

5. РАСЧЕТ РАБОЧЕГО РЕЖИМА ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Номинальный режим выпрямителя характеризуется номинальной нагрузкой и углом управления вентилями $\alpha = 0$. С изменением α происходит регулировка выходного напряжения и режим работы выпрямителя изменяется [3, стр. 44; 4, стр. 94].

Расчетная схема выпрямителя приведена на рис. 2.

Анализ физических процессов и энергетических соотношений в схемах выпрямления переменного тока проводится при следующих общепринятых допущениях.

1. ЭДС питающего трансформатора составляют трехфазную симметричную систему:
$$e_i = E_m \sin\left(\omega t - i \frac{2\pi}{3}\right); i = 0, 1, 2.$$

2. Нагрузка выпрямителя имеет индуктивный характер и ток нагрузки I_d идеально сглажен.

3. Фазное сопротивление трансформатора X_ϕ принимается постоянным во всех режимах работы. Активным сопротивлением фазы пренебрегаем ввиду его малости.

4. Вентили представляются идеальными ключами, срабатывающими когда напряжения на аноде и катоде равны.

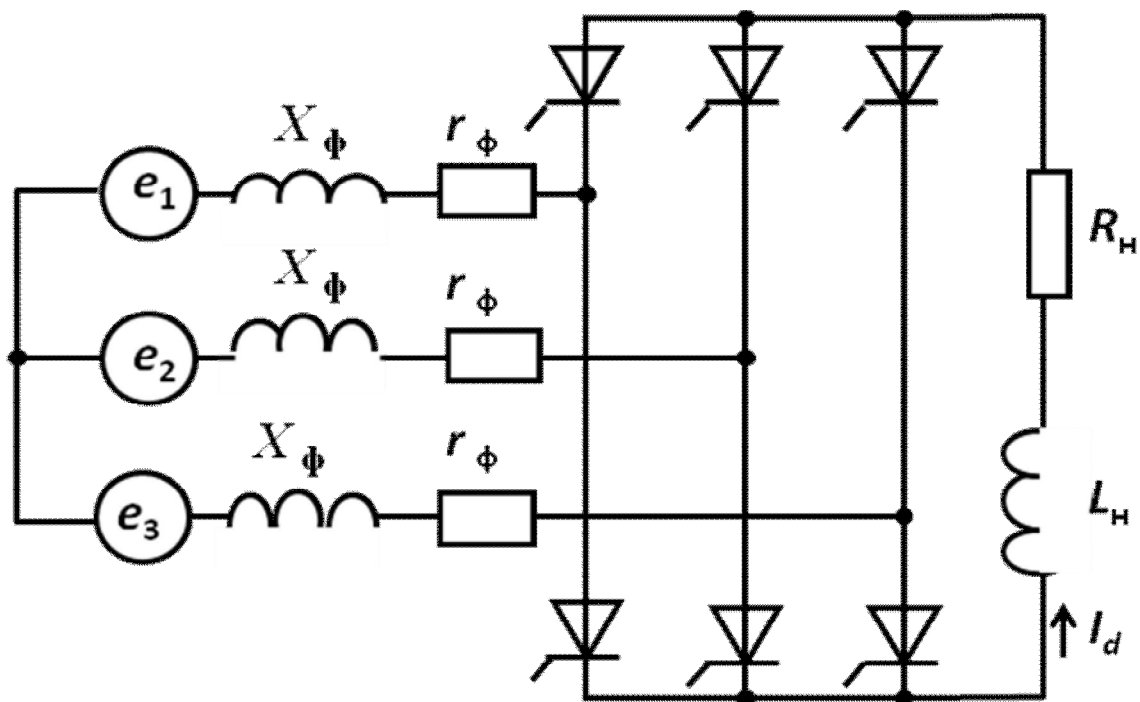


Рис. 2. Расчетная схема выпрямителя

В работе выпрямителя можно выделить два режима, отличающиеся количеством одновременно работающих вентиляей.

1. Внекоммутационный - в работе участвуют два вентиля и, соответственно, две фазы питающего трансформатора.

2. Коммутационный режим - в работе участвуют под действием ЭДС самоиндукции индуктивности X_ϕ три и более фаз и, соответственно три и большее количество вентиляей. В этом режиме происходит коммутация тока из одной фазы в другую. При нормальной загрузке выпрямителя в коммутационном процессе одновременно участвуют три фазы и длительность коммутации не превышает $\gamma \leq 60^\circ$.

Временные диаграммы работы схемы выпрямления в нормальном режиме приведены на рис. 3.

Угол коммутации управляемого выпрямителя для рассматриваемого случая может быть определен по формуле

$$\gamma = \arccos\left(\cos \alpha - \frac{2 X_\phi I_d}{\sqrt{3} E_m}\right) - \alpha, \quad (1)$$

где α - угол управления вентилями.

Величина выпрямленного напряжения

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} E_m [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)]. \quad (2)$$

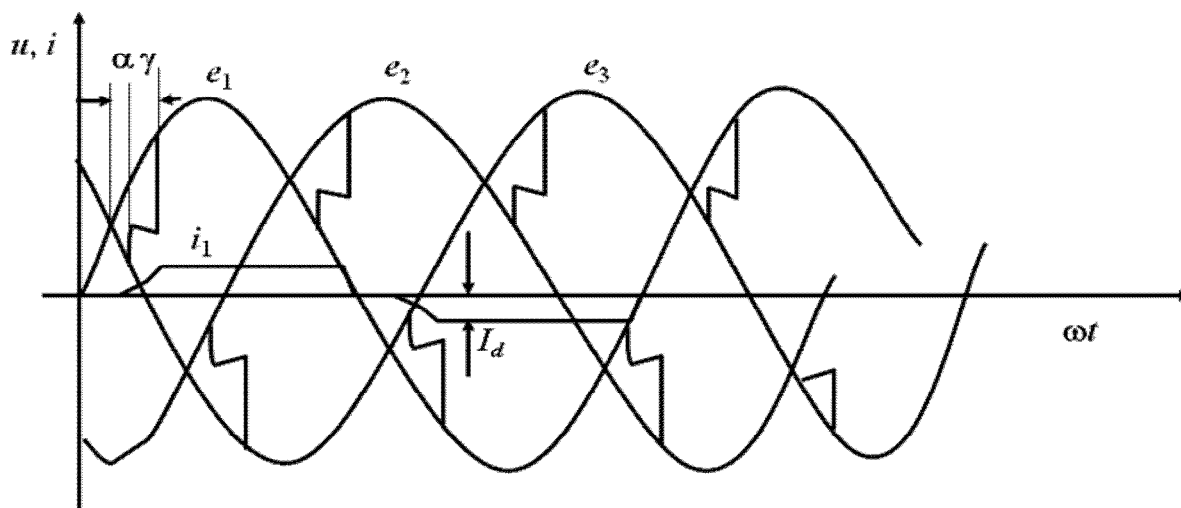


Рис. 3. Эпюры токов и напряжений трехфазного мостового выпрямителя, работающего с углом управления тиристором α

Определение интегральных энергетических характеристик выпрямителя позволяет ввести коэффициенты преобразования схемы по току, напряжению, мощности. Обычно, эти коэффициенты определяются для линеаризованной кривой фазного тока, которая принимается трапецеидальной. Тогда действующее значение фазного тока трансформатора, питающего выпрямитель равно

$$I_{\partial} = I_d \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{\gamma}{3\pi}}, \quad (3)$$

а коэффициент преобразования схемы выпрямления по току

$$K_1 = \frac{I_{\partial}}{I_d} = \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{\gamma}{3\pi}}. \quad (4)$$

Данный коэффициент, при принятых допущениях, не зависит от угла управления α . С ростом угла коммутации γ численное значение K_1 уменьшается.

Коэффициент преобразования мостового выпрямителя по напряжению равен

$$K_U = \frac{E_{\partial}}{U_d} = \frac{2\pi}{3\sqrt{6} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)]}. \quad (5)$$

Зная коэффициенты преобразования выпрямителя по току и напряжению, можно определить коэффициент использования мощности питающего трансформатора

$$K = \frac{P}{S} = \frac{I_d U_d}{3 I_\partial E_\partial} = \frac{1}{3 K_1 K_U}. \quad (6)$$

Зависимость величины выпрямленного напряжения U_d от тока нагрузки I_d при постоянном значении угла управления вентилей α определяется внешней характеристикой выпрямителя

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \left(\cos \alpha - \frac{X_\phi I_d}{\sqrt{3} E_m} \right). \quad (7)$$

Графически внешние характеристики для нормального двух-трехвентильного режима работы выпрямителя при разных α представляют собой семейство прямых, параллельных друг другу.

Расчет режима работы выпрямителя целесообразно осуществлять методом последовательных итераций до получения заданной погрешности сходимости численных величин выпрямленного тока, напряжения и угла коммутации γ .

В уравнении, связывающем длительность коммутационного процесса γ с параметрами схемы,

$$\gamma = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{2 X_\phi I_d}{\sqrt{3} E_m} \right) - \alpha$$

переменной является величина I_d . Выпрямленный ток I_d , в свою очередь, определяется напряжением U_d , которое также зависит от γ .

Для определения параметров рабочего режима выпрямителя целесообразно воспользоваться итерационными методами расчета. Например, можно в качестве первого приближения принять $\gamma = 0$ и определить величину выпрямленного напряжения

$$U_{d1} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \cdot \cos \alpha.$$

Тогда, соответствующее значение тока нагрузки для первой итерации

$$I_{d1} = \frac{U_{d1}}{R_H}.$$

что дает возможность определить в первом приближении угол γ_1 . Полученное значение γ_1 дает возможность определить уточненную величину постоянной составляющей выпрямленного напряжения

$$U_{d2} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \cdot \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma_1)}{2}.$$

Последнее выражение позволяет получить уточненное значение тока

$$I_{d2} = \frac{U_{d2}}{R_H},$$

что, в свою очередь, позволяет уточнить γ_2 и т. д. Итерации продолжаются до тех пор, пока значение параметров (например, угла γ) на предыдущем и последующем этапах расчета будут отличаться на величину, определяющую погрешность вычислений, например 5 %.

Найденный таким образом режим работы выпрямителя позволяет определить все остальные параметры и энергетические характеристики [3, стр. 52; 5, стр.65]: коэффициент мощности выпрямителя $\cos \varphi \cong \cos \gamma/2$, полную мощность, потребляемую выпрямителем, мощность в цепи нагрузки выпрямителя.

Расчет номинального режима работы выпрямителя производится для значений $\alpha = 0$ и заданного значения R_H . Расчет рекомендуется производить в относительных единицах.

Используя расчетное значение γ и известные параметры напряжения питающей сети и тока нагрузки выпрямителя строятся в масштабе временные диаграммы напряжения в нагрузке выпрямителя и по ним определяется величина его пульсаций как

$$\varepsilon = 2 \cdot \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}},$$

где E_{\max} и E_{\min} соответственно максимальное и минимальное мгновенные значения кривой выпрямленного напряжения.

6. РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ И ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Изложенная выше методика расчета режимов работы выпрямителя позволяет рассчитать его регулировочную характеристику по выражению (2). Для этого необходимо задаться несколькими значениями углов управления α , для каждого из которых повторяется расчет соответствующего рабочего режима выпрямителя по методике, изложенной в предыдущем разделе, и строится графическая зависимость $U_d = f(\alpha)$ при условии $E_m = \text{const}$, $R_H = \text{const}$.

Внешние характеристики $U_d = f(I_d)$ при $\alpha = \text{const}$ легко определяются

выражением (7). Данное выражение справедливо для нормального двух-трехвентильного режима работы выпрямителя, т.е. для значений угла коммутации $\gamma < \frac{\pi}{3}$. Соответственно внешняя характеристика выпрямителя при

$\alpha = 0$ ограничивается значением тока I_d , при котором $\gamma = \frac{\pi}{3}$. Этот ток можно определить из выражения (1), решив его относительно I_{dmax} . Поскольку трехвентильный режим мостового выпрямителя при $\alpha \neq 0$ наступает при больших токах, или не наступает совсем, то для внешних характеристик с другими значениями α найденное значение I_{dmax} не приведет к выходу выпрямителя из зоны нормальных нагрузок.

7. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Коэффициенты преобразования выпрямителя K_u , K_I , K_p могут быть определены по выражениям (4), (5), (6). Значения параметров I_d , I_d , U_d для различных значений α следует взять из предыдущего раздела работы. Подсчитав значения коэффициентов преобразования для нескольких значений α , можно построить графические зависимости K_u , K_I , $K_p = f(\alpha)$.

Фазовый сдвиг первой гармоники фазного тока выпрямителя относительно ЭДС приближенно определяется как $\gamma_1 = \alpha + \gamma/2$. Задавая значения α и имея из предыдущих расчетов соответствующие значения углов коммутации γ для заданных α отыскиваем зависимость $\cos \varphi_1 = f(\alpha)$.

8. РАСЧЕТ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ФАЗНЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Индивидуальное задание состоит в определении коэффициента гармоник напряжения сети, питающей управляемый выпрямитель. Исходными данными служат параметры номинального режима выпрямителя, рассчитанные в предыдущем задании.

Определение степени искажения кривой напряжения осуществляется по известному гармоническому спектру несинусоидального, в частности, трапецеидального, тока, потребляемого вентильной нагрузкой.

При принятых допущениях кривая фазного тока трехфазного мостового выпрямителя представляет собой криволинейную трапецию. При пренебрежении активным сопротивлением фазы, закон изменения тока на интервале коммутации представляет собой синусоидальную зависимость. Достаточно простое математическое описание кривой фазного тока позволяет получить аналитические зависимости его гармонического состава [5, стр. 339]

$$I_{km} = \frac{3E_m}{\pi k X_\phi} \sqrt{K_{k1} + K_{k2} \sin^2 \psi},$$

где I_{km} - амплитудное значение k -ой гармоники, $k = 1, 5, 7, 11, 13, 17, \dots$;

$$\psi = \alpha + \frac{\gamma}{2};$$

коэффициенты

$$K_{\kappa 1} = \left[\frac{\sin(K-1)\frac{\gamma}{2}}{K-1} - \frac{\sin(K+1)\frac{\gamma}{2}}{K+1} \right]^2$$

$$K_{\kappa 2} = 4 \left[\frac{\sin(K-1)\frac{\gamma}{2}}{K-1} \cdot \frac{\sin(K+1)\frac{\gamma}{2}}{K+1} \right].$$

Амплитудное значение основной гармоники тока трансформатора имеет вид

$$I_{1m} = \frac{3E_m}{2\pi X_\phi} \sqrt{(\gamma - \sin \gamma)^2 + 4\gamma \sin \gamma \sin^2 \psi}.$$

Угол сдвига фаз между ЭДС и основной гармоникой тока трансформатора определяется соотношением

$$\varphi_1 \approx \psi = \alpha + \frac{\gamma}{2}.$$

Степень искажения формы тока определяется коэффициентом гармоник по току

$$K_{r1} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{km}^2}}{I_{1m}},$$

где I_{km} - амплитуды высших гармоник; I_{1m} - амплитуда первой гармоники фазного тока.

Несинусоидальность тока, потребляемого выпрямителем, вызывает искажение формы напряжения сети соизмеримой мощности. Степень искажения напряжения оценивается коэффициентом гармоник по напряжению

$$K_{ru} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_{km}^2}}{E_m - U_{1m}},$$

где U_{km} - амплитуды высших гармоник напряжения, U_{1m} - амплитуда первой гармоники напряжения, падающего на сопротивление $Z_{\phi 1}$.

Стандарты на качество напряжения устанавливают величину $K_{ГУ}$ в сетях 0,38 кВ до 12 %.

Искажения сетевого напряжения вентильной нагрузкой возникают за счет падения напряжений на внутреннем сопротивлении сети. Для количественной оценки искажений выпрямитель в электрической системе обычно рассматривается как генератор гармоник тока. Источник суммарного тока всех гармоник $I_{\Sigma k}$ нагружен на эквивалентное сопротивление питающей сети $Z_{\phi k} = r_{\phi} + jkx_{\phi}$, реактивная составляющая которой зависит от частоты. Тогда ток k -ой гармоники в питающей сети создает падение напряжения

$$U_k = I_k (r_{\phi} + jKx_{\phi}).$$

Суммарное напряжение от высших гармоник в сети можно определить, используя принцип наложения, предварительно рассчитав падение напряжения от каждой гармоники тока. Определив содержание высших гармоник в напряжении питающей сети, находим коэффициент гармоник $K_{ГУ}$. Как правило, расчет ведется для гармоник не выше $k = 13$, так как амплитуды токов и напряжений более высоких порядков относительно малы. Кроме того, эквивалентное сопротивление питающей сети существенно уменьшается за счет влияния емкостей кабеля и другого оборудования.

Исходными данными для расчета являются параметры номинального режима, рассчитанные в предыдущем задании в соответствии с данными табл. 2. Основным параметром для расчета $I_{км}$ является величина угла коммутации при известных значениях E_m , α , x_{ϕ} . Активное сопротивление сети принимается равным $|0,1x_{\phi}| = |r_{\phi}|$.

Расчет начинается с определения гармонического состава фазного тока сети, питающей выпрямитель. Далее, по известному спектру тока определяется падение напряжения на сопротивлении сети от каждой гармоники тока и находится $K_{ГУ}$.

Расчет удобно представить в виде таблицы 1.

Таблица 1

Номер гармоник K	K_{k1}	K_{k2}	$I_{км}$	$Z_{\phi k}$	$U_{mk} = I_{км} Z_{\phi k}$
1					
5					
7					
11					
13					

По данным табл. 1 находятся значения коэффициентов гармоник для тока и напряжения

$$K_{rl} = \frac{\sqrt{I_{5m}^2 + I_{7m}^2 + I_{11m}^2 + I_{13m}^2}}{I_{1m}},$$

$$K_{ru} = \frac{\sqrt{U_{5m}^2 + U_{7m}^2 + U_{11m}^2 + U_{13m}^2}}{E_m - U_{1m}}.$$

9. БАЛАНС МОЩНОСТЕЙ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Полная мощность, потребляемая выпрямителем складывается из активной мощности первой гармоники P_1 , реактивной мощности Q_1 и мощности искажений N :

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + N^2}.$$

Выразив действующие значения токов и напряжений через коэффициенты гармоник и первую гармоническую составляющую, получим

$$I_d = I_{1d} \sqrt{1 + K_{rl}^2};$$

$$U_d = U_{1d} \sqrt{1 + K_{ru}^2};$$

$$S = U_{1d} I_{1d} \sqrt{1 + K_{rl}^2 + K_{ru}^2 + K_{rl}^2 \cdot K_{ru}^2}.$$

Активная мощность первых гармонических составляющих на фазу

$$P_1 = I_{1d} \cdot U_{1d} \cos \varphi_1,$$

реактивная - $Q_1 = U_{1d} I_{1d} \sin \varphi_1$.

Соответственно, мощность искажений определится как

$$N = \sqrt{S^2 - P_1^2 - Q_1^2}.$$

10. ВЫБОР ВЕНТИЛЕЙ ВЫПРЯМИТЕЛЯ И РАСЧЕТ ИХ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Расчет условий работы вентиля выпрямителя следует проводить для режима максимальной нагрузки при $\alpha = 0$.

Исходными данными для расчета являются заданный ток нагрузки и режим работы выпрямителя. Расчет производится в именованных единицах.

Порядок расчета следующий.

1. По известному току I_d определяются среднее I_{cp} и действующее значение тока вентиля

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_d}{K_a}; I_{\partial} = K_{\phi} I_{\text{ср}}.$$

Коэффициенты амплитуды K_a и формы K_{ϕ} определяются по справочнику [1, стр. 63].

2. По среднему значению тока $I_{\text{ср}}$ предварительно выбирается тиристор [1, стр. 68] и, соответственно, его параметры: пороговое напряжение U_o , динамическое сопротивление R_d , установившиеся и переходные тепловые сопротивления при выбранных условиях охлаждения. Предпочтительным способом охлаждения для установок относительно небольшой мощности является естественное воздушное охлаждение.

3. Подсчитывается величина мощности потерь в тиристоре

$$\Delta P = U_o I_{\text{ср}} + I_{\partial}^2 R_d.$$

4. Определяется температура полупроводниковой структуры прибора при известной температуре окружающей среды $\theta_c = 20^{\circ}\text{C}$.

$$\Theta_{pn} = \Theta_c + R_T \Delta P$$

где R_T - общее установившееся тепловое сопротивление в статике.

5. Подсчитанное значение Θ_{pn} сравнивается с максимально допустимой температурой для данного полупроводникового прибора. Если фактическое значение Θ_{pn} меньше допустимого, то тиристор выбран правильно. Если нет, то следует повторить расчет для тиристора большей мощности или изменить условия охлаждения.

6. Проводится проверка теплового режима при повторно-кратковременном режиме работы. В этом случае тепловой режим выпрямителя будет представлять собой последовательность переходных режимов нагревания и охлаждения вентиля. Температура θ_{pn} определяется для длинной серии импульсов мощности потерь ΔP по выражению [1]:

$$\Theta_{pn} = \Theta_c + \left[\frac{\tau R_T}{T} + \left(1 - \frac{\tau}{T} \right) r_{\tau+1} - r_T + r_{\tau} \right] \Delta P,$$

где T – периодичность подключения нагрузки [с], τ - время подключения нагрузки [с], $r_{\tau+1}$, r_T , r_c - переходные тепловые сопротивления, соответствующие отрезкам времени $\tau + T$, T , τ .

Класс полупроводникового прибора по напряжению соответствует определенному повторяющемуся напряжению. Повторяющееся напряжение –

это максимально допустимое мгновенное значение напряжения, прикладываемого к полупроводниковому прибору в обратном или прямом закрытом направлении.

Повторяющееся напряжение является функцией схемы вентиляльного преобразователя и напряжения питающей сети. Исходя из известного питающего напряжения, выбирается класс тиристора в соответствии с рекомендациями [1, с. 42].

11. РАСЧЕТ СИЛОВОГО ФИЛЬТРА

Основой энергетических фильтров высших гармонических напряжений являются последовательные индуктивно-емкостные резонансные цепи, настроенные на соответствующие номера гармоник. Резонансные L - C фильтры обычно настраиваются на 5, 7, 11, 13 гармоники и позволяют существенно снизить степень искажений формы кривой сетевого напряжения, питающего выпрямитель. Структурная схема включения фильтров высших гармоник на фазу показана на рис. 4, где Z_ϕ – фазное сопротивление питающей сети, В – вентильная нагрузка, Z_5 , Z_7 , Z_{11} , Z_{13} – резонансные фильтры 5, 7, 11, 13 гармоник [5, стр. 346].

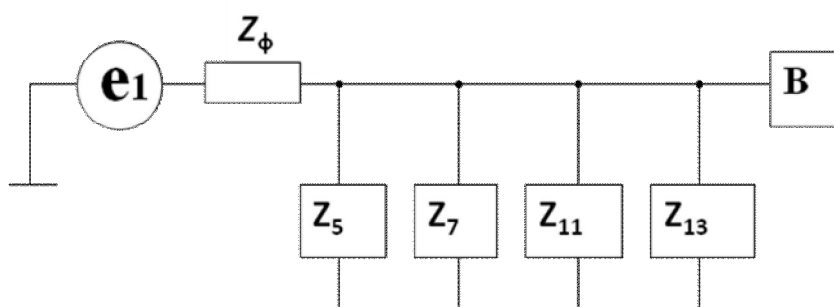


Рис. 4. Структурная схема включения резонансных фильтров высших гармоник

Расчет ведется в именованных единицах, для чего относительные значения гармоник фазных токов выражаются в Амперах. Действующее значение фазного тока определяется по заданному току I_d и подсчитанному значению K_I . Гармонические составляющие фазных токов в именованных единицах находятся по известному из предыдущих расчетов гармоническому составу в кривой тока в относительных единицах:

$$I_\partial = I_d \cdot K_I [\text{A}]; \quad I_{\kappa\partial} = I_\partial \cdot I_\kappa [\text{A}]$$

Последовательность расчета элементов фильтра следующая.

1. Определяется мощность батареи конденсаторов на фазу

$$Q_k = 1,3 U_{\text{ф}\delta} \cdot I_{k\delta}$$

где $U_{\text{ф}\delta}$ - действующее значение фазного напряжения [В], $I_{k\delta}$ - действующее значение тока k -ой гармоники [А].

2. Учитывается уменьшение реактивной мощности конденсаторов при уменьшении сетевого напряжения. Учет производится с помощью коэффициента β , значения которого для 5,7 гармоник принимаются 0,83-0,82; для 11, 13 гармоник - 0,77-0,765. Тогда $Q_{\text{ф}} = \beta Q_k$.

3. Выбираем стандартные конденсаторы, ориентируясь по расчетной мощности. Для низковольтных сетей могут быть использованы конденсаторы типа КМ, основные характеристики которых приведены в табл. 2 [2].

Таблица 2

Тип конденсатора	Номинальное напряжение [В]	Типовая емкость [мкФ]	Типовая мощность [кВАр]	Предельное напряжение [В]
КМ 0,23-5-3	230	220	5,4	250
КМ 0,4-7-3	400	140	7,0	430
КМ 0,4-9-3	400	180	9,0	430
КМ 0,23-7-3	230	420	7,0	250
КМ 0,40-10-3	400	198	10,0	430
КМ 0,40-13-3	400	258	13,0	430

Для высоковольтных сетей справочные данные конденсаторов приведены в литературе [6 стр.229-230]. (См. Расчет и проектирование систем электроснабжения объектов и установок: учебное пособие/А.В. Кабышев, С.Г. Обухов. –Томск: Изд-во ТПУ, 2006 – 248 с.)

4. Определяем требуемое значение индуктивного сопротивления дросселя. Сопротивление выбранного конденсатора x_k емкостью C на k -ой гармонике определяется по формуле

$$x_k = \frac{1}{k2\pi Cf}$$

Тогда индуктивность дросселя получим из соотношения

$$x_L = x_k; L = \frac{x_k}{2\pi f_k}$$

Соответствующие расчеты проводятся для 5, 7, 11, 13 гармонических составляющих питающего напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Сахаров Ю.В. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник. - М.: Энергия, 1985.
2. Конденсаторы для повышения коэффициента мощности электроустановок переменного тока (косинусные): Промышленные каталоги. - М.: Информэлектро, 1994.
3. Лукутин Б.В. Силовые преобразователи электроэнергии. – Томск: Изд. ТПУ, 1997.
4. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Силовые преобразователи в электрообеспечении. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007.
5. Чиженко И.М., Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники: Учебное пособие для специальности «Промышленная электроника». – М.: Высшая школа, 1974.
6. Расчет и проектирование систем электроснабжения объектов и установок: учебное пособие/А.В. Кабышев, С.Г. Обухов. –Томск: Изд-во ТПУ, 2006 – 248 с.

Лист задания по курсовой работе и Варианты заданий

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЗАДАНИЕ

к курсовой работе «*Выпрямитель*»
по курсу «*Силовые преобразователи в электроснабжении*»
студенту ЭЛТИ гр. _____ Ф.И.О _____

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1. Схема выпрямления - **трехфазная мостовая. Выпрямитель управляемый.** Нагрузка **активно-индуктивного характера**, ток нагрузки **идеально сглажен**.
2. Параметры схемы в относительных единицах [о. е.] :
 - ✓ сопротивление нагрузки $r_n = \underline{\hspace{2cm}}$ [о. е.];
 - ✓ индуктивное сопротивление фазы питающего трансформатора $x_\phi = \underline{\hspace{2cm}}$ [о. е.];
 - ✓ действующее значение фазного напряжения трансформатора – $\underline{1}$ [о. е.];
 - ✓ угол управления тиристорами в номинальном режиме 0° .
3. Параметры в именованных единицах;
 - ✓ выпрямленное напряжение фазы вторичной обмотки трансформатора $U_d - \underline{\hspace{2cm}}$ В;
 - ✓ номинальный ток нагрузки выпрямителя, соответствующий расчетному в о.е.
 $I_d = \underline{\hspace{2cm}}$ [А]
4. Охлаждение **воздушное, естественное**, температура **+20°**.

Вопросы, подлежащие проработке

1. Построение блок-схемы системы фазового управления вентилями выпрямителя.
2. Расчет номинального рабочего режима выпрямителя.
3. Построение временных диаграмм работы выпрямителя по расчетным данным режима и графическое определение величины пульсаций выпрямленного напряжения при $\alpha = 0$.
4. Построение регулировочной и внешних характеристик выпрямителя для режима номинальной нагрузки.
5. Расчет энергетических характеристик выпрямителя: K_u , K_I , K_p , $\cos \varphi_2$ и определение их зависимостей от α .
6. Расчет гармонического состава и коэффициентов искажения синусоидальности фазных токов и напряжений выпрямителя при $\alpha = 0$.
7. Расчет баланса мощностей выпрямителя для $\alpha = 0$.
8. Выбор вентиля выпрямителя и проверка их теплового режима в статическом режиме и в повторно-кратковременном режиме _____ **вкл./час**, считая **длительность включенного и выключенного состояний одинаковыми**.
9. Расчет параметров силового фильтра.

Руководитель работы,
_____ кафедры ЭСПП _____

Варианты заданий

№	Сопротивление нагрузки r_n [о. е.]	Индуктивное сопротивление фазы питающего трансформатора x_ϕ [о. е.]	Действующее значение фазного напряжения трансформатора [о. е.]	Выпрямленное напряжение фазы вторичной обмотки трансформатора U_d [В]	Номинальный ток нагрузки выпрямителя, соответствующий расчетному в о.е. I_d [А]	Количество вкл./час в повторно-кратковременном режиме (длительность включенного и выключенного состояний считать одинаковыми).
1.	2.6	0.16	1	380	190	490
2.	2.31	0.17	1	110	230	300
3.	2.32	0.11	1	380	150	220
4.	2.33	0.16	1	220	200	60
5.	2.34	0.2	1	6000	47	75
6.	2.35	0.13	1	660	100	600
7.	2.36	0.13	1	220	127	550
8.	2.37	0.14	1	6000	130	120
9.	2.4	0.11	1	220	250	450
10.	2.31	0.11	1	380	240	330
11.	2.32	0.1	1	110	610	210
12.	2.33	0.16	1	220	490	170
13.	2.34	0.14	1	3000	450	370
14.	2.35	0.11	1	660	785	145
15.	2.5	0.15	1	220	150	200
16.	2.36	0.12	1	380	600	105
17.	2.31	0.18	1	2000	21	340
18.	2.32	0.15	1	220	180	400
19.	2.33	0.1	1	5000	97	270
20.	2.34	0.12	1	220	210	290
21.	2.35	0.11	1	660	159	430
22.	2.36	0.13	1	2000	120	150
23.	2.37	0.09	1	660	1300	60
24.	2.32	0.09	1	220	400	40
25.	2.33	0.1	1	1000	20	550
26.	2.34	0.15	1	220	125	490
27.	2.35	0.09	1	1000	1500	100
28.	2.36	0.1	1	380	700	80
29.	2.4	0.11	1	220	650	90
30.	2.34	0.19	1	3000	20	450

Приложение 2

Таблица 1

Коэффициенты для оценки искажения формы тока

Синусоидальная форма тока			Прямоугольная форма тока		
β , град.	$k_{\phi} = \frac{I_{\text{действ}}}{I_{\text{ср}}}$	$k_a = \frac{I_{\text{действ}}}{I_{\text{ср}}}$	β , град.	$k_{\phi} = \frac{I_{\text{действ}}}{I_{\text{ср}}}$	$k_a = \frac{I_{\text{действ}}}{I_{\text{ср}}}$
180	1,57	3,14	180	1,41	2
120	1,87	4,19	120	1,73	3
90	2,22	6,28	90	2,0	4
60	2,77	10,7	60	2,45	6
30	3,99	23,3	30	3,45	12

Таблица 2

Классы приборов по номинальному напряжению

Класс	Номинальное напряжение, В	Класс	Номинальное напряжение, В	Класс	Номинальное напряжение, В
0,5	50	6	600	14	1400
1	100	7	700	16	1600
1,5	150	8	800	18	1800
2	200	9	900	20	2000
2,5	250	10	1000	22	2200
3	300	11	1100	24	2400
4	400	12	1200	26	2600
5	500	13	1300		

Таблица 3

Рекомендуемое рабочее напряжение U_p для приборов
различных типов и классов

Класс	$U_n, В$	$U_p, В$			Класс	$U_n, В$	$U_p, В$		
		Диоды	Тиристоры	Симисторы			Диоды	Тиристоры	Симисторы
1	100	65	80	90	11	1100	740	880	–
2	200	135	160	175	12	1200	800	960	–
3	300	200	240	255	13	1300	870	1040	–
4	400	270	320	350	14	1400	940	1120	–
5	500	335	400	440	16	1600	1070	1280	–
6	600	400	480	530	18	1800	1200	1440	–
7	700	470	560	615	20	2000	1340	1600	–
8	800	530	640	725	22	2200	1470	1750	–
9	900	600	720	795	24	2400	1600	1920	–
10	1000	670	800	880	26	1600	2000	2080	–

Таблица 4

Указатель тиристорov,
рекомендованных для использования в курсовой работе

Тип прибора	Страница*	Тип прибора	Страница*
ТД-20	329	T25	190
ТД-40	– «–	T50	– «–
ТД-63	– «–	T100	– «–
ТД-80	– «–	T160	– «–
ТД-100	– «–	ТВ200	– «–
ТД-125	353	T500	211
ТД-160	– «–	ТВ630	230
ТД-200	– «–	ТВ800	– «–
ТД-250	354, 359		
ТД-320 А,Б	– «–		

* Чебовский О.Г. Силовые полупроводниковые приборы (справочник). – М.: Энергия, 1985.

Тиристоры серии ТД предназначены для работы на частоте до 500 Гц в следующих условиях: температура окружающей среды от – 50 до + 125о С, вибраций в диапазоне частот 5-80 Гц с ускорением до 70 м/с² и ударных сотрясений до 120 м/с².

Таблица 5

Основные параметры и характеристики тиристоров ТД20-ТД100

Параметры	ТД20	ТД25	ТД40	ТД63	ТД80	ТД100
Предельный ток при температуре окружающей среды 40° С и нулевом тепловом сопротивлении охладителя [А]	20	25	40	63	80	100
Максимально допустимая температура [° С]	125	125	125	125	125	125
Пороговое напряжение [В]	1,3	1,3	1,2	1,2	1,18	1,1
Отпирающий ток управления [mA]	600	600	600	450	450	450
Отпирающее напряжение [В]	3	3	3	4	4	4
Общее установившееся тепловое сопротивление [град/Вт]	2,4	2,4	2,4	1,7	1,7	1,7
Динамическое сопротивление [Ом]	$4500 \cdot 10^{-5}$	$2000 \cdot 10^{-5}$	$1800 \cdot 10^{-5}$	$330 \cdot 10^{-5}$	$300 \cdot 10^{-5}$	$300 \cdot 10^{-5}$
Время включения [ms]	5	5,5	5,9	6,5	7,0	7,5

Таблица 6

Переходные тепловые сопротивления тиристоров r_T [град/Вт] при естественном охлаждении в зависимости от времени

t [сек]	ТД20-ТД40	ТД63-ТД100
1	1,00	0,200
2	1,10	0,220
3	1,20	0,229
4	1,27	0,237
5	1,33	0,244
6	1,39	0,250
7	1,44	0,255
8	1,47	0,260
9	1,50	0,264
10	1,52	0,266

Таблица 7

Основные параметры и характеристики тиристоров ТД125-ТД320

Параметры	ТД125	ТД160	ТД200	ТД250	ТД320
Предельный ток при температуре окружающей среды 40°C и нулевом тепловом сопротивлении охладителя [А]	125	160	200	250	320
Максимально допустимая температура [$^\circ\text{C}$]	125	125	125	125	125
Пороговое напряжение [В]	1,15	1,05	0,75	0,8	0,7
Отпирающий ток управления [mA]	600	600	600	600	600
Отпирающее напряжение [В]	4	4	4	4	4
Общее установившееся тепловое сопротивление [град/Вт]	$250 \cdot 10^{-5}$	$220 \cdot 10^{-5}$	$200 \cdot 10^{-5}$	$150 \cdot 10^{-5}$	$140 \cdot 10^{-5}$
Динамическое сопротивление [Ом]	1,2	1,2	1,2	1,05	1,05
Время включения [ms]	8	8,8	9,5	10	11

Таблица 8

Переходные тепловые сопротивления тиристоров r_T [град/Вт]
при естественном охлаждении в зависимости от времени

t [сек]	ТД125-ТД200	ТД250-ТД320
1	0,125	0,100
2	0,145	0,115
3	0,164	0,130
4	0,129	0,140
5	0,183	0,145
6	0,195	0,148
7	0,208	0,150
8	0,215	0,152
9	0,248	0,153
10	0,250	0,154

Тиристоры низкочастотные нелавинные

типов Т25, Т50, Т100, Т160, ТВ200

Применяются в статических преобразователях электроэнергии, а также в цепях постоянного и переменного тока различных силовых установок на частоте до 500 Гц.

Нормальная работа тиристорov обеспечивается при:

- температуре окружающей среды от -50° до $+125^\circ$ С;
- ударных сотрясениях с ускорением до 120 м/с^2 и длительных вибрациях в диапазоне частот 5-100 Гц с ускорением до 40 м/с^2 .

Таблица 9

Основные параметры тиристорov типа Т

Параметры	Т25	Т50	Т100	Т160	ТВ200
Предельный ток [А]	25	50	100	160	200
Пороговое напряжение U_o [В]	1,3	1,2	1,3	1,18	1,3
Динамическое сопротивление $R_d \cdot 10^{-5}$ [Ом]	800	336	200	107	100
Отпирающий ток управления [mA]	200	300	300	300	300
Отпирающее напряжение [В]	5,5	7,0	7,0	7,0	7,0
Общее установившееся тепловое сопротивление [град/Вт] - при естественном воздушном охлаждении	5,09	1,85	1,48	1,42	-
- при расходе воды л/мин					
1					0,35
2	-	-	-	-	0,32
3	-	-	-	-	0,30
Время включения [ms]	10	10	10	10	20

Таблица 10

Переходные тепловые сопротивления тиристоров типа Т r_T [град/Вт]
при естественном охлаждении в зависимости от времени

t [сек]	T25	T50	T100	T160	TB200*
1	0,50	0,28	0,14	0,100	0,120
2	0,62	0,32	0,16	0,125	0,140
3	0,72	0,35	0,18	0,135	0,150
4	0,82	0,38	0,19	0,143	0,160
5	0,90	0,40	0,195	0,151	0,168
6	0,95	0,41	0,20	0,158	0,174
7	0,97	0,42	0,205	0,165	0,180
8	0,98	0,43	0,21	0,172	0,185
9	0,99	0,44	0,22	0,175	0,190
10	1,00	0,45	0,23	0,178	0,196

* Расход охлажденной воды 1 л/мин

Таблица 11

Основные параметры тиристоров T500, TB680, TB800

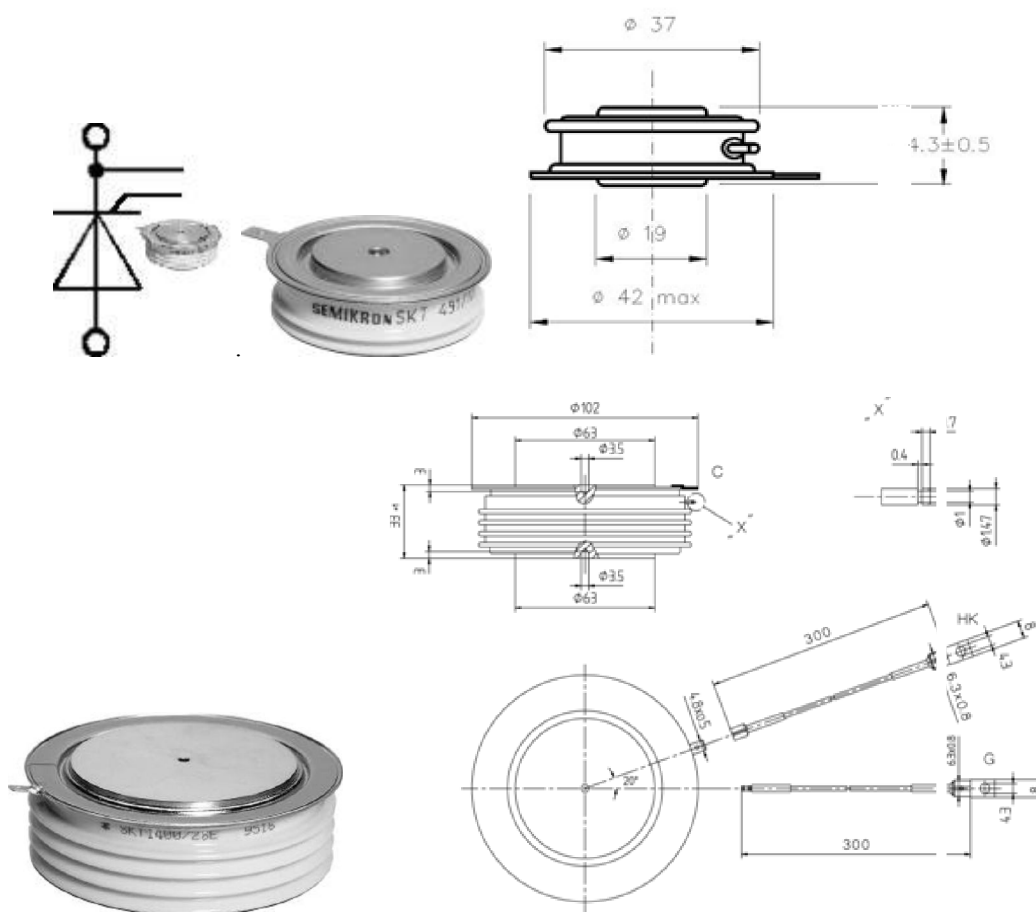
Параметры	T500	TB630	TB800
Предельный ток тиристора [А]	500	630	800
Пороговое напряжение U_0 [В]	1,3	1,17	1,17
Динамическое сопротивление $R_d \cdot 10^{-5}$ [Ом]	50	66,9	51,9
Отпирающий ток управления [mA]	400	600	600
Отпирающее напряжение [В]	7	8	8
Время включения [ms]	40	40	40
Общее установившееся тепловое сопротивление [град/Вт]			
- при естественном воздушном охлаждении	0,274	-	-
- при расходе воды л/мин			
1	-	0,081	0,081
3	-	0,070	0,070
6	-	0,059	0,059

Переходные тепловые сопротивления тиристоров
типа Т500, ТВ630, ТВ600

r_T [°C] при естественном воздушном охлаждении и водяном охлаждении с расходом воды 1 л/мин (тиристоры типа ТВ) в зависимости от времени

t [сек]	T500	ТВ630	ТВ800
1	0,032	0,033	0,033
2	0,038	0,040	0,040
3	0,040	0,048	0,048
4	0,041	0,052	0,052
5	0,042	0,055	0,055
6	0,043	0,058	0,058
7	0,044	0,060	0,060
8	0,045	0,061	0,061
9	0,046	0,062	0,062
10	0,047	0,063	0,063

Конструкции тиристоров фирмы «Мицубиси электрик»



Модуль тиристора

Таблица 13

Основные параметры тиристоров фирмы «Мицубиси электрик»

Параметры	AT405	AT403	SKT491	SKT1400	AT1004
Предельный ток [А], Th=55°C	305	400	452(85°C)	1400(66°C)	1545(66°C)
Пороговое напряжение U_0 [В]	1	1	0,8	0.94	0.92
Динамическое сопротивление R_d [Ом]	0.001935	0.000833	0,0000272	0.0003125	0.0002222
Отпирающий ток управления [mA]	200	200	250	300	300
Отпирающее напряжение [В]	3.5	3.5	3	3	3,5
Общее установившееся тепловое сопротивление [град/Вт] (кристалл-корпус) - при естественном воздушном охлаждении с двух сторон	0.095	0.095	0.047	0.0185	0.026
Время включения [ms]	0.7	0.6	50 ... 150	200...300	1,1

Таблица 14

Переходные тепловые сопротивления тиристоров фирмы «Мицубиси электрик» r_T [град/Вт] при естественном охлаждении в зависимости от времени

t [сек]	AT405	AT403	SKT491	SKT1400	AT1004
0.001	0.004	0.004	0.002	0.001	0.002
0.01	0.001	0.001	0.005	0.002	0.003
0.1	0.0025	0.0025	0.0125	0.006	0.0075
1	0.0058	0.0058	0.01	0.045	0.0016
5	0.0090	0.0091	0.068	0.06	0.00255
7	0.0094	0.0094	0.169	0.065	0.00258
10	0.0095	0.0095	0.176	0.065	0.0026

СИЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Методические указания к выполнению курсовой работы

Составители:

ЛУКУТИН Борис Владимирович
МУРАВЛЕВ Игорь Олегович

Рецензент:

Кандидат технических наук
доцент кафедры ЭСПП ЭЛТИ

С.Г. Обухов

Подписано к печати 03.04.2009 Формат 60x84/16.

Бумага «Снегурочка».

Печать RISO. Усл.печ.л. 1,63. Уч.-изд.л. 1,47.

Заказ 352 . Тираж 200 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту
ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.