

Владимирский государственный университет

**ФАЗОУПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ
В СТАБИЛИЗАТОРА
НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА**

**Учебный материал
для курсового проектирования
по дисциплине «Электроника»**

Владимир 2010

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет
Кафедра управления и информатики в технических
и экономических системах

ФАЗОУПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ В СТАБИЛИЗАТОРАХ НАПЯЖЕНИЯ И ТОКА

Учебный материал
для курсового проектирования
по дисциплине «Электроника»

Составители:
А.С. ГРИБАКИН
В.С. ГРИБАКИН
О.М. КОЧУРОВ

Владимир 2010

УДК 621.311.6(075.32)
ББК

Рецензент
Кандидат технических наук,
доцент кафедры электротехники и электроэнергетики
Г.П. Колесник

Печатается по решению редакционного совета
Владимирского государственного университета

Учебный материал для курсового проектирования по дисциплине «Электроника». Фазоуправляемые выпрямители в стабилизаторах напряжения и тока /Владим.гос.ун-т; сост.: А.С. Грибакин, В.С. Грибакин, О.М. Кочуров.– Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010.– 40 с.

Содержит предварительные сведения об основных электронных узлах систем стабилизации напряжения и тока с тиристорными ФУВ, а также развернутую последовательность расчета узлов силовой цепи и примерами расчета статических характеристик.

Учебный материал подготовлен для студентов 2 – 3 курсов очной формы обучения специальностей 220201 – управление и информатика в технических системах и 220200 – бакалавры техники и технологии по направлению автоматизация и управление. Может быть использован студентами других специальностей.

Табл. 5. Илл. 11. Библиогр.: 7 назв.

УДК 621.311.6(075.32)
ББК

Введение

Настоящая методическая работа содержит учебный материал для курсового проектирования, который может быть полезен при расчете элементов силовой цепи систем стабилизации напряжения или тока с фазоуправляемыми выпрямителями (ФУВ) в качестве регулирующего органа. Материал работы разбит по параграфам в следующем порядке.

В первом параграфе представлена общая функциональная схема системы стабилизации, поясняющая назначение ее узлов и связей между ними.

Во втором параграфе даны уравнения силовой цепи ФУВ с различным числом фаз выпрямления. Уравнения статических характеристик выведены с учетом сопротивлений потерь. Рассмотрены особенности работы ФУВ в системах стабилизации напряжения и тока.

Содержание третьего параграфа определяет последовательность расчета элементов силовой цепи в ходе курсового проектирования, отдельно для стабилизаторов напряжения и стабилизаторов тока. Приведены примеры, поясняющие как пользоваться справочными данными, как рассчитывать по уравнениям силовых цепей, а затем строить статические нагрузочные и регулировочные характеристики

1. Функциональная схема системы стабилизации с ФУВ

На рис. 1 изображена общая функциональная схема системы стабилизации напряжения (тока). Основные узлы системы. Трансформатор (Т); фазоуправляемый выпрямитель (ФУВ); сглаживающий L_0C_0 – фильтр (Φ_0); схема импульсно - фазового управления тиристорами ФУВ (СИФУ); канал усиления сигнала рассогласования; блок питания схемы управления (БП Сх. Упр.).

Состав СИФУ: генератор пилообразного напряжения (ГПН); пороговый элемент (ПЭ); буферный (согласующий) каскад (БК); формирователь импульсов управления, импульсный усилитель мощности (ФИУ–ИУМ).

Состав канала рассогласования: схема сравнения (СС); усилитель-регулятор (У–Р).

Сигнал, пропорциональный току $U_{oc.I}$ или напряжению $U_{oc.U}$ подается из цепи нагрузки на вход элемента обратной связи (ОС), далее на селектор (Сел – схема выбора сигнала обратной связи), а затем на один из входов схемы сравнения СС. На другом входе СС действует напряжение задания $U_{зад}$, которое определяет уровень стабилизируемого тока и напряжения нагрузки.

Напряжение питающей сети подключается к первичной обмотке (к первичным фазным обмоткам) трансформатора Т с помощью выключателя S . Предохранитель (предохранители) F обеспечивает защиту силовой цепи системы от перегрузок по току или короткого замыкания (КЗ). Для питания схемы управления необходим отдельный блок питания БП Сх. Упр. с набором стабилизированных напряжений ± 15 В; +5В. Номиналы напряжений могут быть другими в зависимости от элементной базы, используемой для реализации проекта. На вторичной стороне трансформатора Т следует предусмотреть дополнительные обмотки по числу выходов БП Сх. Упр. или выбрать по справочной литературе «стандартный» маломощный трансформатор, например, серии ТПП с требуемым набором обмоток (напряжений).

Кратко о назначении системы и ее узлов. Система стабилизации предназначена для поддержания постоянным уровня среднего значения напряжения или тока в нагрузке независимо от колебаний напряжения сети или сопротивления нагрузки.

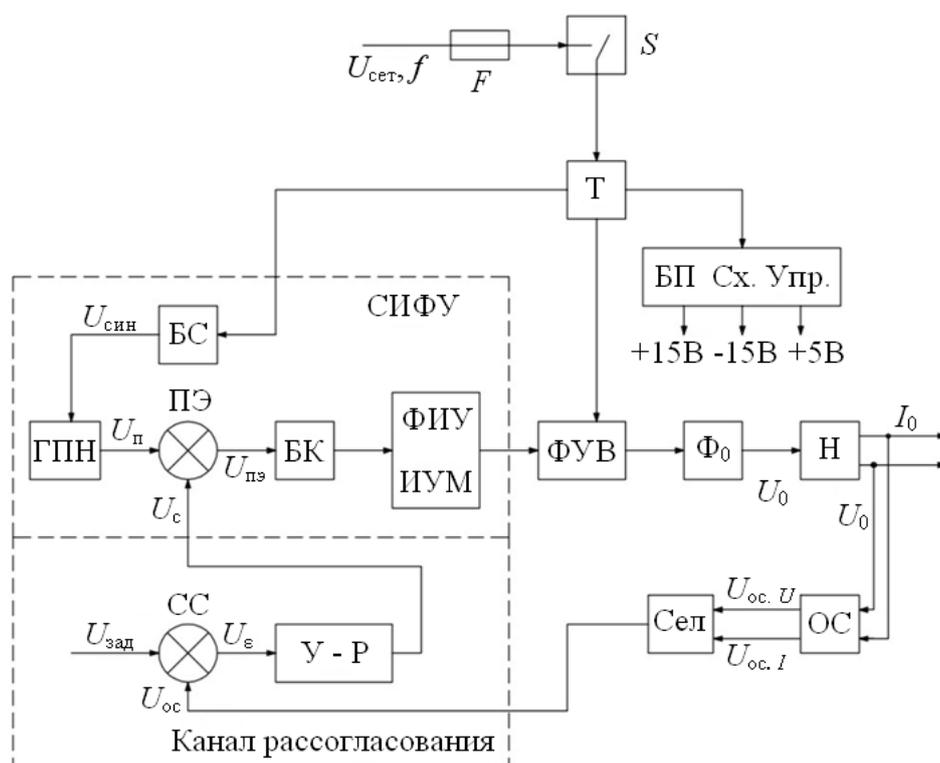
Трансформатор Т, подключенный к сети, позволяет получить на вторичной стороне рассчитанное большее или меньшее напряжение. Кроме того, Т обеспечивает гальваническую развязку нагрузки от питающей сети.

ФУВ преобразует переменное напряжение вторичных обмоток трансформатора в постоянное по знаку, точнее, выпрямленное и регулируемое по среднему значению напряжение с большим уровнем пульсации.

Фильтр Φ_0 предназначен для сглаживания выпрямленного напряжения на выходе ФУВ, снижения уровня пульсаций.

Обратная связь. В общем случае содержит собственно элемент обратной связи и селектор. Элемент ОС по напряжению обычно делитель, собранный на резисторах; по току – стандартный шунт (небольшое сопротивление высокого класса точности). Селектор. Это схема, которая реализует выбор из двух сигналов ОС, по напряжению $U_{oc.U}$ или току $U_{oc.I}$, наибольший в данных условиях работы системы и подает выбранный сигнал на схему сравнения СС. Система, содержащая селектор, может работать в режимах стабилизации по напряжению и току. Если селектор отсутствует, система выполняет только одну задачу: стабилизирует либо напряжение либо ток, в зависимости от типа ОС.

СИФУ. Основной элемент СИФУ – широтно-импульсный модулятор, работа которого синхронизируется напряжением силовой питающей сети. Для синхронизации используется небольшое напряжение, снимаемое с маломощной (маломощных) вторичной обмотки трансформатора Т. Обмотки синхронизации могут быть дополнены диодами или триодами и образуют блок синхронизации БС. Работа и назначение элементов СИФУ подробно описаны в методических указаниях и пособиях по курсовому проектированию [1,2].



Канал усиления сигнала рассматривается на Рис. 1. Схему сравнения СС собирают на одном или двух операционных усилителях (ОУ). Схема предназначена для выделения разницы (рассогласования) U_ε между напряжениями задания $U_{\text{зад}}$ и обратной связи $U_{\text{ос}}$. Чем меньше U_ε , тем точнее система поддерживает заданный уровень тока или напряжения по нагрузке. Следующий элемент канала рассогласования У-Р, не только усиливает U_ε но и формирует закон регулирования. Усиленный сигнал U_ε подается на один из входов порогового элемента ПЭ. На другой вход поступает напряжение пилообразной формы $U_{\text{п}}$ с выхода генератора «пилы» ГПН. Результатом сравнения U_ε и $U_{\text{п}}$ является сигнал импульсной формы $U_{\text{пэ}}$; длительность импульсов $U_{\text{пэ}}$ зависит от уровня U_ε .

Прежде, чем приступить к расчету, следует ознакомиться с типовыми схемами ФУВ, в которых учтены сопротивления потерь, с формулами расчета нагрузочных и регулировочных характеристик.

2. Типовые схемы ФУВ

Блок-схема силовой цепи питания тиристорного ФУВ приведена на рис.2. Она включает в себя: силовой трансформатор Т, ФУВ, сглаживающий фильтр Φ_0 и нагрузку Н. Питающая сеть и соответственно трансформатор могут быть однофазными и трехфазными, ФУВ – одно – двух – трех – и шестипульсными.

В методических указаниях к курсовому проектированию [3] рассмотрены схемы ФУВ, принцип их действия, получены формулы регулировочных характеристик для идеализированных условий работы. Т.е. без учета сопротивлений потерь в схемах ФУВ, а также неизменных напряжениях сети и сопротивлении нагрузки. Предполагалось, что ФУВ работает на нагрузку с индуктивным фильтром и обратным диодом (RL – нагрузка). L_0 – индуктивность дросселя, сглаживающего ток нагрузки.

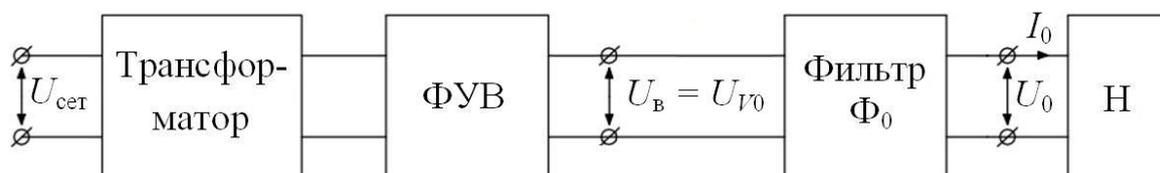
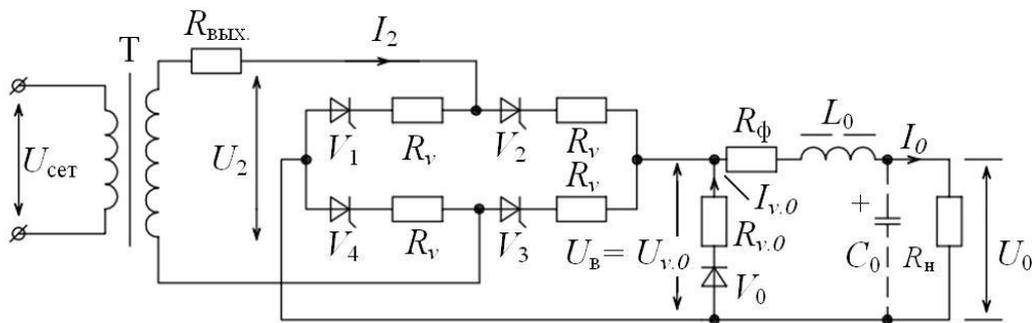


Рис. 2

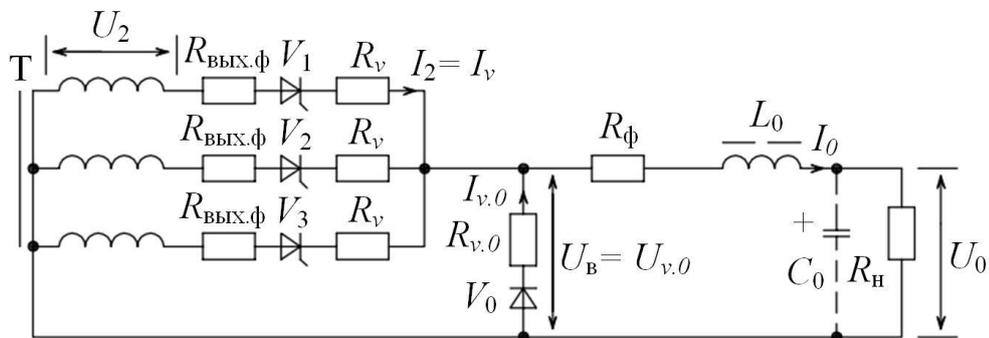
На практике дроссель дополняется конденсатором C_0 ; таким образом, индуктивный фильтр преобразуется в индуктивно-емкостной L_0C_0 , что

позволяет снизить уровень пульсаций напряжения и тока в нагрузке. Для достаточно мощных тиристорных ФУВ важно, чтобы фильтр «начинался» с индуктивности, которая уменьшает скорость нарастания анодного тока после включения тиристора.

На рис.3 изображены схемы ФУВ с вынесенными (учтенными) сопротивлениями потерь. $R_{\text{ВЫХ.}\phi}$ – выходное сопротивление фазы трансформатора; R_v – сопротивление тиристора прямому току в открытом состоянии; в справочной литературе это сопротивление обозначают $R_{o.c.}$ или $R_{\text{пр}}$; $R_{v0} = R_{\text{пр}}$ – сопротивление обратного диода, смещенного прямо; R_ϕ – активное сопротивление обмотки дросселя фильтра L_0C_0 .



а



б

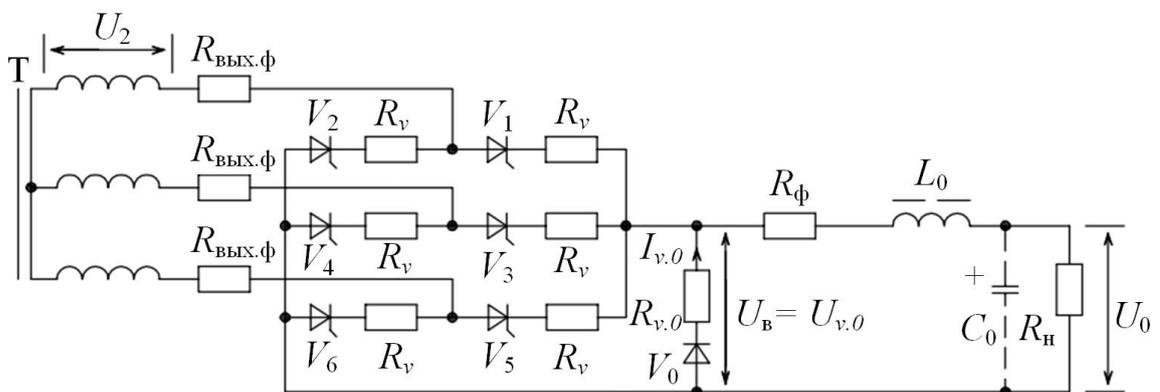


Рис. 3

Тиристоры и обратный диод фазоуправляемого выпрямителя работают как силовые ключи. В качестве примера на рис.4 приведена схема двухфазного однополупериодного ФУВ, в котором тиристоры V_1, V_2 заменены ключами S_1, S_2 с сопротивлениями потерь R_v , обратный диод V_0 – ключом S_0 с сопротивлением R_{v0} . По аналогии в таком же виде можно представить любой из тиристорных выпрямителей.

ФУВ является преобразователем знакопеременного напряжения питающей сети в регулируемое постоянное.

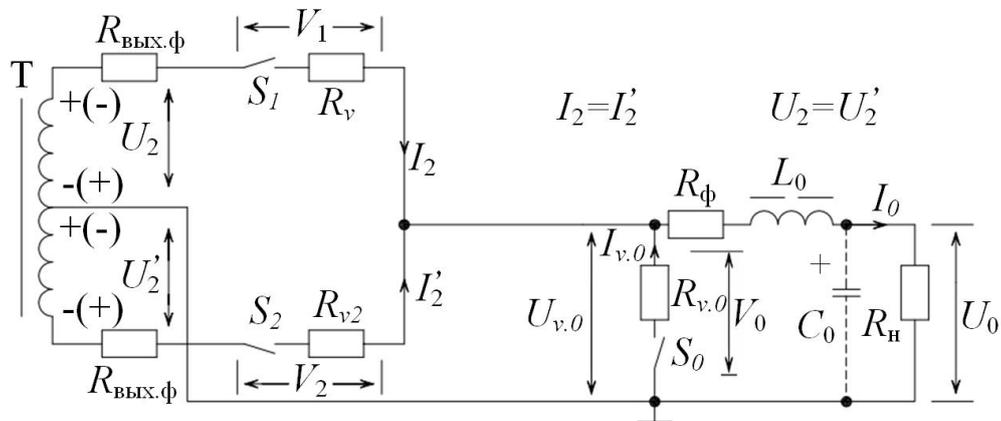


Рис. 4

В реальных условиях сопротивление нагрузки в процессе работы меняется, поэтому необходимо знать нагрузочную характеристику ФУВ, как регулирующего элемента системы стабилизации. Выражение, по которому строят нагрузочную характеристику, находят из формулы регулировочной характеристики [3], с учетом сопротивлений потерь. Для каждой схемы ФУВ выражение находят отдельно, причем предполагается, что ток нагрузки I_0 неразрывный, сильно сглажен, уровень (размах) пульсации тока ΔI_0 невелик.

Далее приведены выражения нагрузочных и регулировочных характеристик ФУВ.

1. Двухфазный однополупериодный (двухпульсный).

Нагрузочная характеристика $U_0 = f(I_0)|_{U_m = const}$.

$$U_0 = \frac{U_{2m}}{\pi} (1 + \cos \alpha) - I_0 [(R_{\text{вых.ф}} + R_v) \frac{\pi - \alpha}{\pi} + \frac{\alpha}{\pi} R_{V_0} + R_\Phi]. \quad (1,a)$$

Регулировочная характеристика $U_0 = f(\alpha)|_{R_H=const}$.

$$U_0 = \frac{\frac{U_{2m}}{\pi}(1 + \cos \alpha)}{1 + \frac{(R_{\text{вых. ф}} + R_V) \frac{\pi - \alpha}{\pi} + \frac{\alpha}{\pi} R_{V0} + R_\Phi}{R_H}}. \quad (1,б)$$

2. Однофазный мостовой (двухпульсный).

Нагрузочная характеристика

$$U_0 = \frac{U_{2m}}{\pi}(1 + \cos \alpha) - I_0[(R_{\text{вых. ф}} + 2R_V) \frac{\pi - \alpha}{\pi} + \frac{\alpha}{\pi} R_{V0} + R_\Phi]. \quad (2,а)$$

Регулировочная характеристика

$$U_0 = \frac{\frac{U_{2m}}{\pi}(1 + \cos \alpha)}{1 + \frac{(R_{\text{вых. ф}} + 2R_V) \frac{\pi - \alpha}{\pi} + \frac{\alpha}{\pi} R_{V0} + R_\Phi}{R_H}}. \quad (2,б)$$

3. Трехфазный однополупериодный (трехпульсный).

Нагрузочная характеристика

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3}U_{2m}}{2\pi} \cos \alpha - I_0(R_{\text{вых. ф}} + R_V + R_\Phi), \quad (3,а)$$

для диапазона углов включения $0 \leq \alpha \leq 30^0$;

$$U_0 = \frac{3U_{2m}}{2\pi} [1 + \cos(\alpha + 30^0)] - I_0[(R_{\text{вых. ф}} + R_V) \frac{150^0 - \alpha}{120^0} + R_{V0} \frac{\alpha - 30^0}{120^0} + R_\Phi]. \quad (3,б)$$

для диапазона углов включения $30^0 \leq \alpha \leq 150^0$.

Регулировочная характеристика

$$U_0 = \frac{\frac{3\sqrt{3}U_{2m}}{2\pi} \cos \alpha}{1 + \frac{R_{\text{вых. ф}} + R_V + R_\Phi}{R_H}} \quad \text{для } 0 \leq \alpha \leq 30^0; \quad (3,в)$$

$$U_0 = \frac{\frac{3U_{2m}}{2\pi} [1 + \cos(\alpha + 30^0)]}{1 + \frac{(R_{\text{вых. ф}} + R_V) \frac{150^0 - \alpha}{120^0} + \frac{\alpha - 30^0}{120^0} R_{V0} + R_\Phi}{R_H}} \quad (3,г)$$

для диапазона углов включения $30^0 \leq \alpha \leq 150^0$.

4. Трехфазный двухполупериодный (шестипульсный).

Нагрузочная характеристика

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3}U_{2m}}{\pi} \cos \alpha - I_0(R_{\text{вых. ф}} + 2R_V + R_\Phi) \text{ для } 0 \leq \alpha \leq 60^\circ; \quad (4,а)$$

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3}U_{2m}}{\pi} [1 + \cos(60^\circ - \alpha)] - I_0[(R_{\text{вых. ф}} + 2R_V) \frac{120^\circ - \alpha}{60^\circ} + R_{V0} \frac{\alpha - 60^\circ}{60^\circ} + R_\Phi] \quad (4,б)$$

для диапазона углов включения $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$.

Регулировочная характеристика

$$U_0 = \frac{\frac{3\sqrt{3}U_{2m}}{\pi} \cos \alpha}{1 + \frac{R_{\text{вых. ф}} + 2R_V + R_\Phi}{R_H}} \text{ для } 0 \leq \alpha \leq 60^\circ; \quad (4,в)$$

$$U_0 = \frac{\frac{3\sqrt{3}U_{2m}}{\pi} [1 + \cos(60^\circ + \alpha)]}{1 + \frac{(R_{\text{вых. ф}} + 2R_V) \frac{120^\circ - \alpha}{60^\circ} + R_{V0} \frac{\alpha - 60^\circ}{60^\circ} + R_\Phi}{R_H}} \quad (4,г)$$

для диапазона углов включения $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$.

5. Трехфазный двухполупериодный полууправляемый (несимметричный).

Нагрузочная характеристика

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3}U_{2m}}{2\pi} (1 + \cos \alpha) - I_0(R_{\text{вых. ф}} + 2R_V + R_\Phi) \text{ для } 0 \leq \alpha \leq 60^\circ \quad (5,а)$$

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3}U_{2m}}{2\pi} (1 + \cos \alpha) - I_0[(R_{\text{вых. ф}} + 2R_V) \frac{\pi - \alpha}{\pi} + R_{V0} \frac{\alpha}{\pi} + R_\Phi] \quad (5,б)$$

для диапазона углов $60^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$.

Регулировочная характеристика

$$U_0 = \frac{\frac{3\sqrt{3}U_{2m}}{2\pi} (1 + \cos \alpha)}{1 + \frac{R_{\text{вых. ф}} + 2R_V + R_\Phi}{R_H}} \text{ для } 0 \leq \alpha \leq 60^\circ \quad (5,в)$$

$$U_0 = \frac{\frac{3\sqrt{3}U_{2m}}{2\pi} (1 + \cos \alpha)}{1 + \frac{(R_{\text{вых. ф}} + 2R_V) \frac{\pi - \alpha}{\pi} + \frac{\alpha}{\pi} R_{V0} + R_\Phi}{R_H}} \quad (5,г)$$

для диапазона углов $60^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$.

Типовая нагрузочная характеристика ФУВ $U_0 = f(I_0)|_{U_m = const}$, снятая при выбранном постоянном значении α , изображена на рис.5. Если $\alpha=0$, то ФУВ работает в режиме максимальной отдачи, как обычный выпрямитель. Характеристика имеет наклон, обусловленный сопротивлениями потерь $R_V, R_{\text{вых. ф}}, R_\Phi$. При токе $I_0=0$ (режим холостого хода), емкость сглаживающего фильтра C_0 заряжается до амплитуды выпрямленного напряжения U_m , соответственно на характеристике имеется подъем до значения $U_{0.xx} \approx U_{m.xx}$.

В задании на курсовое проектирование даны пределы изменения I_0 : $I_{0.\text{мин}} \dots I_{0.\text{макс}}$. Предлагается рассчитывать U_{2m} и U_2 при $I_0 \approx I_{0.\text{мин}}$.

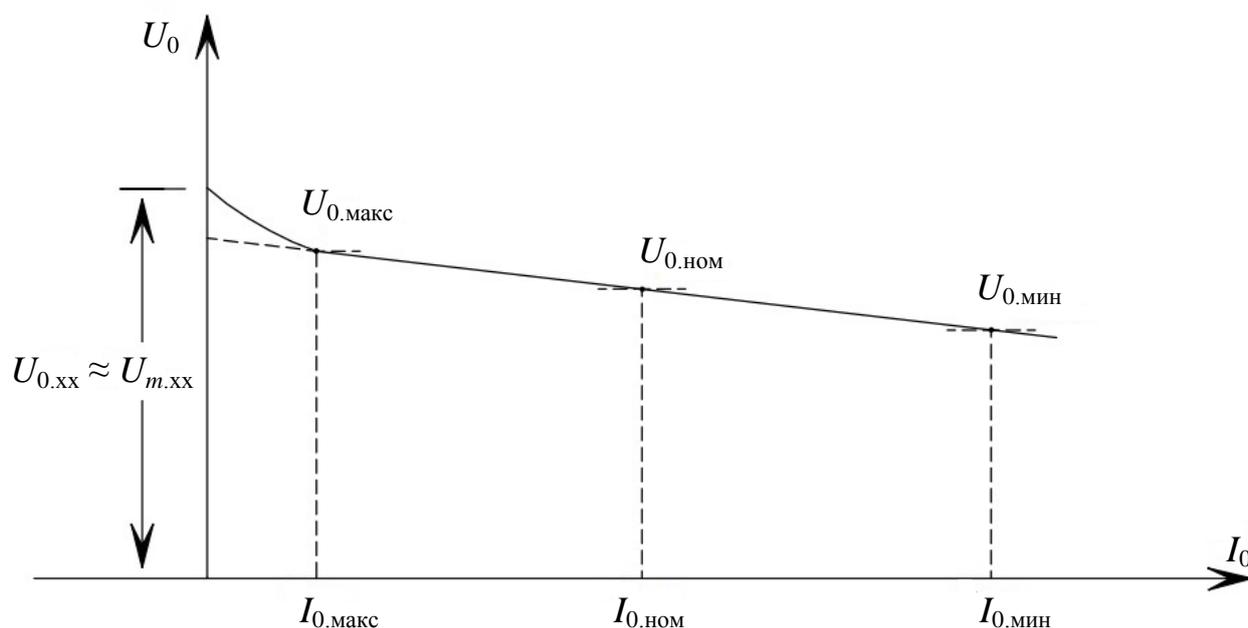


Рис. 5

Рассмотрим работу РЭ – ФУВ в системах стабилизации напряжения и тока (стабилизаторах). Основное назначение таких систем – поддерживать постоянным среднее значение напряжения (тока) нагрузки при колебаниях напряжения сети или изменениях сопротивления нагрузки.

Стабилизация напряжения (СН). На рис.6а приведены графики, изображающие реакцию стабилизатора на изменение напряжения питающей сети $U_{\text{сет}} \pm \Delta U_{\text{сет}}$, а следовательно на вторичной стороне силового трансформатора, к обмоткам которого подключен ФУВ. Предполагается, что $R_H = const$.

Если напряжение сети и, соответственно, на вторичной обмотке (вторичных обмотках) возрастает на $+\Delta U_2$, то для сохранения неизменным напряжения на нагрузке R_H схема управления должна уменьшить интервал проводимости тиристоров так, чтобы вольт-секундная площадь импульсов выпрямленного напряжения $U_{v,0}$ осталась прежней. На рис.6,а, S_1 – вольт-секундная площадь до изменения напряжения сети, S_2 – после изменения.

Если же $U_{сет}$ и U_2 уменьшаются, то интервал проводимости тиристоров должен соответственно возрасти (рис.6,б). В обоих случаях среднее значение сглаженного с помощью LC – фильтра напряжения нагрузки $U_{0,ст}$ практически не меняется.

Аналогично СН работает и на изменение R_H (точнее тока I_0 , потребляемого нагрузкой). Рост или уменьшение R_H приводит к изменению I_0 и фазных токов в обмотках силового трансформатора. В результате растут или уменьшаются падения напряжения на сопротивлениях потерь, а именно: сопротивлениях тиристоров в открытом состоянии R_v и прямосмещенных диодов, в т.ч. обратного $R_{v,0}$; выходного сопротивления фаз трансформатора $R_{вых.ф}$; активного сопротивления сглаживающего дросселя LC – фильтра R_ϕ . Как следствие, должно изменяться U_H . И в этом случае стабильность U_0 обеспечивается постоянством вольт-секундной площади $U_{v,0}$ за счет изменения интервала проводимости тиристоров λ .

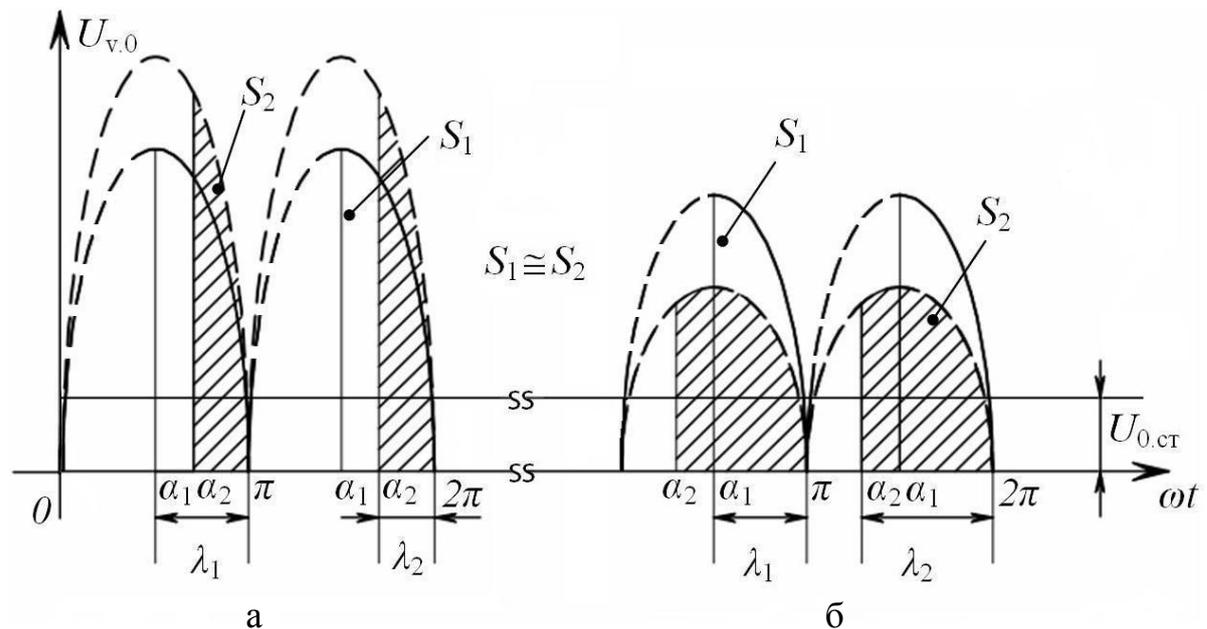


Рис. 6

Стабилизация тока (рис.7). Полагаем, что напряжение сети стабильно $U_{сет} = const$, а сопротивление нагрузки изменяется в широких

пределах. Очевидно, чтобы ток I_0 оставался стабильным, напряжение U_0 должно меняться в широких пределах вслед за сопротивлением нагрузки R_H в соответствии с законом Ома.

$$U_{0,\text{мин}} \dots U_{0,\text{макс}} = I_{0,\text{ст}} (R_{H,\text{мин}} \dots R_{H,\text{макс}}).$$

Графики на рис.7 поясняют работу стабилизатора тока. Сопротивлению $R_{H,\text{макс}}$ соответствует максимальный интервал проводимости λ_1 тиристоров РЭ – ФУВ (длительность импульсов $U_{v,0}$ выпрямленного напряжения) и график тока I_0 с размахом пульсаций $\Delta I_{0,1}$. Сопротивлению R_H соответствует наименьший интервал проводимости λ_2 с размахом пульсаций $\Delta I_{0,2}$, среднее же значение тока $I_{0,\text{ст}} \approx \text{const}$. Если сопротивление нагрузки R_H неизменно, то между работой стабилизаторов тока и напряжения нет разницы.

Итак, регулирование U_0 , I_0 , P_0 в нагрузке с помощью ФУВ осуществляется за счет управления интервалом проводимости тиристоров. Максимальные значения интервала проводимости определяются числом фаз выпрямления, например у двухпульсных ФУВ $\lambda_{\text{макс}} = 180^\circ$, у трехпульсных 120° , у шестипульсных $\lambda_{\text{макс}} = 60^\circ$. Стабилизация U_0 или I_0

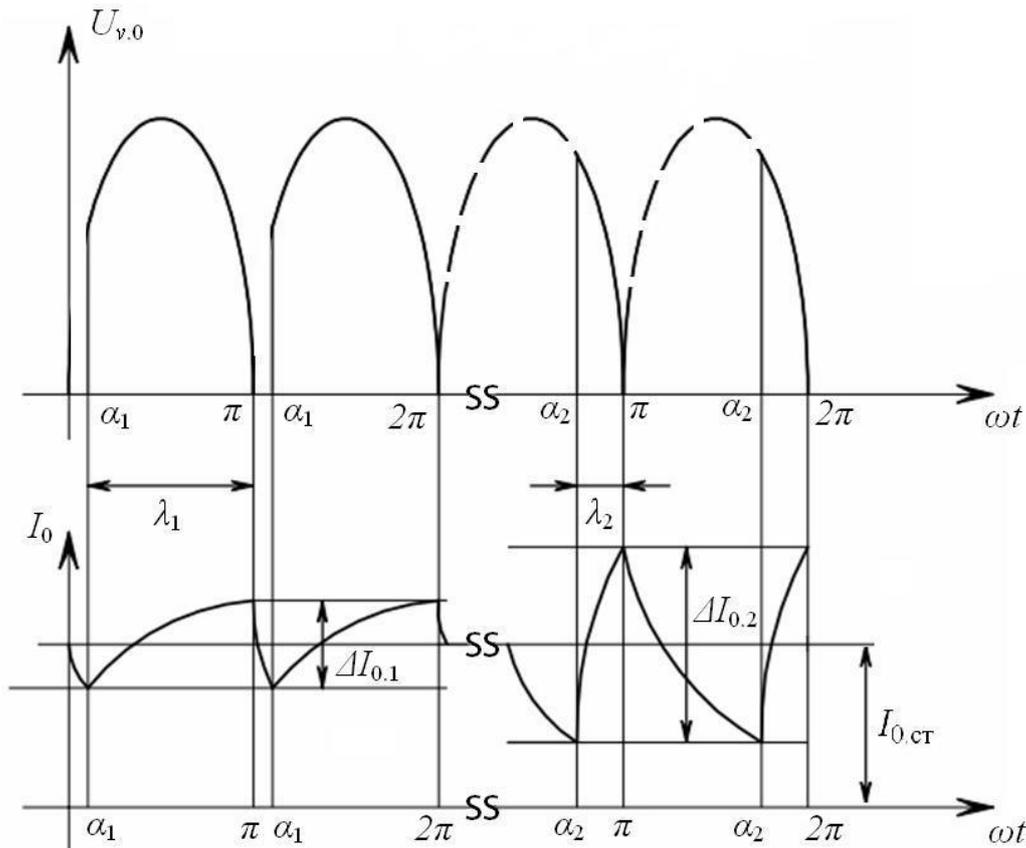


Рис. 7

осуществляется лишь в том случае, если возможно изменение λ , как реакция на нестабильность $U_{\text{сет}}$ (U_2) или I_0 в процессе работы стабилизатора.

Регулировочная характеристика ФУВ в отличие от одноименной характеристики ТП принципиально нелинейна и представляет собой косинусоиду. Например, идеализированная характеристика двухпульсных ФУВ выражается соотношением

$$U_0 = \frac{U_{2m}}{\pi} (1 + \cos \alpha),$$

или в относительной форме

$$\bar{U}_0 = 0,5(1 + \cos \alpha).$$

Управление углом включения α тиристоров данных ФУВ от 30° до 150° обеспечивает регулирование мощности в нагрузке в пределах (3...97)% от $P_{0,\text{макс}}$. За пределами диапазона $30^\circ \dots 150^\circ$ управление неэффективно. Объясняется это тем, что крутизна функции $\cos \alpha$ при углах близких к 0° и 180° резко снижается, в итоге коэффициент передачи ФУВ $K_{\text{ФУВ}} = \Delta \bar{U}_0 / \Delta \alpha$ уменьшается.

Коэффициент $K_{\text{ФУВ}}$ двухпульсных ФУВ при $\alpha_{\text{мин}} = 30^\circ$ и $\alpha_{\text{макс}} = 150^\circ$ равен 0,25, при $\alpha = 90^\circ$ достигает максимума $K_{\text{ФУВ}} = 0,5$. Диапазон углов включения $30^\circ \dots 150^\circ$ считается рабочим.

У ФУВ с большим числом фаз выпрямления рабочий диапазон углов включения короче, чем у двухпульсных, а крутизна регулировочной характеристики выше. Рабочий диапазон следует определять самостоятельно.

3. Последовательность расчета элементов силовой цепи в ходе курсового проектирования

3.1. Стабилизаторы напряжения

1. Расчет мощности нагрузки. Построение нагрузочных характеристик.

Из задания на КП известны следующие данные.

- 1) Напряжение питающей сети и отклонение от номинального значения. Например: $U_{\text{сет}} = 380\text{В} \pm 20\%$; $220\text{В} \pm 15\%$; $115\text{В} \pm 10\%$ и т.д.
- 2) Пределы изменения тока нагрузки $I_{0,\text{мин}} \leq I_0 \leq I_{0,\text{макс}}$
- 3) Стабилизированное напряжение на нагрузке

- 4) Выходным сопротивлением фазы трансформатора $R_{\text{вых.ф}}$ следует предварительно задаться, не выходя за пределы $0,1 \dots 0,15 \text{ Ом}$, причем чем больше мощность нагрузки, тем меньше $R_{\text{вых.ф}}$. После расчета трансформатора значение $R_{\text{вых.ф}}$ уточняется.

Общие положения расчета силовой цепи.

В методических указаниях [3] дан пример выбора тиристора по известным значениям $I_{0.\text{макс}}$ и $U_{\text{обр.макс}}$, аналогично выбираются диоды. В большинстве случаев класс тиристорov, используемых в силовой технике, находится в пределах (1...12). Это означает, что тиристоры выдерживают напряжение $U_{\text{ак}}$, приложенное в прямом и обратном направлениях, в зависимости от класса, от 100 до 1200 В. Пока не рассчитано напряжение на вторичных обмотках трансформатора, ориентиром при выборе тиристорov является ток $I_{0.\text{макс}}$. Если выбран по току тиристор или диод и в справочнике даны значения прямого падения напряжения в открытом состоянии, а не сопротивления R_v или R_{v0} , то в формулы нагрузочных и регулировочных характеристик необходимо ввести значения $U_{\text{пр}} = U_{\text{о.с}}$ вместо $I_0 R_v$ или $I_0 R_{v0}$.

Падения напряжения на активном сопротивлении обмотки дросселя фильтра Φ_0 находят по таблице 1.3 в [4]. После расчета дросселя значение $\Delta E_{\text{др}}$ уточняется.

Мощность трансформатора должна быть определена с учетом возможных колебаний напряжения питающей сети при максимальном токе нагрузки и $\alpha = 0$ (режим максимальной отдачи тиристорного ФУВ). По существу рассчитывается трансформатор, работающий на выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой.

Расчет выпрямителя завершается построением трех нагрузочных характеристик, соответствующих номинальному напряжению сети и двум предельным. Например, напряжение сети $380\text{В} \pm 20\%$, значит надо рассчитать три значения напряжений на вторичной обмотке в режиме близком к холостому ходу (х.х.): U_2 (U_{2m}) для номинального напряжения сети 380В; $1,2 \cdot U_2$ ($1,2 \cdot U_{2m}$) – для максимального $380\text{В} + 20\%$; $0,8 \cdot U_2$ ($0,8 \cdot U_{2m}$) – для минимального $380\text{В} - 20\%$.

На рис.8 показан пример построенных нагрузочных характеристик в координатах $U_0 = f(I_0)|_{\alpha=0}$. Верхняя характеристика отмечена значками «+» ($1,2 \cdot U_{2m}$), нижняя – знака «-» ($0,8 \cdot U_{2m}$), средняя характеристика соответствует номинальным значениям напряжения питающей сети и на вторичной обмотке трансформатора.

Если по заданию на курсовое проектирование РЭ-ФУВ – мостовой двухпульсный, то формулы нагрузочных характеристик, по которым их рассчитывают и строят, имеют вид

$$U_0^+ = 1,2 \frac{2U_{2m}}{\pi} - I_0(R_{\text{вых.ф}} + 2R_v + R_\phi),$$

$$U_0 = \frac{2U_{2m}}{\pi} - I_0(R_{\text{вых.ф}} + 2R_v + R_\phi),$$

$$U_0^- = 0,8 \frac{2U_{2m}}{\pi} - I_0(R_{\text{вых.ф}} + 2R_v + R_\phi);$$

или

$$U_0^+ = 1,2 \frac{2U_{2m}}{\pi} - I_0 R_{\text{вых.ф}} - (2U_{\text{пр}} + \Delta E_{\text{др}}),$$

$$U_0 = \frac{2U_{2m}}{\pi} - I_0 R_{\text{вых.ф}} - (2U_{\text{пр}} + \Delta E_{\text{др}}),$$

$$U_0^- = 0,8 \frac{2U_{2m}}{\pi} - I_0 R_{\text{вых.ф}} - (2U_{\text{пр}} + \Delta E_{\text{др}}).$$

По аналогии, полагая $\alpha = 0$, нетрудно записать формулы для построения нагрузочных характеристик других типов ФУВ.

Чтобы обеспечить стабилизацию напряжения на уровне $U_{0.\text{ст}}$ (рис.8)

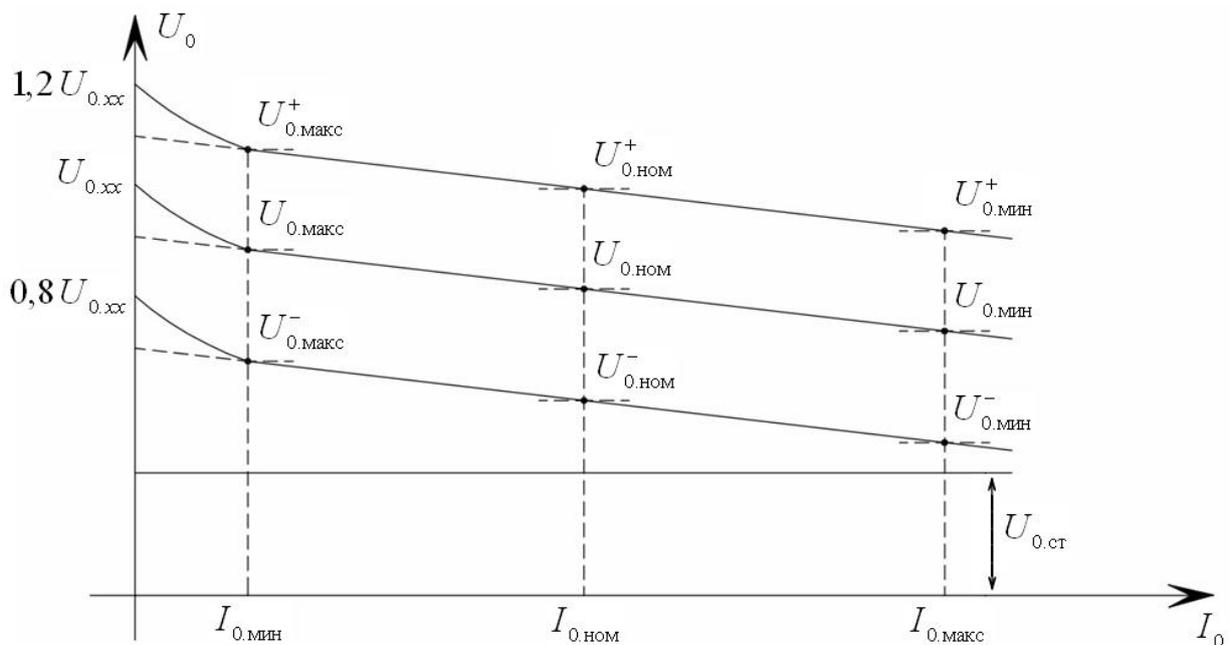


Рис. 8

при максимальном токе $I_{0.\text{макс}}$ и минимальном напряжении $U_{0.\text{мин}}^-$, необходимо выполнение условия $U_{0.\text{ст}} < U_{0.\text{мин}}^-$. Это условие выполняется, если минимальный угол включения тиристора $\alpha_{\text{мин}}$ при $I_0 = I_{0.\text{макс}}$ больше нуля. Для каждой схемы ФУВ выбирается свое значение $\alpha_{\text{мин}}$. В частности при применении двухпульсных ФУВ рекомендуется $\alpha_{\text{мин}}$ не менее 30° .

После выбора $\alpha_{\text{мин}}$ получаем расчетные соотношения, подставив в (1,а) $\alpha = \alpha_{\text{мин}}$

$$U_{0.\text{ст}} = 0,8 \frac{U_{2m}}{\pi} (1 + \cos \alpha_{\text{мин}}) - I_{0.\text{макс}} [(R_{\text{вых.ф}} + 2R_v) \frac{\pi - \alpha_{\text{мин}}}{\pi} + \frac{\alpha_{\text{мин}}}{\pi} R_{v0} + R_\phi],$$

отсюда амплитуда фазного напряжения на вторичной обмотке силового трансформатора

$$U_{2m} = \frac{U_{0.\text{ст}} + I_{0.\text{макс}} [(R_{\text{вых.ф}} + 2R_v) \frac{\pi - \alpha_{\text{мин}}}{\pi} + \frac{\alpha_{\text{мин}}}{\pi} R_{v0} + R_\phi] \cdot \pi}{0,8 \cdot (1 + \cos \alpha_{\text{мин}})}, \quad (6)$$

действующее значение напряжения на вторичной обмотке $U_2 = 0,707 \cdot U_{2m}$.

Если нестабильность напряжения питающей сети не $\pm 20\%$, а $\pm 15\%$, $\pm 10\%$, то вместо множителя 0,8 в знаменателе последней формулы следует подставить 0,85 или 0,9 соответственно.

Рассчитанные по (6) U_{2m} и U_2 близки к значениям режима х.х. Далее следует найти $U_{0.\text{макс}} \approx U_{0.\text{хх}}$ при $I_0 = I_{0.\text{мин}}$

$$U_{0.\text{макс}} = \frac{U_{2m}}{\pi} (1 + \cos \alpha_{\text{мин}}) - I_{0.\text{мин}} [(R_{\text{вых.ф}} + 2R_v) \frac{\pi - \alpha_{\text{мин}}}{\pi} + \frac{\alpha_{\text{мин}}}{\pi} R_{v0} + R_\phi].$$

Максимальная мощность нагрузки вторичной обмотки (цепи) трансформатора

$$P_{0.\text{макс}} = U_{0.\text{макс}} \cdot I_{0.\text{макс}} \approx U_{0.\text{хх}} \cdot I_{0.\text{макс}}$$

Конкретные расчеты устройства требуют знакомства с методической и справочной литературой. Чтобы уяснить как пользоваться литературой следует обратиться к примеру. Приведенному ниже.

ПРИМЕР 1

Условия.

1. Напряжение питающей сети $U_{\text{сет}} = 380\text{В} \pm 20\%$, $f = 50\text{Гц}$; сеть трехфазная. ФУВ – трехфазный однополупериодный.
2. Пределы измерения тока нагрузки $0,3\text{А} \leq I_0 \leq 20\text{А}$; выходное сопротивление фазы трансформатора приближенно $R_{\text{вых.ф}} = 0,1\text{Ом}$.

3. Стабилизированное напряжение на нагрузке $U_{0,ст} = 30В$.

Задание.

Выбрать минимальный угол включения $\alpha_{мин}$. Рассчитать напряжение U_{2m} , U_2 , мощность нагрузки $P_{0,макс.}$; Выбрать тиристоры ФУВ и обратный диод.

Выбор, расчет $\alpha_{мин}$.

1. $\alpha_{мин}$ выбирают: а) чтобы обеспечить достаточную крутизну регулировочной характеристики; б) чтобы иметь некоторый запас регулируемого напряжения U_0 , превышающего $U_{0,ст}$ при максимальном токе нагрузки $I_{0,макс.}$. Напомним, что крутизна регулировочной характеристики – это коэффициент передачи управляемого выпрямителя $K_{ФУВ}$. Положим достаточным значение $K_{ФУВ} \approx 0,3$ (коэффициент может быть выбран другим). У трехфазного однополупериодного ФУВ выражение идеализированной регулировочной характеристики в относительной форме на малых углах включения $0^0 \leq \alpha \leq 30^0$ имеет вид [3] $\bar{U}_0 = \cos \alpha$. Крутизна характеристики, или приближенно $K_{ФУВ}$, определяется производной

$$S = \left| \frac{d\bar{U}_0}{d\alpha} \right| = \sin \alpha \approx \frac{\Delta \bar{U}_0}{\Delta \alpha} = K_{ФУВ}.$$

Значению $K_{ФУВ} \approx 0,3$ соответствует угол включения $\alpha_{мин} = 17^0$.

2. Рассчитать U_{2m} , U_2 , $U_{0,макс.}$, $P_{0,макс.}$, выбрать тиристоры и обратный диод.

Для расчетов необходимы сведения о величинах R_v , R_{v0} , R_ϕ . Выходное сопротивление трансформатора (фазы трансформатора) задано в условиях на курсовое проектирование (КП). После расчета трансформатора $R_{вых.ф}$ уточняется.

Как определить сопротивление тиристоров в открытом состоянии $R_v = R_{ос}$, а также прямосмещенного обратного диода $R_{v0} = R_{пр}$, или параметра равноценно заменяющего их в формулах расчета?

Максимальный ток нагрузки $I_{0,макс.} = 20А$. В режиме максимальной отдачи, когда $\alpha = 0^0$, доля постоянного тока через каждый из трех тиристоров $I_{0,v} = \frac{I_{0,макс.}}{3} = 6,7А$. Действующее значение тока через каждый тиристор, согласно таблице 1.6 [4] составляет $I_v = 0,58 \cdot I_0$; $I_v = 0,58 \cdot 20 = 11,6А$. Значение I_v является ориентиром при выборе тиристора по току.

В [5] выбираем тиристор серии Т122-20; ток $I_{\text{ос.ср.ном.}} = 20\text{А}$. Тиристоры данной серии выпускаются на напряжения $U_{\text{ак}} = U_{\text{зс.}}$ от 100В до 1200В (классы напряжения 1...12).

В перечне параметров отсутствуют сведения о сопротивлении $R_{\text{ос}}$, но приведена величина падения напряжения на тиристоре в открытом состоянии $U_{\text{ос.и}} \leq 1,75\text{В}$. $U_{\text{ос.и}}$ - падение напряжения, которое создает импульс тока, равный $3,14 \cdot I_{\text{0.ср.макс.}}$. т.е. $3,14 \cdot 20 = 62,8\text{А}$. В нашем случае $I_{\text{0.в}} = 6,7\text{А}$, поэтому положим $U_{\text{ос}} = U_{\text{в}} \approx 1\text{В}$.

Ток обратного диода $I_{\text{в.0}}$ в схеме однополупериодного трехфазного ФУВ не превышает 17% от $I_{\text{0.макс.}}$. [3]: $I_{\text{в.0}} = 0,17 \cdot 20 = 3,14\text{А}$. В справочнике [6,7] выбираем диод серии КД202 со следующими данными: средний прямой ток $I_{\text{пр.ср.}} = 5\text{А}$; среднее прямое падение напряжения $U_{\text{пр}} = U_{\text{в.0}} \approx 1\text{В}$; $U_{\text{обр}}$ (максимально допустимое) определяется после расчета фазного напряжения на вторичных обмотках трансформатора.

Активное сопротивление обмотки дросселя фильтра неизвестно, но можно приближенно найти падение напряжения $\Delta E_{\text{др}}$ при максимальном токе нагрузки руководствуясь таблицей 1.3 [4]. Как пользоваться таблицей 1.3 ?

По условию задания $U_{\text{0.ст}} = 30\text{В}$, причем $U_{\text{0.ст}}$ близко к значению $U_{\text{0.мин}}^-$. При колебаниях напряжения сети $\pm 20\%$ напряжение $U_{\text{0.мин}}$, очевидно больше $U_{\text{0.ст}}$ на 20%, а $U_{\text{0.мин}}^+$ больше $U_{\text{0.ст}}$ на 40%. Таким образом, $U_{\text{0.мин}}^+ \approx 1,4 \cdot U_{\text{0.ст}} = 1,4 \cdot 30 = 42\text{В}$.

Мощность цепи нагрузки выпрямителя

$P_0 \approx U_{\text{0.мин}}^+ \cdot I_{\text{0.макс}} = 42 \cdot 20 = 840\text{Вт}$. Рассчитанное значение P_0 несколько меньше $P_{\text{0.макс}}$. По таблице 1.3 находим: при $P_0 = (300...1000)\text{Вт}$

$\Delta E_{\text{др}} = (0,07...0,05) \cdot U_{\text{0.мин}}^+$. Расчет $\Delta E_{\text{др}}$ проводится по меньшему пределу чисел, указанных в скобках

$$\Delta E_{\text{др}} = 0,05 \cdot 42 = 2,1\text{В} = I_{\text{0.макс}} \cdot R_{\text{ф}}$$

После расчета дросселя значение $\Delta E_{\text{др}}$ корректируется.

Теперь следует внести изменения в формулы нагрузочных характеристик (3)

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3}U_{2m}}{2\pi} \cos \alpha - (U_{\text{в}} + \Delta E_{\text{др}}) - I_0 R_{\text{вых.ф}} \quad (7,а)$$

для диапазона углов включения $0^0 \leq \alpha \leq 30^0$;

$$U_0 = \frac{3U_{2m}}{2\pi} [\cos(\alpha + 30^0)] - (U_v \frac{150^0 - \alpha}{120^0} + U_{v.0} \frac{\alpha - 30^0}{120^0} + \Delta E_{др}) - I_0 R_{вых.ф} \frac{150^0 - \alpha}{120^0} \quad (7,б)$$

для диапазона углов $30^0 \leq \alpha \leq 150^0$.

Примечание. Регулировочную характеристику строят после расчета параметров трансформатора и дросселя и ее запись в новой форме здесь не требуется.

Итак, известны в первом приближении параметры элементов силовой цепи, необходимые для расчетов:

$$\alpha_{мин} = 17^0; U_v = U_{ос} \approx 1В; U_{v.0} = U_{пр} \approx 1В;$$

$$\Delta E_{др} \approx 2,1В; R_{вых.ф} = 0,1Ом; U_{0.ст} = 30В; 0,3А \leq I_0 \leq 20А.$$

Напряжение стабилизации связано с амплитудой фазного напряжения на вторичной обмотке соотношением (при $\alpha = \alpha_{мин}$; $I_0 = I_{0.макс}$; на нижнем пределе $U_{сет}^-$)

$$U_{0.ст} = 0,8 \cdot \frac{3\sqrt{3}U_{2m}}{2\pi} \cdot \cos \alpha_{мин} - (U_v + \Delta E_{др}) - I_{0.макс} \cdot R_{вых.ф},$$

отсюда амплитуда фазного напряжения

$$U_{2m} = \frac{(U_{0.ст} + U_v + \Delta E_{др} + I_{0.макс} \cdot R_{вых.ф}) \cdot 2\pi}{0,8 \cdot 3\sqrt{3} \cdot \cos \alpha_{мин}} \quad (8)$$

$$U_{2m} = \frac{(30 + 1 + 2,1 + 20 \cdot 0,1) \cdot 6,28}{0,8 \cdot 3 \cdot 1,732 \cdot 0,956} = 55,48 \approx 55,5В,$$

действующее значение фазного напряжения

$$U_2 = 0,707 \cdot U_{2m} = 0,707 \cdot 55,5 = 39,24 \approx 39,3В.$$

Максимальное напряжение на нагрузке ФУВ при $\alpha = \alpha_{мин}$, $I_0 = I_{0.мин}$ и номинальном напряжении сети $U_{сет}$

$$U_{0.макс} \approx U_{0.хх} = \frac{3\sqrt{3} \cdot U_{2m}}{2\pi} \cos \alpha_{мин} - (U_v + \Delta E_{др}) - I_{0.мин} \cdot R_{вых.ф}.$$

Падениями напряжения на активном сопротивлении дросселя и выходном сопротивлении трансформатора при $I_{0.мин}$ можно пренебречь, тогда

$$U_{0.макс} \cong \frac{3\sqrt{3} \cdot 55,5}{6,28} \cdot 0,956 - 1 = 42,89В \approx 43В.$$

Максимальная мощность нагрузки ФУВ

$$P_{0.макс} = U_{0.макс} \cdot I_{0.макс} = 43 \cdot 20 = 860Вт.$$

Максимальное обратное напряжение на тиристорах трехфазного ФУВ согласно табл. 1.6 [4] равно

$$U_{\text{обр}} = U_2 \sqrt{6} = 39,3 \cdot \sqrt{6} = 96,2 \text{ В}.$$

Рассчитанное значение $U_{\text{обр}}$ должно составлять $(0,6 \dots 0,8) U_{\text{зс.п}}$, где $U_{\text{зс.п}}$ – повторяющееся импульсное напряжения на тиристоре в закрытом состоянии; $(0,6 \dots 0,8)$ – коэффициент запаса по напряжению. Класс тиристора определяется по формуле

$$U_{\text{зс.п}} = U_{\text{зс.обр}} = \frac{U_{\text{обр}}}{0,6 \dots 0,8} = \frac{96,2}{0,6 \dots 0,8} = (160 \dots 120) \text{ В}$$

Округляем первое значение в скобках до 200В; Таким образом, выбирается тиристор второго класса. Т122-20-2.

Максимальное напряжение на обратном диоде не превышает $1,2 \cdot U_{0.\text{макс}} = 57,6 \text{ В}$, поэтому выбирается диод типа КД202В с обратным напряжением $U_{\text{обр}} = 100 \text{ В}$, что обеспечивает достаточный запас по $U_{\text{обр}}$.

2. Расчет трансформатора и дросселя сглаживающего фильтра.

Расчет и построение нагрузочных характеристик.

Полученные в п.1 данные позволяют приступить к расчету трансформатора и дросселя фильтра по методике изложенной в [4]. После уточнения значений $R_{\text{вых.ф}}$ и $R_{\text{ф}}$ строят три нагрузочные характеристики

$$U_0 = f(I_0) \Big|_{\alpha=0^0}.$$

Положим, что расчеты трансформатора и дросселя дали следующие результаты: $R_{\text{вых.ф}} = 0,12 \text{ Ом}$; $R_{\text{ф}} = 0,11 \text{ Ом}$. Падение напряжения на активном сопротивлении дросселя при $I_0 = I_{0.\text{макс}} = 20 \text{ А}$ $\Delta E_{\text{др}} = 0,11 \cdot 20 = 2,2 \text{ В}$; падение напряжения на выходном сопротивлении фазы $I_{0.\text{макс}} \cdot R_{\text{вых.ф}} = 20 \cdot 0,12 = 2,4 \text{ В}$.

С учетом новых значений сопротивления потерь

$$U_{2m} = \frac{30 + 1 + 2,2 + 2,4}{0,8 \cdot 3\sqrt{3} \cdot 0,956} \approx 56,26 \text{ В};$$

$$U_2 = 0,707 \cdot U_{2m} = 0,707 \cdot 56,26 = 39,8 \text{ В}.$$

Разница между ранее полученными величинами U_{2m} , U_2 и новыми не существенна, поэтому корректировка расчетов не требуется.

Нагрузочные характеристики строят по формуле (7,а) при $\alpha = 0^0$, для

трех значений напряжения питающей сети: номинального и двух предельных: $U_{сет}$, $0,8 \cdot U_{сет}$, $1,2 \cdot U_{сет}$. Исходная формула

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3}U_{2m}}{2\pi} - I_0(R_{вых.ф} + R_{ф}) - U_v,$$

в двух других амплитуда фазного напряжения домножается на коэффициент 0,8 и 1,2.

Результаты расчетов сведены в таблицу 1 и изображены на рис.9.

Таблица 1

I_0, A	0	0,3	1		16	18	20
U_0, B	45,9	44,83	44,67		41,22	40,76	40,3
U_0^-, B	36,72	35,65	35,49		32,04	31,58	31,12
U_0^+, B	55,08	54,01	53,85		5,04	49,94	49,48

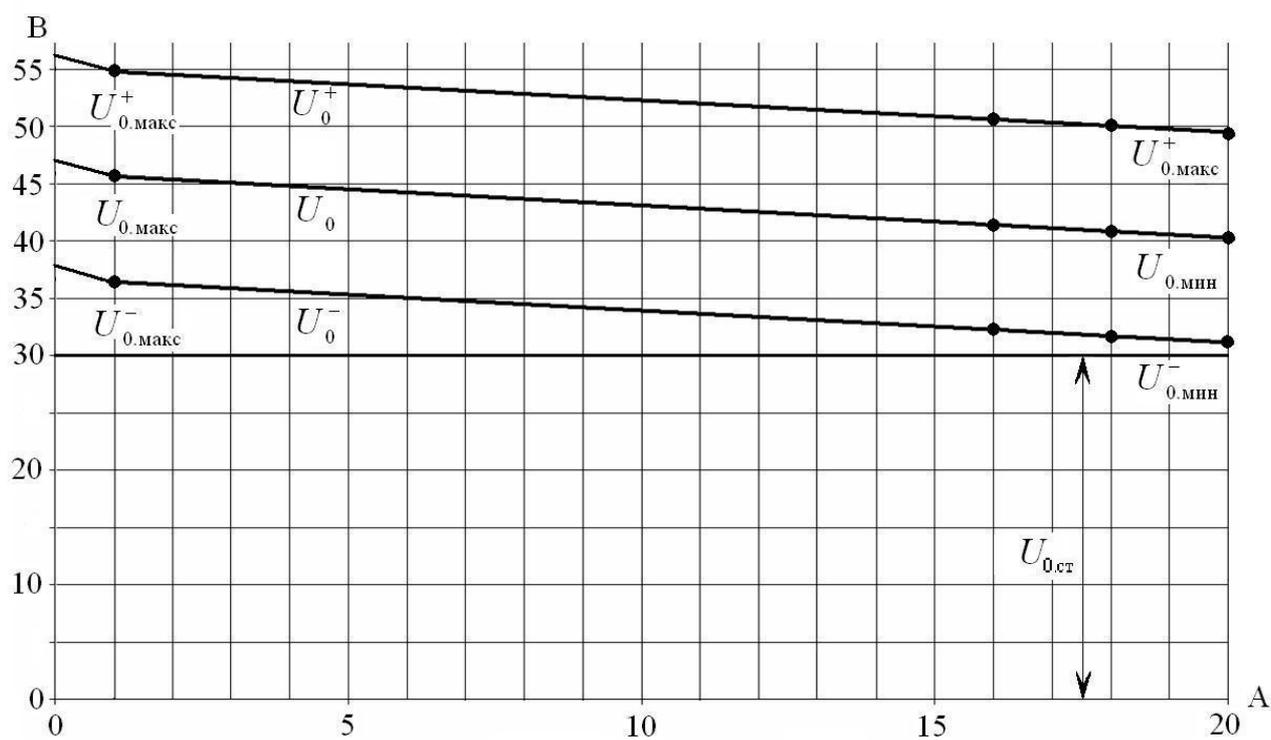


Рис. 9

ПРИМЕР 2.

Условия

1. Напряжение питающей сети $220\text{В} \pm 15\%$, $f = 50\text{Гц}$; сеть трехфазная. ФУВ трехфазный мостовой полууправляемый.
2. Выходное сопротивление фазы трансформатора $R_{\text{вых.ф}} \approx 0,09\text{Ом}$; пределы измерения тока нагрузки $U_{0.\text{ст}} = 27\text{В}$.

Задание

1. Выбрать минимальный угол включения $\alpha_{\text{мин}}$. Рассчитать напряжение U_{2m} , U_2 , мощность нагрузки $P_{0.\text{макс}}$. Выбрать тиристоры ФУВ и обратный диод.
2. Рассчитать трансформатор и дроссель сглаживающего фильтра по методике [4]. Уточнить величины сопротивлений $R_{\text{вых.ф}}$ и $R_{\text{ф}}$.
3. Рассчитать нагрузочные и регулировочные характеристики.
4. Построить графики нагрузочных и регулировочных характеристик в соседних координатных системах. Определить диапазоны изменения углов включения тиристоров.

Расчет

1. Выбор и расчет $\alpha_{\text{мин}}$, U_{2m} , P_0 ; выбор тиристоров и диодов.

По условию задания в качестве регулирующего элемента (РЭ) системы стабилизации используется полууправляемый мостовой трехфазный ФУВ. Идеализированная регулировочная характеристика данного ФУВ [3] имеет вид

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3} \cdot U_m}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha).$$

В режиме максимальной отдачи при $\alpha = 0^\circ$

$$U_{0.\text{макс}} = \frac{3\sqrt{3} \cdot U_m}{2\pi} = \frac{3U_{\text{м.л}}}{\pi}.$$

Относительная форма записи регулировочной характеристики

$$\frac{U_0}{U_{0.\text{макс}}} = \bar{U}_0 = 0,5 \cdot (1 + \cos \alpha).$$

Судя по этой записи график регулировочной характеристики выглядит также, как и для двухпульсного ФУВ. Рабочий диапазон углов включения находится в пределах $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$. Минимально-достаточные значения $K_{\text{ФУВ}}$ на краях диапазона 0,25.

Чтобы рассчитать U_{2m} , U_2 , $U_{0.\text{макс}}$, $P_{0.\text{макс}}$ нужны сведения о величинах $R_{\text{вых.ф}}$, R_{ν} , $R_{\nu 0}$ и $R_{\text{ф}}$. Примерное значение $R_{\text{вых.ф}}$ известно из условий

задания. Сопротивление тиристорov в открытом состоянии $R_v = R_{oc}$ и также прямо смещенных диодов приходится заменять в формулах расчета на равноценные параметры, а именно – падения напряжения $U_v = U_{oc}$ и $U_v = U_{пр}$. Для этого необходимо выбрать тиристоры и диоды ФУВ. Приведем рассуждения, на основании которых осуществляется выбор.

Максимальный ток нагрузки $I_{0.макс} = 30A$. В режиме максимальной отдачи, когда $\alpha = 0^0$, доля постоянного тока через каждую пару тиристор-диод (из трех пар), проводящую ток в течении периода, $I_{0.v} = I_{0.макс} / 3 = 10A$. Действующее значение тока через каждую пару $I_v = 0,58 \cdot I_{0.макс} = 17,4A$. Это значение является ориентиром при выборе тиристора по току.

В справочнике [5] выбираем тиристор серии Т131-40. Ток $I_{0.ср.макс} = 40A$. Тиристоры данной серии выпускаются на напряжения $U_{ак} = U_{зс}$ от 100В до 1200В. В перечне параметров отсутствуют сведения о сопротивлении R_{oc} , но приведена величина падения напряжения на тиристоре в открытом состоянии $U_{oc.и}$, которое создает импульс тока, равный $3,14 \cdot I_{0.ср.макс} = 3,14 \cdot 40 = 125,6A$. Так как $I_{0.v} = 10A$, то допустимо ограничиться падением напряжения $U_{oc} = U_v \approx 1B$.

Обратный диод V_0 . Ток обратного диода $I_{v,0}$ в схеме несимметричного трехфазного ФУВ не превышает 14% от $I_{0.макс}$ [3], т.е.

$I_{v,0} = 0,14 \cdot 30 = 4,2A$. В справочнике [6] выбираем диод типа КД203А с электрическими параметрами: $I_{пр.ср} = 10A$; $U_{пр.ср} = U_v \approx 1B$;

$U_{обр.макс} = 420B$.

Выбор класса тиристорov и диодов моста будет проведен после расчета амплитуды фазного напряжения на вторичных обмотках трансформатора.

Активное сопротивление обмотки дросселя R_ϕ можно определить в первом приближении руководствуясь данными таблицы 1.3 [4]. Как пользоваться таблицей?

По условию задания $U_{0.ст} = 27B$, причем $U_{0.ст}$ несколько меньше, но близко к значению $U_{0.мин}^-$. При колебаниях напряжения сети $\pm 15\%$ напряжение $U_{0.мин}^+$ больше $U_{0.ст}$ примерно на 15%, а $U_{0.мин}^+$ на 30%, т.е.

$$U_{0.мин}^+ \approx 1,3U_{0.ст} = 1,3 \cdot 27 = 35,1B.$$

Мощность нагрузки выпрямителя при $\alpha = 0^0$

$$P_0 \approx U_{0.\text{мин}}^+ \cdot I_{0.\text{макс}} = 35,1 \cdot 30 = 1053 \text{ Вт}.$$

По таблице 1.3 находим: при $P_0 = (1000 \dots 3000) \text{ Вт}$.

$\Delta E_{\text{др}} = (0,05 \dots 0,035) \cdot U_{0.\text{мин}}^+$. Расчет $\Delta E_{\text{др}}$ проводим по большему пределу чисел данных в скобках.

$$\Delta E_{\text{др}} \approx 0,05 \cdot 35,1 = 1,755 \approx 1,76 \text{ В} = R_{\text{ф}} \cdot I_{0.\text{макс}},$$

$$R_{\text{ф}} = \Delta E_{\text{др}} / I_{0.\text{макс}} \approx 0,06 \text{ Ом}.$$

Теперь следует внести изменения в формулы нагрузочных характеристик (5)

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3} \cdot U_{2m}}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha) - 2U_v - I_0 (R_{\text{вых.ф}} + R_{\text{ф}}) \quad (9,а)$$

для диапазона углов $0^0 \leq \alpha \leq 60^0$;

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3} \cdot U_{2m}}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha) - 2U_v \cdot \frac{\pi - \alpha}{\pi} - I_0 (R_{\text{вых.ф}} \cdot \frac{\pi - \alpha}{\pi} + R_{\text{ф}}) - \frac{\alpha}{\pi} R_{v0} \quad (9,б)$$

для диапазона углов $60^0 \leq \alpha \leq 180^0$.

Итак, известны в первом приближении параметры элементов силовой цепи:

$$\alpha_{\text{мин}} = 30^0; U_v = U_{\text{ос}} = 1 \text{ В}; U_{v0} = 1 \text{ В}; R_{\text{ф}} = 0,06 \text{ Ом}; R_{\text{вых.ф}} \approx 0,09 \text{ Ом};$$

$$I_{0.\text{макс}} = 30 \text{ А}; U_{0.\text{ст}} = 27 \text{ В}.$$

Выбранный угол включения $\alpha_{\text{мин}}$ меньше 60^0 , поэтому при расчете U_{2m} , U_2 используется формула (9,а)

$$U_{0.\text{ст}} = 0,85 \frac{3\sqrt{3} \cdot U_{2m}}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha_{\text{мин}}) - 2U_v - I_{0.\text{макс}} (R_{\text{вых.ф}} + R_{\text{ф}})$$

Амплитуда фазного напряжения вторичной обмотки

$$U_{2m} = \frac{[U_{0.\text{ст}} + 2U_v + I_{0.\text{макс}} (R_{\text{вых.ф}} + R_{\text{ф}})] \cdot 2\pi}{0,85 \cdot 3 \cdot \sqrt{3} \cdot (1 + \cos \alpha_{\text{мин}})}$$

$$U_{2m} = \frac{[27 + 2 + 30(0,09 + 0,06)] \cdot 6,28}{0,85 \cdot 3 \cdot 1,732 \cdot 1,866} = 25,52 \text{ В}$$

Действующее значение фазного напряжения

$$U_2 = 0,707 \cdot U_{2m} = 0,707 \cdot 25,52 = 18,04 \approx 18 \text{ В}.$$

Максимальное напряжение на нагрузке ФУВ при $\alpha_{\text{мин}}$, $I_0 = I_{0.\text{мин}}$ и номинальном напряжении сети

$$U_{0.\text{макс}} \approx U_{0.\text{хх}} = \frac{3\sqrt{3} \cdot U_{2m}}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha_{\text{мин}}) - 2U_v - I_{0.\text{мин}} (R_{\text{вых.ф}} + R_{\text{ф}}),$$

$$U_{0.\text{макс}} = \frac{3\sqrt{3} \cdot 25,52}{6,28} \cdot 1,866 - 2 - 0,4(0,09 + 0,06) = 37,34 \text{ В}$$

Максимальное напряжение на нагрузке на верхнем пределе напряжения сети: $U_{0.\text{макс}}^+ \approx U_{0.\text{макс}} \cdot 1,15 = 42,94\text{В}$.

Мощность нагрузки в режиме максимально отдачи

$$P_0 \approx U_{0.\text{макс}} \cdot I_{0.\text{макс}} = 37,34 \cdot 30 = 1120,2\text{Вт}.$$

Максимальное обратное напряжение на тиристорах и диодах трехфазного полууправляемого моста. Особенностью схемы является то, что при углах включения $\alpha > 60^\circ$ она переходит в режим трехфазного однополупериодного ФУВ линейного напряжения [3], поэтому, согласно табл. 1.6 [4]

$$U_{\text{обр}} = \sqrt{6} \cdot U_2 = 18\sqrt{6} = 44,1\text{В}$$

Расчетное напряжение $U_{\text{обр}}$ не должно превышать $(0,6 \dots 0,8) U_{\text{зс.и}}$, где $U_{\text{зс.и}}$ – повторяющееся импульсное напряжение на тиристоре в закрытом состоянии (то же справедливо относительно диодов); $(0,6 \dots 0,8)$ - коэффициент запаса по напряжению.

Класс тиристора определяется из соотношения

$$U_{\text{зс.л}} = U_{\text{зс.обр}} = \frac{U_{\text{обр}}}{0,6 \dots 0,8} = \frac{44,1}{0,6 \dots 0,8} = (73,5 \dots 55,1)\text{В}$$

Округляем первое значение в скобках до 100В (1^{ый} класс). Т.о. выбраны тиристор Т141-40-1 и диод ВК25-1.

Максимальное напряжение на обратном диоде не более уровня $1,15 \cdot U_{0.\text{макс}} = 42,94\text{В}$. У выбранного ранее, в качестве обратного, диода типа КД203А $U_{\text{обр.доп}} = 420\text{В} \gg 43\text{В}$. Такое превышение $U_{\text{обр.доп}}$ над расчетным нежелательно, т.к. стоимость вентиля растет с увеличением класса.

2. Рассчитать трансформатор и дроссель. Уточнить величины сопротивления $R_{\text{вых.ф}}$, $R_{\text{ф}}$.

Полученные в п.1 данные позволяют приступить к расчету трансформатора и дросселя по методике, изложенной в [4]. После уточнения значения $R_{\text{вых.ф}}$ и $R_{\text{ф}}$ рассчитываются нагрузочные и регулировочные характеристики.

Положим, что результаты расчетов $R_{\text{вых.ф}}$ и $R_{\text{ф}}$ следующие:

$R_{\text{вых.ф}} = 0,1\text{Ом}$; $R_{\text{ф}} = 0,08\text{Ом}$. Падения напряжений на сопротивлениях при максимальном токе нагрузки $\Delta E_{\text{др}} = I_{0.\text{макс}} \cdot R_{\text{ф}} = 30 \cdot 0,1 = 3\text{В}$;

$$I_{0.\text{макс}} \cdot R_{\text{вых.ф}} = 30 \cdot 0,08 = 2,4\text{В}.$$

С учетом новых значений R_ϕ и $R_{\text{вых.}\phi}$ амплитуда фазного напряжения вторичной обмотки

$$U_{2m} = \frac{[27 + 2 + 3 + 2,4] \cdot 6,28}{0,85 \cdot 3 \cdot 1,732 \cdot 1,866} = 26,21\text{В};$$

$$U_2 = 0,707 \cdot U_{2m} = 0,707 \cdot 26,21 = 18,53\text{В}.$$

Разница между ранее полученными величинами U_{2m} , U_2 и новыми несущественна.

3. Расчет нагрузочных и регулировочных характеристик.

Нагрузочные характеристики рассчитывают при $\alpha = 0^0$ для трех значений напряжения питающей сети: номинального и двух предельных

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3} \cdot U_{2m}}{\pi} - 2U_v - I_{0.0} \cdot (R_{\text{вых.}\phi} + R_\phi);$$

$$U_0^- = 0,85 \cdot \frac{3\sqrt{3} \cdot U_{2m}}{\pi} - 2U_v - I_{0.0} \cdot (R_{\text{вых.}\phi} + R_\phi);$$

$$U_0^+ = 1,15 \cdot \frac{3\sqrt{3} \cdot U_{2m}}{\pi} - 2U_v - I_{0.0} \cdot (R_{\text{вых.}\phi} + R_\phi).$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 2

Таблица 2.

I_0, A	0	0,4	1,0		26	28	30
$U_0, \text{В}$	42,25	40,15	40		35,55	35,19	34,71
$U_0^-, \text{В}$	35,9	33,83	33,6		29,22	28,86	28,5
$U_0^+, \text{В}$	48,56	46,5	46,3		41,88	41,52	41,1

Регулировочные характеристики рассчитываются для того, чтобы определить диапазоны изменения углов включения тиристоров ФУВ, который в системе стабилизации выполняет функцию регулирующего элемента (РЭ-ФУВ). Всего рассчитывают и строят в одной координатной системе четыре регулировочные характеристики:

при $R_n = R_{n.\text{мин}}$, $U_{2m}^- = 0,85 \cdot U_{2m}$; при $R_n = R_{n.\text{мин}}$, $U_{2m}^+ = 1,15 \cdot U_{2m}$;

при $R_n = R_{n.\text{макс}}$, $U_{2m}^- = 0,85 \cdot U_{2m}$; при $R_n = R_{n.\text{макс}}$, $U_{2m}^+ = 1,15 \cdot U_{2m}$;

здесь $R_{n.\text{мин}} = U_{0.\text{ст}} / I_{0.\text{макс}}$; $R_{n.\text{макс}} = U_{0.\text{ст}} / I_{0.\text{мин}}$.

В координатной системе U_0 , α на уровне напряжения стабилизации $U_{0.\text{ст}}$ проводят горизонталь. Точки пересечения горизонтали и характери-

стик определяют значения $\alpha_{\text{мин}}$ и $\alpha_{\text{макс}}$, т.е. диапазон изменения α , который в любых условиях работы ФУВ не должен выходить за пределы $\alpha_{\text{мин}} \leq \alpha \leq \alpha_{\text{макс}}$, рассчитанных (выбранных) в п.1.

Поскольку сопротивление тиристоров и диодов неизвестны, вместо них используется другой параметр – падения напряжения U_v , $U_{v0} \approx 1\text{В}$, то в выражения регулировочных характеристик вносятся изменения (такие же, как и в формулы нагрузочных):

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3} \cdot U_{2m} \cdot (1 + \cos \alpha) - 2U_v}{1 + \frac{R_{\text{вых.ф}} + R_{\text{ф}}}{R_{\text{н}}}} \quad (10,а)$$

для диапазона углов включения $0^0 \leq \alpha \leq 60^0$;

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3} \cdot U_{2m} \cdot (1 + \cos \alpha) - \frac{\pi - \alpha}{\pi} \cdot 2U_v - \frac{\alpha}{\pi} U_{v0}}{1 + \frac{R_{\text{вых.ф}} \cdot \frac{\pi - \alpha}{\pi} + R_{\text{ф}}}{R_{\text{н}}}} \quad (10,б)$$

для диапазона углов включения $60^0 \leq \alpha \leq 180^0$

Предельные значения сопротивления нагрузки

$$R_{\text{н.макс}} = \frac{U_{0,\text{ст}}}{I_{0,\text{мин}}} = \frac{27}{0,4} = 67,5 \text{ Ом}; \quad R_{\text{н.мин}} = \frac{U_{0,\text{ст}}}{I_{0,\text{макс}}} = \frac{27}{30} = 0,9 \text{ Ом}$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 3.

Таблица 3.

α^0	30^0	45^0	60^0	90^0	120^0	150^0
$R_{\text{н.мин}} = 0,9 \text{ Ом}; U_{2m}^- = U_{2m} \cdot 0,85 = 21,7\text{В}$						
$U_0^-, \text{В}$	26,25	23,87	20,78	14,38	6,57	1,17
$R_{\text{н.мин}} = 0,9 \text{ Ом}; U_{2m}^+ = U_{2m} \cdot 1,15 = 28,98\text{В}$						
$U_0^+, \text{В}$	35,6	32,4	28,3	21,33	9,46	1,86
$R_{\text{н.макс}} = 67,5 \text{ Ом}; U_{2m}^- = U_{2m} \cdot 0,85 = 21,7\text{В}$						
$U_0^-, \text{В}$	31,4	28,6	24,8	15,9	7,92	1,9
$R_{\text{н.макс}} = 67,5 \text{ Ом}; U_{2m}^+ = U_{2m} \cdot 1,15 = 28,98\text{В}$						
$U_0^+, \text{В}$	42,6	38,8	33,9	22,4	10,62	2,05

4. Построение нагрузочных и регулировочных характеристик.

Характеристики изображены на рис.10. Графики построены в соседних координатных системах и совмещены по осям ординат (направлений U_0). На уровне напряжения стабилизации проведена горизонталь, пересекающая регулировочные характеристики. По точкам пересечения нетрудно определить максимальный диапазон изменения углов включения тиристор моста.

Как видно из расчетов и построений при $\alpha_{\text{мин}} = 30^\circ$ и $R_H = R_{H.\text{мин}}$, на нижнем пределе напряжения питающей сети режим стабилизации не выдерживается $U_0^-(\alpha = 30^\circ) = 26,25\text{В} < U_{0.\text{ст}}$. Очевидно, следует увеличить U_{2m} (U_2) и повторить расчет.

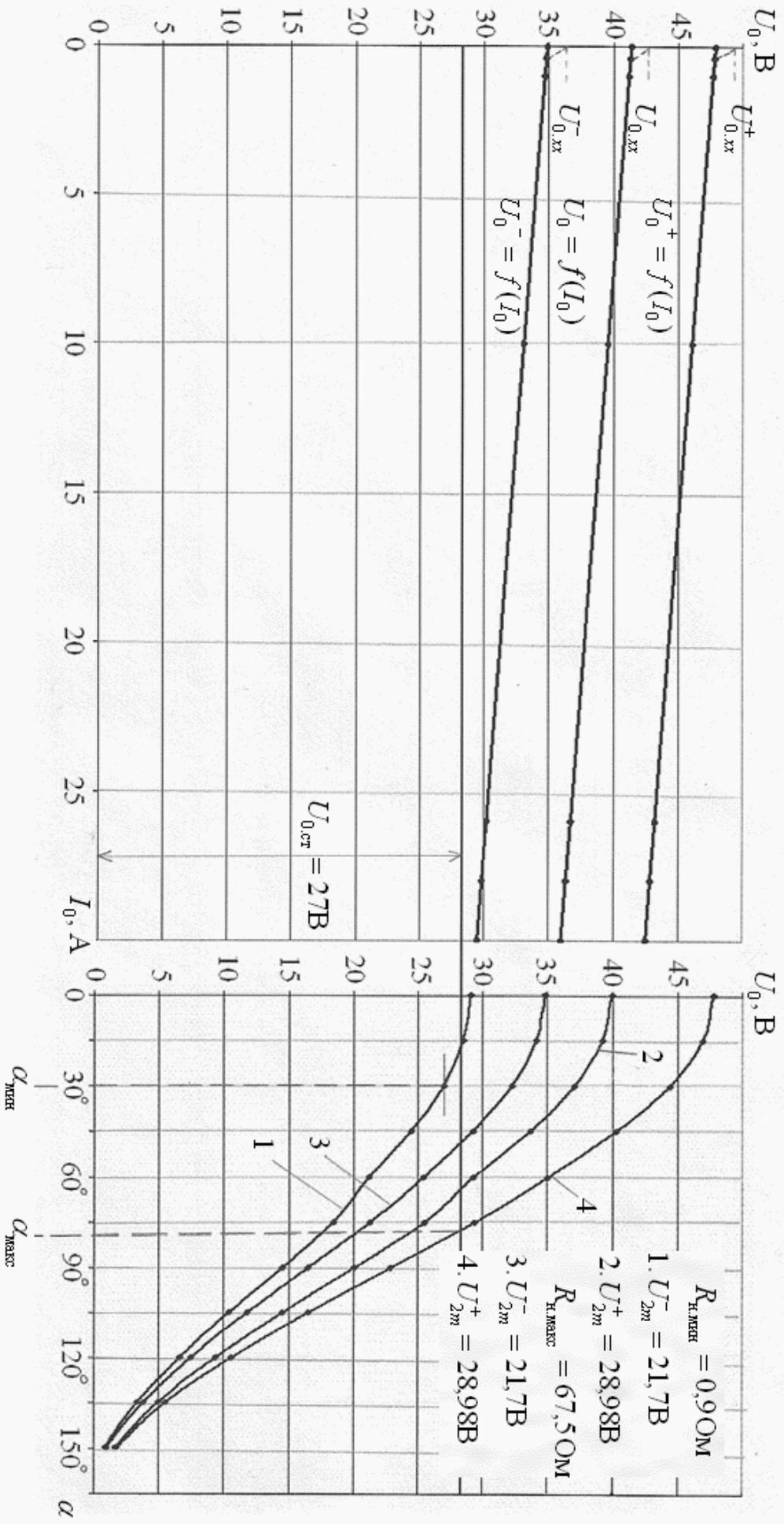


Рис. 10

3.2. Стабилизаторы тока

1. Расчет мощности нагрузки. Построение нагрузочных и регулировочных характеристик

Из задания на КП известны следующие данные:

1. Напряжение питающей сети и отклонение от номинального значения. Например: $U_{\text{сет}} = 380\text{В} \pm 10\%$ или $220\text{В} \pm 20\%$ и т.д.
2. Пределы изменения сопротивления нагрузки $R_{\text{н.мин}} \leq R_{\text{н}} \leq R_{\text{н.макс}}$.
3. Стабилизированный ток нагрузки $I_{0,\text{ст}}$. Выходным сопротивлением фазы трансформатора (выходным сопротивлением трансформатора) $R_{\text{вых.ф}}$ следует задаться, не выходя за пределы $0,1 \dots 0,15$ Ом. После расчета трансформатора значение $R_{\text{вых.ф}}$ уточняется.

Общие положения расчета силовой цепи.

Соображения по выбору тиристоров и диодов ФУВ аналогичны изложенным в общих положениях расчета стабилизаторов напряжения.

Мощность нагрузки ФУВ и соответственно трансформатора рассчитывается при максимальном сопротивлении нагрузки $R_{\text{н.макс}}$. Кроме того приходится учитывать нестабильность напряжения сети. Режим стабилизации тока I_0 должен обеспечиваться в наиболее тяжелых условиях работы системы. Например, при минимально допустимом напряжении сети и максимальном сопротивлении нагрузки $R_{\text{н.макс}}$; или при максимальном напряжении сети и минимальном сопротивлении $R_{\text{н.мин}}$.

Как и в случае системы стабилизации напряжения считаем, что ФУВ работает на нагрузку с индуктивным фильтром (с индуктивностью). После расчета строят три нагрузочные характеристики соответствующие номинальному напряжению сети и двум предельным. Например $U_{\text{сет}} = 220\text{В} \pm 20\%$, значит для расчета $U_0 = f(I_0)$ надо иметь три значения напряжения на вторичной обмотке фазы трансформатора в режиме близком к х.х.: U_{2m} (U_2) для $U_{\text{сет}} = 220\text{В}$; $0,8 \cdot U_{2m}$ ($0,8 \cdot U_2$) для $U_{\text{сет}} = 220\text{В} - 20\% = 176\text{В}$; $1,2 \cdot U_{2m}$ ($1,2 \cdot U_2$) для $U_{\text{сет}} = 220\text{В} + 20\% = 264\text{В}$.

На рис.11 дан пример построения нагрузочных характеристик в координатах U_0, I_0 при $\alpha = 0^0$. Верхняя характеристика отмечена знаком «+» ($1,2 \cdot U_{2m}$), нижняя знаком «-» ($0,8 \cdot U_{2m}$), средняя соответствует номинальным напряжениям сети 220В и на вторичной обмотке трансформатора.

Чтобы обеспечить стабилизированный ток $I_{0.ст}$ при максимальном сопротивлении нагрузки $R_{н.макс}$ и напряжении $U_{0.мин}^-$ необходимо выполнение условия $I_{0.ст} \cdot R_{н.макс} < U_{0.мин}^-$, т.е. должен быть запас по напряжению при $U_{сет} = 176В$. Это условие выполняется, если в ходе расчетов U_{2m} (U_2) положить минимальный угол включения тиристорov $\alpha_{мин} > 0^0$. Рекомендуемые значения $\alpha_{мин}$ связаны с приемлемой крутизной регулировочной характеристики ФУВ, или, что одно и то же, коэффициентом передачи $K_{ФУВ}$. При малых значениях $K_{ФУВ}$ управление тиристорным выпрямителем неэффективно.

После выбора $\alpha_{мин}$ получают расчетные соотношения. В частности, если ФУВ двухфазный однополупериодный, то подставив в (1,а) $\alpha = \alpha_{мин}$, находим

$$I_{0.ст} \cdot R_{н.макс} = 0,8 \cdot \frac{U_{2m}}{\pi} \cdot (1 + \cos \alpha_{мин}) - I_{0.ст} \cdot \left[(R_{вых.ф} + R_v) \cdot \frac{\pi - \alpha_{мин}}{\pi} + \frac{\alpha_{мин}}{\pi} R_{v0} + R_{\phi} \right] \quad (11,а)$$

Отсюда амплитуда фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора

$$U_{2m} = \frac{I_{0.ст} \left[(R_{н.макс} + R_{\phi}) + (R_{вых.ф} + R_v) \cdot \frac{\pi - \alpha_{мин}}{\pi} + \frac{\alpha_{мин}}{\pi} R_{v0} \right] \cdot \pi}{0,8 \cdot (1 + \cos \alpha_{мин})}, \quad (11,б)$$

Действующее значение напряжения вторичной обмотки $U_2 = 0,707 \cdot U_{2m}$.

Если нестабильность напряжения сети $\pm 15\%$ или $\pm 10\%$ от номинального значения, то в знаменателе последней формулы подставляют коэффициент 0,85 или 0,9 соответственно.

Далее следует рассчитать $U_{0.макс}$ при $I_0 = I_{0.мин}$ (режим, близкий к х.х.)

$$U_{0.макс} = \frac{U_{2m}}{\pi} \cdot (1 + \cos \alpha_{мин}) - I_{0.мин} \cdot \left[(R_{вых.ф} + R_v) \cdot \frac{\pi - \alpha_{мин}}{\pi} + \frac{\alpha_{мин}}{\pi} R_{v0} + R_{\phi} \right].$$

Максимальная мощность нагрузки

$$P_{0.макс} = U_{0.макс} \cdot I_{0.макс} \approx U_{0.хх} \cdot I_{0.макс}.$$

Регулировочные характеристики рассчитывают по формуле (1,б). Условия расчета и построения характеристик будут рассмотрены на конкретном примере. По регулировочным характеристикам определяют границы диапазона изменения углов включения тиристорov ФУВ.

ПРИМЕР

Условия.

1. Напряжение питающей сети $U_{\text{сет}} = 220\text{В} \pm 20\%$, $f = 50\text{Гц}$, ФУВ двухпульсный, мостовой, полууправляемый.
2. Пределы изменения сопротивления нагрузки $1\text{Ом} \leq R_{\text{н}} \leq 10\text{Ом}$.
3. Стабилизированный ток нагрузки $I_{0,\text{ст}} = 8\text{А}$. Задается выходным сопротивлением трансформатора $R_{\text{вых.ф}} \approx 0,1\text{Ом}$.

Задание

1. Выбрать $\alpha_{\text{мин}}$. Рассчитать U_{2m} , U_2 , $U_{0,\text{макс}}$, $P_{0,\text{макс}}$; выбрать тиристоры и диоды ФУВ.
2. Рассчитать трансформатор и дроссель по методике, изложенной в [4]. Уточнить сопротивления $R_{\text{вых.ф}}$ и $R_{\text{ф}}$.
3. Рассчитать нагрузочные и регулировочные характеристики ФУВ.
4. Построить характеристики. Определить диапазон изменения углов включения тиристоров ФУВ.

Расчет.

1. Выбор $\alpha_{\text{мин}}$. Расчет U_{2m} , U_2 , $U_{0,\text{макс}}$, $P_{0,\text{макс}}$, выбор тиристоров и диодов ФУВ.

По условию задания в качестве регулирующего элемента (РЭ) системы стабилизации тока используется двухпульсный, мостовой, полууправляемый ФУВ. Изменение угла включения тиристоров от 0^0 до 180^0 позволяет управлять U_0 в пределах $0 \dots U_{0,\text{макс}}$. На практике диапазон изменения α ограничивают значениями $30^0 \dots 150^0$, что обеспечивает регулирование мощности в нагрузке от 97% до 3% $P_{0,\text{макс}}$. За пределами этого диапазона управление выпрямителем неэффективно, чему есть формальное объяснение: крутизна регулировочной характеристики резко падает при α близких к 0^0 и 180^0 . Итак, выбираем $\alpha_{\text{мин}} \approx 30^0$, $\alpha_{\text{макс}} \approx 150^0$.

Чтобы рассчитать U_{2m} , U_2 , $U_{0,\text{макс}}$, $P_{0,\text{макс}}$, необходимы сведения о величинах $R_{\text{вых.ф}}$, R_{v} , $R_{\text{v}0}$, $R_{\text{ф}}$. $R_{\text{вых.ф}}$ известно из условий задания на КП. Сопротивление тиристоров в открытом состоянии и прямосмещенных диодов можно заменить в формулах расчета на падения напряжения $U_{\text{v}} = U_{\text{ос}}$ и $U_{\text{пр}} = U_{\text{v}}$; эти параметры указаны в справочной литературе по

силовым полупроводниковым приборам. Следующий шаг проектирования: выбор тиристоров и диодов ФУВ.

Стабилизированный ток нагрузки $I_{0.ст} = 8A$. В режиме максимальной отдачи, когда $\alpha \approx 0^0$ доля постоянного тока, протекающего через каждую пару тиристор-диод (из двух пар моста) $I_{0.v} = I_{0.ст}/2 = 4A$. Действующее значение тока $I_v = 0,71 \cdot I_0 = 5,68A$. Это значение – ориентир при выборе тиристора и диода по току. В [5] выбираем тиристор серии Т112-10. $I_{ос.ср.макс} = 10A$. Тиристоры данной серии выпускаются на напряжение $U_{ак} = U_{зс}$ от 100В до 1200В. В перечне параметров приведена величина падения напряжения на тиристоре в открытом состоянии $U_{ос.н} = 1,85В$, которое создает импульс тока, равный $3,14 \cdot I_{0.ср.макс} = 3,14 \cdot 10 = 31,4A$. Т.к. $I_{0.v} = 4A$, $I_v = 5,68A$, то допустимо ограничить величину $U_{ос} = U_v \approx 1В$.

В [6] выбираем диоды моста серии 2Д203 с параметрами: $I_{пр.ср} = 10A$; $U_{пр} = U_v \approx 1В$.

Ток обратного диода $I_{v.0}$ в схеме двухпульсного ФУВ не превышает 27% от $I_{0.макс}$ [3] т.о. $I_{v.0} = 0,27 \cdot I_{0.макс} = 0,27 \cdot 8 = 2,16A$. В [6,7] выбираем диод серии 2Д202 с параметрами: $I_{пр.ср} = 5A$; $U_{пр} \approx 1В$.

Класс тиристоров и диодов определяют после расчета U_{2m} , U_2 , $U_{0.макс}$.

Активное сопротивление дросселя R_ϕ можно рассчитать приближенно, руководствуясь данными таблицы 1.3 [4]. Как пользоваться таблицей? По условию задания $R_{н.макс} = 10\text{Ом}$, $I_{0.ст} \cdot R_{н.макс} = 80В$ должно быть несколько меньше $U_{0.мин}^-$. При колебаниях сети $\pm 20\%$

$U_{0.мин}^+ \approx 1,4 \cdot (I_{0.ст} \cdot R_{н.макс}) =$
 $= 1,4 \cdot 80 = 112В$. Мощность нагрузки выпрямителя

$$P_{0.макс} \approx U_{0.мин}^+ \cdot I_{0.ст} = 112 \cdot 8 = 826\text{Вт}.$$

По таблице 1.3 находим: при $P = (300 \dots 1000)\text{Вт}$ $\Delta E_{др} \approx (0,07 \dots 0,05)U_{0.мин}^+$. $\Delta E_{др}$ рассчитывается по меньшему пределу чисел указанных в скобках

$$\Delta E_{др} \approx 0,05 \cdot 112 = 5,6В = R_\phi \cdot I_{0.ст},$$

$$R_\phi \approx \Delta E_{др} / I_{0.ст} = 5,6/8 = 0,7\text{Ом}.$$

Замечание. Мощность, рассеиваемая активным сопротивлением обмотки дросселя $P_{др} = I_{0.ст}^2 \cdot R_{др} = 64 \cdot 0,7 = 44,8\text{Вт}$ велика. При расчете рекомендуется выбрать провод по возможности большего сечения, чтобы уменьшить R_ϕ и $P_{др}$.

Теперь следует внести изменения в формулу нагрузочной характеристики ФУВ (11,а) с учетом $U_v = U_{oc} = I_0 \cdot R_v$ $U_{v.0} = I_0 \cdot R_{v.0}$

$$I_{0.c.} \cdot R_{н.макс} = 0,8 \cdot \frac{U_{2m}}{\pi} \cdot (1 + \cos \alpha_{мин}) - (2U_v \cdot \frac{\pi - \alpha_{мин}}{\pi} + U_{v.0} \cdot \frac{\alpha_{мин}}{\pi}) -$$

$$- I_{0.ст} (R_{вых.ф} \cdot \frac{\pi - \alpha_{мин}}{\pi} + R_{ф}),$$

выражение (11,б) принимает вид:

$$U_{2m} = \frac{\left[I_{0.c.c.} \cdot (R_{н.макс} + R_{ф} + R_{вых.ф} \cdot \frac{\pi - \alpha_{мин}}{\pi}) + 2U_v \cdot \frac{\pi - \alpha_{мин}}{\pi} + U_{v.0} \cdot \frac{\alpha_{мин}}{\pi} \right] \cdot \pi}{0,8 \cdot (1 + \cos \alpha_{мин})}$$

Подставляя $U_v \approx U_{v.0} = 1В$; $R_{вых.ф} \approx 0,1Ом$; $R_{ф} \approx 0,7Ом$;

$R_{н.макс} = 10Ом$; $\alpha_{мин} = 30^0$, находим амплитуду фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора:

$$U_{2m} = \frac{1 \cdot (10 + 0,7 + 0,1 \cdot 0,833) + (2 \cdot 0,833 + 0,167) \cdot 3,14}{0,8 \cdot 1,866} = 186В,$$

действующее значение напряжения вторичной обмотки

$$U_2 = 0,707 \cdot U_{2m} = 0,707 \cdot 186 \approx 131В.$$

Зададим некоторое $I_{0.мин}$ для расчета $U_{0.макс}$ и $P_{0.макс}$; положим

$I_{0.мин} = 0,2А$, тогда

$$U_{0.макс} = \frac{U_{2m}}{\pi} \cdot (1 + \cos \alpha_{мин}) - (2U_v \cdot \frac{\pi - \alpha_{мин}}{\pi} + U_{v.0} \cdot \frac{\alpha_{мин}}{\pi}) - I_{0.мин} (R_{вых.ф} \cdot \frac{\pi - \alpha_{мин}}{\pi} + R_{ф})$$

$$U_{0.макс} = \frac{186}{3,14} \cdot 1,866 - (2 \cdot 0,833 + 0,167) - 0,2(0,1 \cdot 0,833 + 0,7) = 108,7В$$

Максимальная мощность нагрузки при номинальном напряжении сети

$$P_{0.макс} = I_{0.ст} \cdot U_{0.макс} = 8 \cdot 108,7 = 869,6Вт.$$

Максимальное обратное напряжение на тиристорах и диодах моста согласно табл. 1.6 [4]

$$U_{обр} = U_2 \sqrt{2} = 131 \cdot 1,41 = 186В.$$

Рассчитанное напряжение $U_{обр}$ не должно превышать $(0,6...0,8)U_{зс.п}$, где $U_{зс.п}$ – повторяющееся импульсное напряжение на тиристоре в закрытом состоянии (или на диоде, смещенном обратно)

$$U_{зс.п} = U_{зс.обр} = \frac{U_{обр}}{0,6...0,8} = \frac{186}{0,6...0,8} = (310...232)В.$$

Округляем первое число в скобках до 400В (4^й класс). Т.о., выбраны тиристоры и диоды моста: тиристоры Т112-10-4; диоды 2Д203А с параметрами $I_{пр.ср} = 10А$; $U_{пр} = U_v = 420В$.

Напряжение на обратном диоде не превышает амплитуду фазного напряжения вторичной обмотки. Выбирая обратный диод по аналогии с тиристорами ФУВ, находим в [6,7] диод типа 2Д202К: $I_{пр.ср} = 5А$;

$$U_{обр.доп} = 400В.$$

2. Расчет трансформатора и дросселя

Полученные в п.1 данные позволяют приступить к расчету трансформатора и дросселя фильтра по методике, изложенной в [4]. После уточнения величин сопротивления R_ϕ и $R_{вых.ф}$ рассчитываются нагрузочные и регулировочные характеристики.

Положим, что результаты расчета следующие: $R_\phi = 0,35\text{ Ом}$;

$R_{вых.ф} = 0,09\text{ Ом}$. Падение напряжения на сопротивлениях при $I_0 = I_{0.ст}$:

$$\Delta E_{др} = I_{0.ст} \cdot R_\phi = 8 \cdot 0,35 = 2,8В; \quad I_{0.ст} \cdot R_{вых.ф} = 8 \cdot 0,09 = 0,72В.$$

С учетом новых значений R_ϕ и $R_{вых.ф}$ амплитуда фазного напряжения вторичной обмотки

$$U_{2m} = \frac{1 \cdot (10 + 0,35 + 0,09 \cdot 0,833) + (2 \cdot 0,833 + 0,167) \cdot 3,14}{0,8 \cdot 1,866} = 179,3В,$$

действующее значение $U_2 = 0,707 \cdot U_{2m} = 0,707 \cdot 179,3 = 126,8В$.

Разница между прежними величинами U_{2m} и U_2 и новыми заметна, поэтому имеет смысл пересчитать $U_{0.макс}$ и $P_{0.макс}$ (получаем $I_{0.мин} = 0,2А$)

$$U_{0.макс} = \frac{179,3}{3,14} \cdot 1,866 - (2 \cdot 0,833 + 0,167) - 0,2(0,09 \cdot 0,833 + 0,35) = 104,7В,$$

$$P_{0.макс} = U_{0.макс} \cdot I_{0.ст} = 837,6Вт.$$

Разница между новым и прежним значениями $P_{0.макс}$ составляет 3,8% и перерасчет конструктивных параметров трансформатора не потребует. Однако, возможно некоторое изменение числа витков вторичной обмотки, чтобы подобрать требуемую величину U_{2m} .

3. Расчет нагрузочных и регулировочных характеристик.

Нагрузочные характеристики рассчитывают при $\alpha = 0^0$ для трех значений напряжения питающей сети: номинального и двух предельных; зададим пределы изменения тока I_0 : 0,2А...8А; $U_{2m} = 179,3В$

$$U_0 = \frac{2U_{2m}}{\pi} - 2U_v - I_0(R_{\text{вых.ф}} + R_{\text{ф}});$$

$$U_0^- = 0,8 \cdot \frac{2U_{2m}}{\pi} - 2U_v - I_0(R_{\text{вых.ф}} + R_{\text{ф}});$$

$$U_0^+ = 1,2 \cdot \frac{2U_{2m}}{\pi} - 2U_v - I_0(R_{\text{вых.ф}} + R_{\text{ф}}).$$

Результат расчетов сведены в таблицу 4. Дополнительно рассчитана нагрузочная характеристика при $\alpha = \alpha_{\text{мин}} = 30^\circ$ на нижнем пределе напряжения сети.

Таблица 4.

$\alpha = 0^\circ$						
I_0, A	0	0,2	1,0		6	8
$U_0, \text{В}$	114,2	112,1	111,76		109,56	108,68
$U_0^-, \text{В}$	91,36	89,27	88,92		86,72	85,84
$U_0^+, \text{В}$	137	134,9	134,56		132,36	131,48
$\alpha = 30^\circ$						
$U_0^-, \text{В}$		83,32	82,98		80,86	80

По регулировочным характеристикам определяют диапазоны изменения углов включения тиристорov. ФУВ. Всего рассчитывают и строят в одной координатной системе четыре регулировочные характеристики:

при $R_{\text{н}} = R_{\text{н.мин}}, U_{2m}^- = 0,8 \cdot U_{2m}$; при $R_{\text{н}} = R_{\text{н.мин}}, U_{2m}^+ = 1,2 \cdot U_{2m}$;

при $R_{\text{н}} = R_{\text{н.макс}}, U_{2m}^- = 0,8 \cdot U_{2m}$; при $R_{\text{н}} = R_{\text{н.макс}}, U_{2m}^+ = 1,2 \cdot U_{2m}$.

Формула (2,б) характеристики с учетом равенства падений напряжения на тиристорах в открытом состоянии и на диодах, смещенных прямо $U_v = U_{\text{пр}} \approx 1\text{В}$, приводится к виду:

$$U_0 = \frac{\frac{U_{2m}}{\pi} \cdot (1 + \cos \alpha) - U_v \cdot (2 - \frac{\alpha}{\pi})}{1 + \frac{\frac{\pi - \alpha}{\pi} \cdot R_{\text{вых.ф}} + R_{\text{ф}}}{R_{\text{н}}}}$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 5.

Таблица 5.

α	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°
$R_H = R_{H.мин}$						$U_{2m}^- = 0,8 \cdot U_{2m}$					
U_0, B	61,3	58,4	57,3	47,3	39,7	31,6	26,2	15,5	8,82	3,63	0,345
$R_H = R_{H.мин}$						$U_{2m}^+ = 1,2 \cdot U_{2m}$					
U_0, B	92,5	88,25	81,16	75,6	60,1	48	35,5	23,8	13,7	5,86	0,92
$R_H = R_{H.макс}$						$U_{2m}^- = 0,8 \cdot U_{2m}$					
U_0, B	84,2	79,86	73	64,1	53,6	42,4	30	20,7	11,67	4,76	0,451
$R_H = R_{H.макс}$						$U_{2m}^+ = 1,2 \cdot U_{2m}$					
U_0, B	127	120,6	110,4	99	81	64,35	47,4	31,7	18,1	7,7	1,2

4. Построение регулировочных характеристик (рис.11)

Графики нагрузочных и регулировочных характеристик построены в соседних координатных системах и совмещены по осям напряжений. Так как $I_{0,ст} = const$, то выходное напряжение ФУВ U_0 легко пересчитывается в сопротивление нагрузки R_H .

Из таблицы и построений следует, что на нижнем пределе напряжения сети $R_H = R_{H.макс}$ (регулировочная характеристика 3) ФУВ практически обеспечивает необходимое напряжение: $U_0 \approx 80B$, при $\alpha_{мин} \approx 30^{\circ}$. На верхнем пределе напряжения сети $R_H = R_{H.мин}$ максимальный угол включения $\alpha_{мин}$ не превышает 150° (характеристика 2). Таким образом, рекомендуемый диапазон изменения α $30^{\circ} \dots 150^{\circ}$ выдерживается.

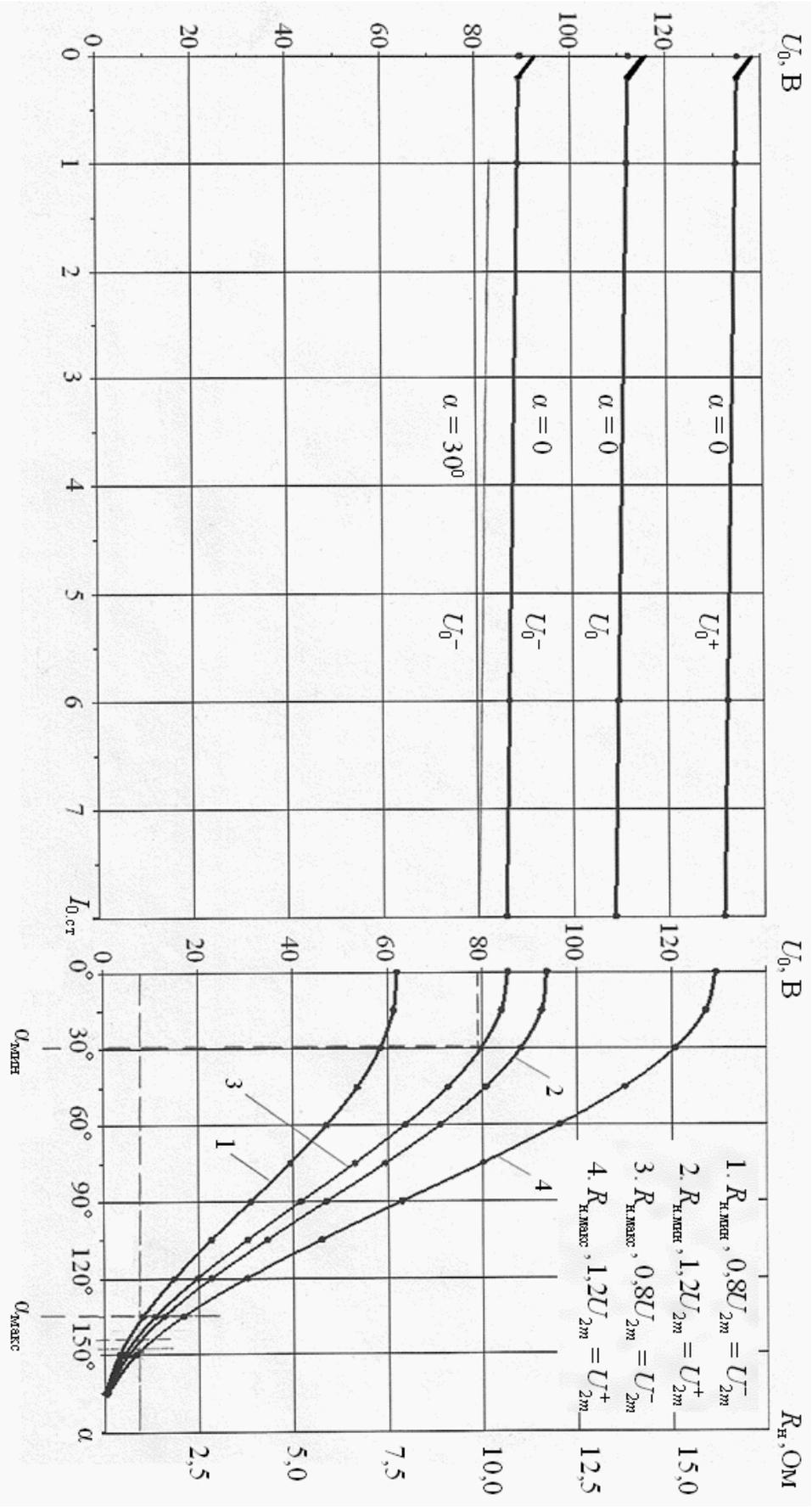


Рис. 11

Библиографический список

1. Грибакин А.С. Схемы управления полупроводниковыми преобразователями систем автоматики: Учеб. пособие / Владим. гос. ун-т. Владимир, 1989. 89 с.
2. Грибакин А.С., Медведев Ю.А., Грибакин В.С. Схемы управления полупроводниковыми преобразователями: Учеб. Пособие / Владим. гос. ун-т. Владимир, 2001. 64 с.
3. Фазоуправляемые выпрямители: Метод. Указания к курсов. Проектированию / Владим. гос. ун-т; сост.: А.С. Грибакин, Ю.А. Медведев, В.С. Грибакин, 2002. 44 с.
4. Источники питания на полупроводниковых приборах. Проектирование и расчет. Под редакцией С.Д. Додика и Е.И. Гальперина. – М.: «Сов. Радио», 1969. 441 с.
5. Тиристоры: Справочник / О.П. Григорьев, В.Я. Замятин и др. – М.: «Радио и связь», 1990. 272 с.
6. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник. Под редакцией Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоиздат. 1982. 774 с.
7. Аксенов А.И., Нефедов А.В., Юшин А.М. Элементы схем бытовой аппаратуры: диоды, транзисторы. Справочник. М.: «Радио и связь», 1998. 224 с.

Оглавление

Введение.....	3
1. Функциональная схема системы стабилизации с ФУВ.....	4
2. Типовые схемы ФУВ.....	6
3. Последовательность расчета элементов силовой цепи в ходе курсового проектирования.....	14
3.1.Стабилизаторы напряжения.....	14
3.2. Стабилизаторы тока.....	31
Библиографический список.....	40