

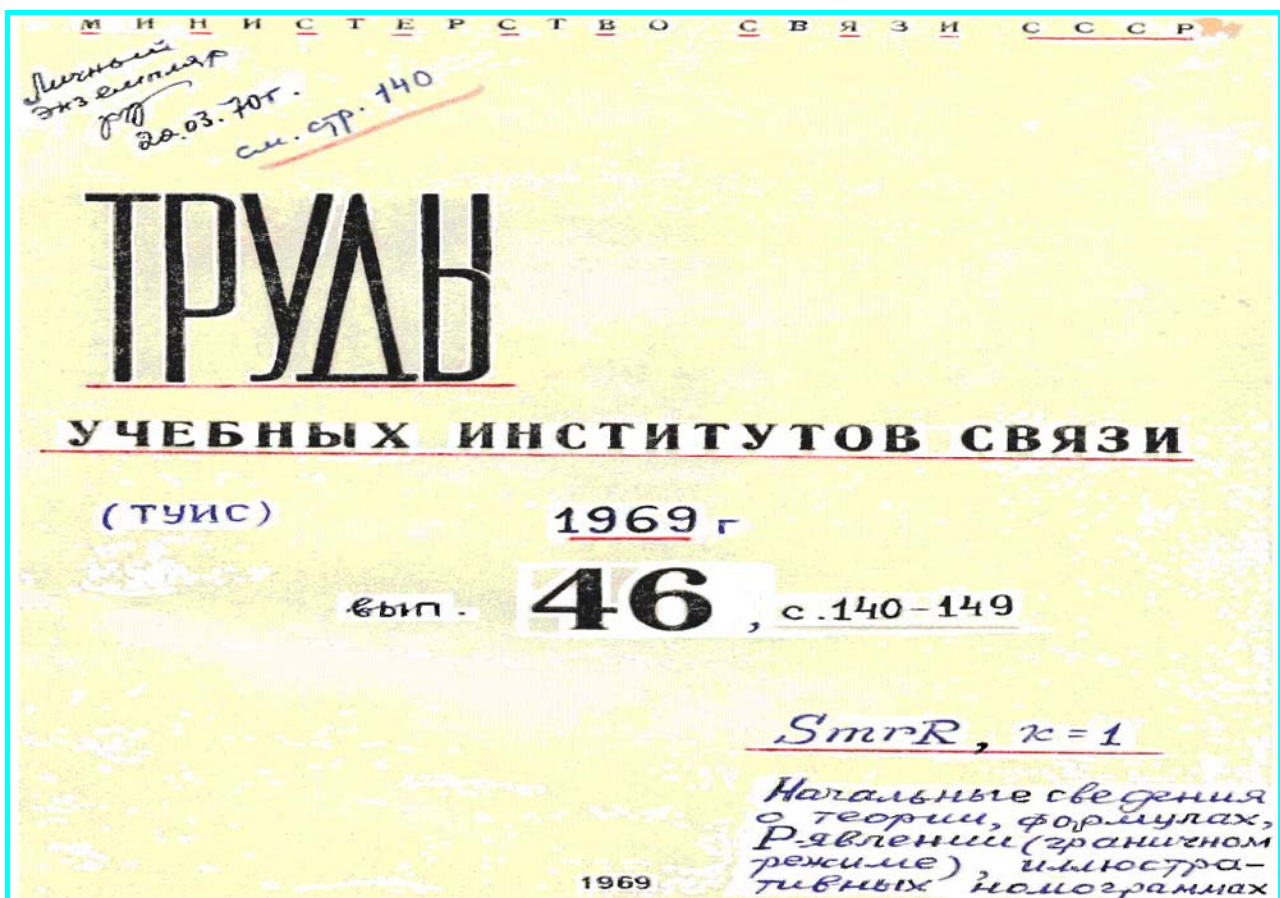
А.М. Репин / *Repin Arkadiy M.*

Резистивные вентильные схемы класса $Sm(\Lambda)rR$. К теории и расчётам /
Resistive ventill power converters, Class $Sm(\Lambda)rR$. To the theory and calculations. [rR.5, 5эл]. 1967–26.9.2013



Знак Конверсики / Sign of Conversics.

Анонс. Впервые в электронном виде и при авторском дизайне даны скан-копии результатов физико-математического анализа электрических процессов в резистивных, многофазных схемах класса $Sm(\Lambda)rR$. При работе базовых вентильных конвертеров электроэнергии (БВК ЭЭ) в режиме выпрямления. Опубликовано в Трудах учебных институтов связи. 1969. Вып.46, с.140-149. Это – вариация на ту же тему, что частично опубликовано в сборнике Труды МЭИС. 1969. Вып.2. **Электронная версия:** *Repin A.M. To the theory and calculations of resistive ventill power converters class $Sm(\Lambda)rR$ / К теории и расчётам резистивных вентильных схем класса $Sm(\Lambda)rR$. [rR.4, 4эл]. 1967–26.9.2013 // Научный электронный архив. URL: <http://econf.rae.ru/article/7905>. 945 кб. (дата обращения: 07.10.2013). Этот материал предложен в сентябре 1967 г. Для НТК ППС МЭИС 1968 г. Однако до 20.5.69 не было известно о возможной публикации. По опыту не опубликованных материалов НТК МЭИС 1967 г. не было уверенности в публикации докладов на НТК 1968г. Поэтому по предложению зав. кафедрой ЭПУС МЭИС были подготовлены варианты статей по циклам rR RC . И в июне 1968 г. направлены кафедрой в ЛЭИС (Ленинград), в редакцию издания ТУИС, общего для ВУЗов связи. Приводимая ниже статья подкорректирована и дана в цвете,*



Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (СПБГУТ), бывший Ленинградский электротехнический институт связи (ЛЭИС) — высшее учебное заведение...

ТРУДЫ

УЧЕБНЫХ ИНСТИТУТОВ СВЯЗИ

ВЫПУСК

46

С. 140 - 149

А. М. Репин

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ m -ФАЗНОГО ВЫПРЯМЛЕНИЯ
ПРИ РАБОТЕ НА ОМИЧЕСКУЮ НАГРУЗКУ
С УЧЁТОМ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ
ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ

Исследованы установившиеся режимы схемы m -фазного выпрямления с учётом активных сопротивлений трансформатора и вентилях. Получены расчётные аналитические и графические зависимости. Выявлены принципиальные особенности работы схемы, получены граничное и критическое значения величины отношения внутреннего активного сопротивления элементов схемы к омическому сопротивлению нагрузки.

ЛЕНИНГРАД—1969

С благодарностью В.Н. Аксёнову, И.И. Белопольскому, Э.Л. Блоху, А.А. Булгакову, Ф.Ф. Волкову, Р.М. Горбовицкому, Л.А. Жекулину, Элизабет А. Зинсер, М.Э. Ключелю, В.М. Лаврову, А.Ф. Макуренкову, Л.Р. Нейману, А.А. Пирогову, П.Н. Поповичу, К. Потрацу, Л.И. Родионовой, В.Я. Турину.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Аксёнов В. Н. проф.

Бесчастнов Н. С. проф.

Бобровская И. К. доц.

Босенко В. Г. доц.

Вишневский А. А. проф.

Гроднев И. И. проф.

Жданов И. М. проф.

Зелях Э. В. проф.

Кляцкин И. Г. проф. (зам ответственного редактора)

Кокшарский Н. С. доц.

Кушнир Ф. В. доц. (ответственный редактор)

Лысаченко И. А. ст. инж.

Метельский Г. Б. доц.

Селезнев И. И. доц.

Сидоров В. М. проф.

Сорензон А. П. доц.

Шейнман Д. И. доц.

Смирнова А. П. ответственный секретарь

Адрес редакции:

г. Ленинград, Д-65, набережная р. Мойки, дом 61,
ЛЭИС

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ m -ФАЗНОГО ВЫПРЯМЛЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ НА ОМИЧЕСКУЮ НАГРУЗКУ С УЧЁТОМ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ

Исследованы установившиеся режимы схемы m -фазного выпрямления с учётом активных сопротивлений трансформатора и вентилей. Получены расчётные аналитические и графические зависимости. Выявлены принципиальные особенности работы схемы, получены граничное и критическое значения величины отношения внутреннего активного сопротивления элементов схемы к омическому сопротивлению нагрузки.

1. Принятые обозначения

$u_0^I; i_0^I; i_1^I; i_2^I$ — мгновенные значения выпрямленного напряжения, выпрямленного тока, тока первого и тока второго вентилей в интервале коммутации I;

$u_0^{II}; i_0^{II}; i_2^{II}$ — тоже в интервале самостоятельной (одиночной) работы вентиля (внекоммутационный интервал II);

m — число фаз выпрямления;

r — внутреннее активное сопротивление элементов схемы (трансформатор, вентили);

R — омическое сопротивление нагрузки;

$e_1 = E_m \sin(\vartheta + \psi_1); e_2 = E_m \sin(\vartheta + \psi)$ — мгновенные значения э. д. с. первой и второй фаз вторичной обмотки m -фазного трансформатора;

E_m — амплитуда; $\psi; \psi_1$ — начальные фазы;

$\vartheta = \omega t$ — независимая переменная; t — время в сек;

$\omega = 2\pi f$ — угловая частота; f — частота

λ — длительность горения вентиля;

$\Delta u = \frac{u_{0\max} - u_{0\min}}{U_0}$ — пульсация выпрямленного напряжения;

U_0 — среднее значение выпрямленного напряжения;

$I_0 = \frac{U_0}{R}$ — среднее значение выпрямленного тока;

$J_{\text{в}}; J_{\text{ф}}$ — эффективные значения тока вентиля и тока фазы трансформатора соответственно;

$n = \frac{r}{R}$ — относительная величина внутреннего активного сопротивления;

$\bar{J}_{\text{в}}; \bar{I}_0; \bar{U}_0; \bar{i}_0$ и т. д. — значения соответствующих величин в относительных единицах;

$u_{\text{обр}}$ — мгновенное значение обратного напряжения на вентиле.

Значение любого из токов в относительных единицах определяется как $\bar{i} = \frac{i}{i_0}$; где i — любой из токов (мгновенное, среднее или эффективное значение) в амперах; $i_0 = \frac{E_m}{R}$ — базисный ток в амперах.

Значение любого напряжения в относительных единицах определяется как $\bar{u} = \frac{u}{u_0}$, где u — любое из напряжений (мгновенное, среднее или эффективное значение) в вольтах; $u_0 = E_m$ — базисное напряжение.

Некоторые дополнительные обозначения указаны в тексте.

2. Схема замещения m -фазного выпрямителя и принятые допущения

Схема замещения m -фазного выпрямителя с нулевой точкой трансформатора* приведена на рис. 1, а (первичная обмотка трансформатора не указана).

В работе приняты допущения.

1. Характеристика вентиля в открытом (проводящем) состоянии линейна, т. е. активное сопротивление вентиля $r_{\text{в}} = \text{const}$.

2. Индуктивность рассеяния трансформатора и ток холостого хода не учитываются. Активное сопротивление трансфор-

* Работа мостовых схем выпрямления в принципе не отличается от анализируемой.

матора $r_{\text{ТР}}$ (для фазы) считается приведенным ко вторичной обмотке, питающей выпрямитель, как и активное сопротивление фазы, питающей сети r_c . Таким образом $r = r_c + r_{\text{в}} + r_{\text{ТР}}$.

3. Вентили предполагаются неуправляемыми.

Диаграмма напряжений и токов приведена на рис. 1, б. Штриховкой отмечено обратное напряжение на вентиле 1. Начало координат выбрано в точке 0. Для анализа процессов достаточно рассмотреть интервал $0 \div \frac{2\pi}{m}$, включающий в себя: 1) интервал

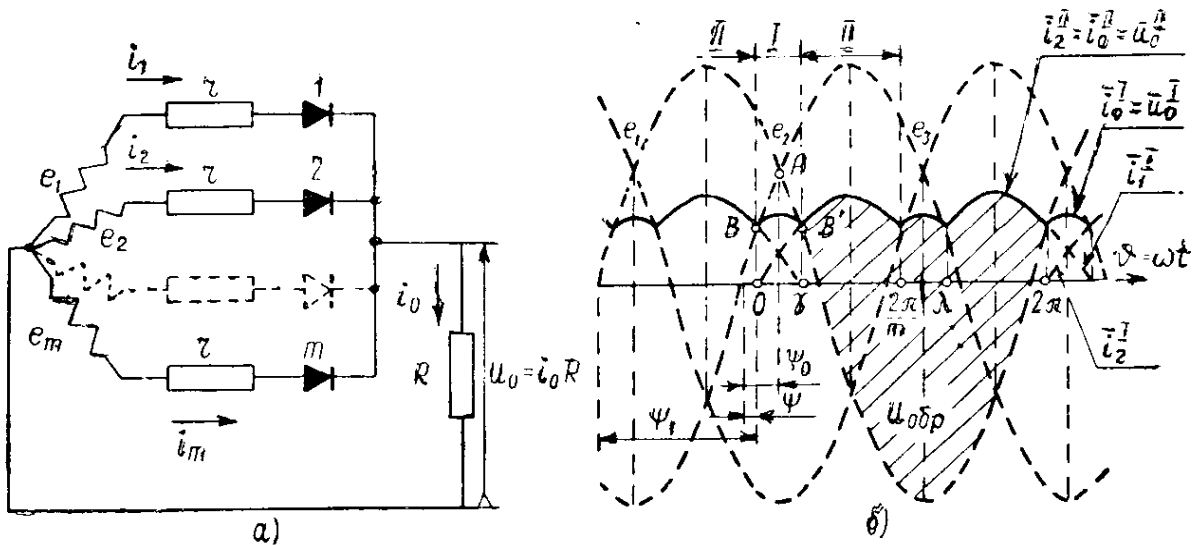


Рис. 1. Схема выпрямления (а), диаграммы напряжений и токов (б)

коммутации (перекрытия) I, когда одновременно работают два вентиля, и 2) интервал II самостоятельной (одиночной) работы вентиля.

Предположим, что в момент $\vartheta = 0$ вентиль 2 вступает в работу. Отметим, что для $m = 1$ и $m = 2$ при любом $n = \frac{r}{R}$ интервал коммутации отсутствует. При $m > 3$ в интервале коммутации могут работать одновременно более двух вентилях (см. ниже). Эти режимы в работе не рассматриваются, поскольку широкого практического интереса не представляют, а при необходимости без затруднений могут быть исследованы на основе настоящей работы. Наличие интервала коммутации при отсутствии индуктивности рассеяния трансформатора объясняется тем, что потенциал анода неработающего вентиля 2 определяется э. д. с. e_2 , а потенциал катода — напряжением $u = e_1 - i_1 r$, поэтому напряжение анод — катод вентиля 2 проходит через нуль не в момент А (как при чисто омической нагрузке), а ранее — в момент 0, где вентиль 2 и вступает в работу. Аналогично вентиль 1 закроется не в момент А (или 0), а позднее — в момент $\vartheta = \gamma$, поскольку в фазе e_2 также появится

падение напряжения от тока i_2 и напряжение анод — катод вентиля 1 станет равным нулю только при $\vartheta = \gamma$.

3. Вывод основных соотношений

а) Интервал коммутации $0 \leq \vartheta \leq \gamma$

Исходные уравнения имеют вид

$$i_0^I = i_1^I + i_2^I; e_1 - ri_1^I = u_0^I; e_2 - ri_2^I = u_0^I,$$

где

$$u_0^I = Ri_0^I, \psi_1 = \frac{2\pi}{m} + \psi.$$

Введя $n = \frac{r}{R}$ и выражая n через ψ , получаем в относительных единицах

$$\bar{i}_1^I = \frac{\sin \psi}{\sin 2 \left(\frac{\pi}{m} + \psi \right)} \sin \left[\vartheta + 2 \left(\frac{\pi}{m} + \psi \right) \right], \quad (1)$$

$$\bar{i}_0^I = \bar{u}_0^I = \frac{\sin \psi}{\sin \left(\frac{\pi}{m} + \psi \right)} \sin \left(\vartheta + \frac{\pi}{m} + \psi \right), \quad (2)$$

$$\bar{i}_2^I = \frac{\sin \psi}{\sin 2 \left(\frac{\pi}{m} + \psi \right)} \sin \vartheta, \quad (3)$$

$$\bar{i}_0^{II} = \bar{i}_2^{II} = \bar{u}_0^{II} = \frac{\sin \psi}{\sin \left(\frac{2\pi}{m} + \psi \right)} \sin (\vartheta + \psi). \quad (4)$$

Из условия $\bar{i}_2^I(0) = 0$ получаем уравнение для определения ψ

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin \frac{2\pi}{m}}{1 + n - \cos \frac{2\pi}{m}}. \quad (5)$$

Можно показать, что точка А (рис. 1, б) является серединой интервала коммутации γ . Выражения для γ и длительности горения вентиля λ имеют вид:

$$\gamma = \frac{\pi(m-2)}{m} - 2\psi, \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{m} + \gamma. \quad (7)$$

¹ Перенести (4) после (9) на следующую стр. 144.

Максимальное значение выпрямленного напряжения (тока) в интервале коммутации определяется выражением

$$\bar{u}_{0\max} = \bar{i}_{0\max} = \bar{i}_0 \left(\frac{\gamma}{2} \right) = \frac{\sin \psi}{\sin \left(\frac{\pi}{m} + \psi \right)};$$

$$0 \leq \bar{u}_{0\max} \leq \sin \frac{\pi(m-2)}{2m} = \cos \frac{\pi}{m} \quad (8)$$

б) Внекоммутационный интервал $\gamma \leq \vartheta \leq \frac{2\pi}{m}$

В этом интервале работает один вентиль 2.
Исходные уравнения:

$$e_2 - ri_2^{\text{II}} = u_0^{\text{II}}; \quad u_0^{\text{II}} = Ri_0^{\text{II}}; \quad i_0^{\text{II}} = i_2^{\text{II}}.$$

В относительных единицах получаем

Добавить
сюда
 i_2^{II} вместо
2 (4)

$$\bar{u}_0^{\text{II}} = \bar{i}_0^{\text{II}} = \bar{i}_2^{\text{II}} = \frac{1}{1+n} \sin(\vartheta + \psi) = \frac{\sin \psi}{\sin \left(\frac{2\pi}{m} + \psi \right)} \sin(\vartheta + \psi) \quad (9)$$

Максимальное значение выпрямленного напряжения будет в момент максимума э. д. с. e_2 , равный $\Theta_m^{\text{II}} = \frac{\pi}{2} - \psi$, и определяется выражением

$$\bar{u}_{0\max}^{\text{II}} = \frac{1}{1+n} = \frac{\sin \psi}{\sin \left(\frac{2\pi}{m} + \psi \right)}. \quad (10)$$

Для $m > 3$ ¹⁾ при определённом значении n (назовём его границным и обозначим $n_{\text{г}}$) максимальные значения $\bar{u}_{0\max}^{\text{I}}$ и $\bar{u}_{0\max}^{\text{II}}$ будут одинаковы. При этом пульсация выпрямленного напряжения будет удвоенной частоты $f_1 = 2mf$. Определим $n_{\text{г}}$, приравняв $\bar{u}_{0\max}^{\text{I}}$ и $\bar{u}_{0\max}^{\text{II}}$, откуда

$$n_{\text{г}} = \frac{2 \left(1 - \cos \frac{\pi}{m} \right) \cdot 2 \cdot 2 \sin^2 \frac{1}{2} \Theta}{2 \cos \frac{\pi}{m} - 1} = \frac{2 \cdot 2 \sin^2 \frac{1}{2} \Theta}{2 \cos \frac{\pi}{m} - 1} \quad (11)$$

1) $\psi_{\text{г}} = \psi_{\text{кр}} + \frac{1}{2} \Theta = \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{m} + \frac{1}{2} \frac{\pi}{m} = \frac{\pi}{2} - \frac{3\pi}{2m} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{m-3}{m} \right)$. Вывод: $n_{\text{г}}$ есть при $m > 3$.

в) Критический режим

В m -фазных схемах выпрямления при $m > 3$ возможны режимы, когда в коммутации участвуют более двух вентилях. По мере увеличения n увеличивается и угол коммутации γ . При некотором критическом значении $n = n_{\text{кр}}$ величина γ достигает

критического значения $\gamma_{кр}$. При этом имеет место работа только по два вентиля, т. е. отсутствует внекоммутационный интервал II. При дальнейшем увеличении n в коммутации участвуют более двух вентилях. Величина критического угла коммутации равна $\gamma_{кр} = \frac{2\pi}{m}$. Для иллюстрации на рис. 2 приведены зоны работы вентилях для $m=6$. Количество одновременно работаю-

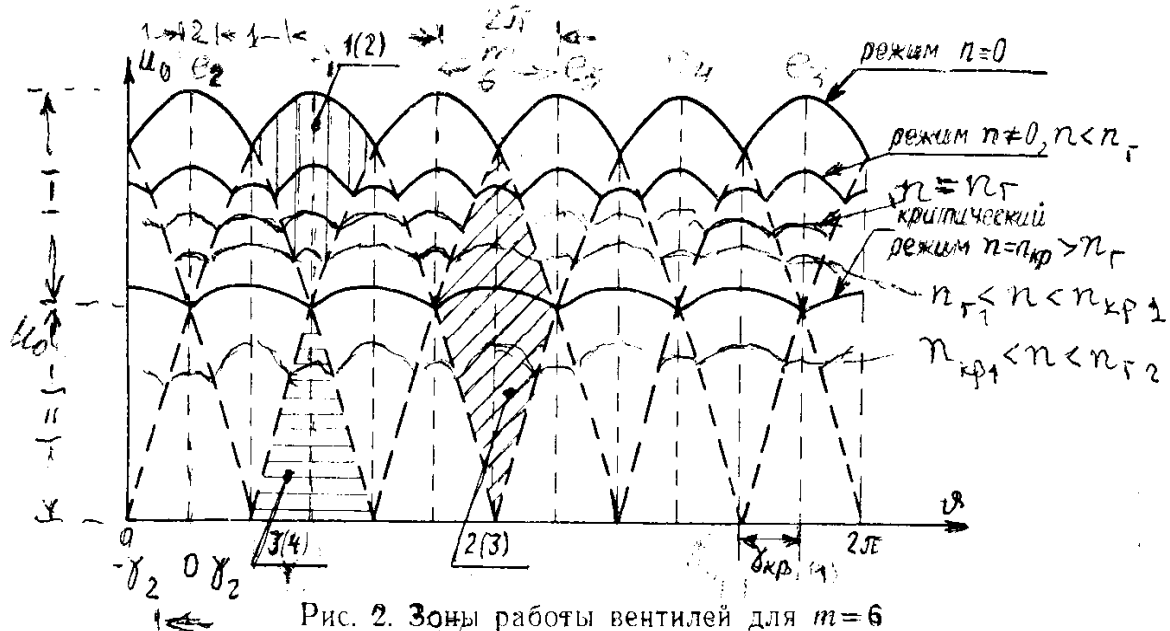


Рис. 2. Зоны работы вентилях для $m=6$

щих вентилях указано цифрами (без скобок — для шестифазной схемы с нулевым выводом, в скобках — для трёхфазной мостовой схемы Ларионова). Аналогичные картины легко могут быть представлены и для $m \neq 6$. Определив n из (10), $\phi_{кр}$ — из (6) подстановкой $\gamma = \gamma_{кр}$ и подставив $\phi_{кр}$ в выражение для n , получаем

$$n_{кр} = \frac{1}{\cos \frac{2\pi}{m}} - 1 = \frac{2 \sin^2 \theta}{\cos 2\theta} \quad (12)$$

Критическая величина длительности горения вентиля равна $\frac{4\pi}{m}$. Исследование режимов при $n > n_{кр}$ принципиальных затруднений не вызывает и здесь не проводится.

$\psi_{кр} = \frac{\pi(m-4)}{2m}$ (12') Т.к. угол $\psi \geq 0$, то из (12') следует, что критический режим возможен лишь в многофазных схемах, при

4. Определение расчётных величин $m \geq 3$ или $m \geq 4$.

1. Среднее значение выпрямленного напряжения (тока)

$$\bar{U}_0 = \bar{I}_0 = \frac{m}{2\pi} \left[\int_0^{\gamma} \bar{i}_0^I d\theta + \int_{\gamma}^{\frac{2\pi}{m}} \bar{i}_0^{II} d\theta \right] \quad (13)$$

После интегрирования и преобразований получаем

$$\bar{U}_0 = \bar{I}_0 = \frac{m}{\pi} \cdot \frac{\sin 2\psi}{4 \cos \frac{\pi}{m} \sin \left(\frac{\pi}{m} + \psi \right)} \left[1 - \operatorname{tg} \psi \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi}{m} + \psi \right) \right]. \quad (13)$$

Для частного случая $n=0$ (т. е. $r=0$) получаем известную формулу

$$\bar{U} = \bar{I}_0 = \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}. \quad (14)$$

2. Максимальный ток вентиля

$$\bar{i}_{\text{вmax}} = \bar{i}_{\text{вmax}}^{\text{II}} = \bar{u}_{0\text{max}}^{\text{II}} = \frac{\sin \psi}{\sin \left(\frac{2\pi}{m} + \psi \right)} = \frac{1}{1+n}. \quad (15)$$

3. Пульсация выпрямленного напряжения Δu . Определяется как разность между максимальным и минимальным значениями выпрямленного напряжения, отнесённая к среднему значению U_0 :

$$\Delta u = \Delta \bar{u} = \frac{u_{0\text{max}} - u_{0\text{min}}}{U_0} = \frac{\bar{u}_{0\text{max}} - \bar{u}_{0\text{min}}}{\bar{U}_0}.$$

Величина $\bar{u}_{0\text{max}}$ определяется по (10) для $n \leq n_r$, или по (8) для $n \geq n_r$. Величина $\bar{u}_{0\text{min}} = \bar{i}_0^{\text{I}}(0) = \sin \psi$.

В итоге получаем

$$\Delta \bar{u} = \frac{\sin \psi}{\bar{I}_0} \cdot \frac{1 - \sin \left(\frac{2\pi}{m} + \psi \right)}{\sin \left(\frac{2\pi}{m} + \psi \right)} \quad (\text{для } n \leq n_r), \quad (16)$$

$$\Delta \bar{u} = \frac{\sin \psi}{\bar{I}_0} \left[\frac{1}{\sin \left(\frac{\pi}{m} + \psi \right)} - 1 \right] \quad (\text{для } n_r \leq n \leq n_{\text{кр}}). \quad (17)$$

4. Действующие значения тока вентиля $J_{\text{в}}$ и вторичной обмотки трансформатора $J_{\text{ф}}$.

Для схем выпрямления с нулевым выводом

$$\bar{J}_{\text{в}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\gamma} (\bar{i}_1^{\text{I}})^2 d\vartheta + \int_0^{\gamma} (\bar{i}_2^{\text{I}})^2 d\vartheta + \int_{\gamma}^{\frac{2\pi}{m}} (\bar{i}_2^{\text{II}})^2 d\vartheta \right]}.$$

После подстановки $\bar{i}_1^I, \bar{i}_2^I, \bar{i}_2^{II}$ и преобразований получаем

$$\bar{J}_B = \frac{V \bar{q}_1 \sin \psi}{\sin \left(\frac{2\pi}{m} + \psi \right)}, \quad (18)$$

где

$$q_1 = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{\pi(4-m)}{m} + \psi - \frac{1}{2} \sin 2 \left(\frac{2\pi}{m} + \psi \right) + \right. \\ \left. + \left[\frac{\sin \left(\frac{2\pi}{m} + \psi \right)}{\sin 2 \left(\frac{\pi}{m} + \psi \right)} \right]^2 \left[\frac{\pi(m-2)}{m} - 2\psi + \frac{1}{2} \sin 4 \left(\frac{\pi}{m} + \psi \right) \right] \right\}.$$

Для частного случая $n=0$ для $m \leq 2$ получаем $m \geq 2!$

$$\bar{J}_B = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} V \sqrt{\frac{\pi}{m} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{m}}.$$

Для $m=1$ и $m=2$ $\bar{J}_B = \frac{1}{2}$. Для мостовой схемы Ларионова ток вентиля будет $\bar{J}'_B = \sqrt{2} \bar{J}_B$, где \bar{J}_B определяется по (18) для $m=6$.

Действующее значение тока фазы вторичной обмотки трансформатора схем с нулевым выводом равно действующему значению тока вентиля, т. е. $\bar{J}_\Phi = \bar{J}_B$.

Для схемы Ларионова ток фазы трансформатора зависит от схемы его соединения. Ток в каждом линейном проводе, подходящем к мосту, равен $\bar{J} = \sqrt{2} \bar{J}'_B = 2\bar{J}_B$.

5. Среднее значение тока вентиля \bar{I}_{0B} определяется как $\bar{I}_{0B} = \frac{\bar{I}_0}{m}$. Для схемы Ларионова следует брать $m=3$.

6. Действующее значение выпрямленного тока получаем, интегрируя в соответствующих пределах \bar{i}_0^I и \bar{i}_0^{II} ,

$$\bar{J}_0 = \frac{1}{2} V \bar{q}_2 \sin \psi, \quad (19)$$

где

$$q_2 = \frac{m}{\pi} \left\{ \frac{\frac{\pi(4-m)}{m} + 2\psi - \sin 2 \left(\frac{2\pi}{m} + \psi \right)}{\sin^2 \left(\frac{2\pi}{m} + \psi \right)} + \right. \\ \left. + \frac{\frac{\pi(m-2)}{m} - 2\psi + \sin 2 \left(\frac{\pi}{m} + \psi \right)}{\sin^2 \left(\frac{\pi}{m} + \psi \right)} \right\}.$$

Для частного случая $n=0$ получим

$$\bar{J}_0 = \sqrt{\frac{m}{2\pi}} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{m} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{m}} = \sqrt{m} \bar{J}_B,$$

откуда для $m=1$ $\bar{J}_0 = \bar{J}_B$, для $m=2$ $\bar{J}_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} \bar{J}_B$.

По полученным выражениям построены графики расчётных величин в зависимости от параметра n , позволяющие быстро с

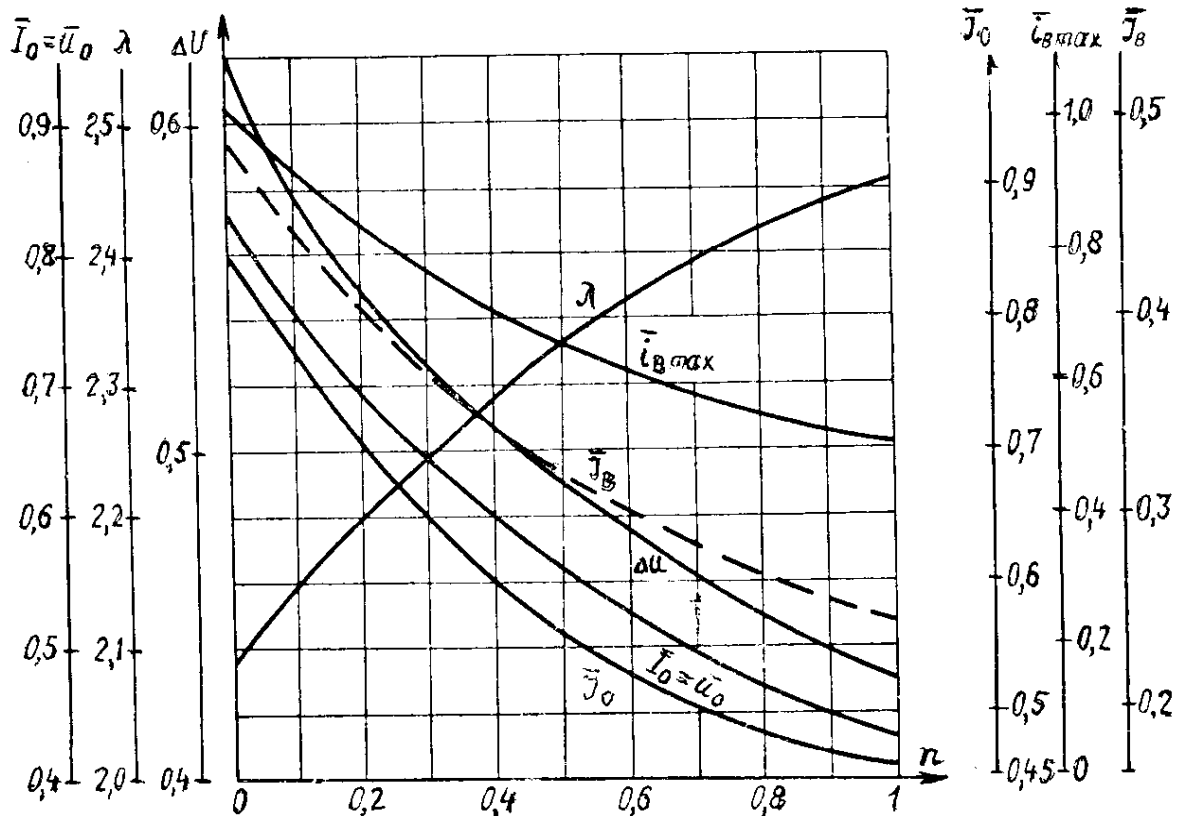


Рис. 3. Расчётные зависимости для $m=3$

достаточной точностью проводить расчёты схем. На рис. 3 приведены графики для $m=3$.

7. Обратное напряжение на вентиле.

В закрытом (непроводящем) состоянии к вентилю приложено напряжение обратной полярности. Это напряжение представляет собой алгебраическую разность между э. д. с. фазы, в которую включён вентиль, и выпрямленным напряжением (рис. 1, б). Максимальная величина обратного напряжения и его форма зависят от схемы выпрямления. В случае $n \neq 0$ амплитуда обратного напряжения меньше, чем при $n=0$. Поскольку холостой ход выпрямителя возможен практически в любой схеме, следует в общем случае выбирать вентили по амплитуде обратного напряжения для $n=0$, т. е. как при чисто омической

нагрузке. Для схем с нулевой точкой и мостовой схемы Ларионова амплитуда обратного напряжения равна амплитуде линейного напряжения $E_{мл} = \sqrt{3}E_m$. Для однополупериодной схемы и однофазной мостовой схемы Греча амплитуда обратного напряжения равна E_m .

8. Коэффициент полезного действия выпрямителя определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_{п}}{P_{з}}; P_{з} = P_{п} + P_{тр} + P,$$

где $P_{п}$ — полезная мощность; $P_{з}$ — потребляемая мощность, P — общая мощность потерь в вентилях, $P_{тр}$ — мощность потерь в трансформаторе. (определение см. [12])

Так как полезная мощность $P_{п} = J_0^2 R$, где J_0 — действующее значение выпрямленного тока, то окончательно получаем

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_{тр} + P}{J_0^2 R}}. \quad (20)$$

Отметим, что при $P_{тр} \gg P$

$$\eta \cong \frac{1}{1 + n} = \bar{\eta}_{\text{вmax}}. \quad (21)$$

Выводы

Исследованы установившиеся режимы работы в m -фазных схемах выпрямления при работе на омическую нагрузку с учётом внутреннего активного сопротивления элементов схемы. Выявлен ряд принципиальных особенностей работы схем (наличие граничного $n_r = \frac{r}{R}$; критического $n_{кр}$ и т. д.). Получены расчётные соотношения, построены расчётные графические зависимости для $m = 1, 2, 3, 6$.

Контрольные эксперименты подтвердили правильность теоретических выкладок.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Аксёнов. Выпрямители и трансформаторные подстанции. Связьиздат. 1961.
2. А. С. Богословский. Силовые полупроводниковые выпрямители. Воениздат. 1965.

Московский
электротехнический институт связи

Статья поступила в редакцию
в июне 1968 г.

Продолжение следует.

© Репин А.М. 1966, -68, -69. 2003. 20.7-26.9.2013