

Двенадцатипульсная схема выпрямителя на базе кольцевой схемы с уравнительным реактором

ИГОЛЬНИКОВ Ю.С., КУРГАНОВ А.А.

Рассматривается схема двенадцатипульсного выпрямителя на базе кольцевой схемы с уравнительным реактором. Показано наличие ряда положительных качеств по сравнению с известными: одинаковая длительность протекания тока через вентили, равная 120 эл. град., одновременная параллельная работа двух вентилях кольцевой схемы, унификация вторичных обмоток трансформатора (две звезды или два треугольника), возможность подключения дополнительной нагрузки к нулевым точкам вторичной обмотки и одновременная работа на разные нагрузки и в шестипульсном, и в двенадцатипульсном режимах. Рассмотрен принцип работы схемы и приведены основные соотношения для расчета трансформатора, вентилях элементов и уравнительного реактора. Результаты моделирования и экспериментальной проверки на макетном образце во всех режимах подтверждают возможность её практического использования. Приведены осциллограммы, полученные при моделировании и экспериментальной проверке. Моделирование схемы при параметрах элементов, соответствующих макетным образцам, показало возможность повышения КПД, а также снижения потерь в полупроводниковых приборах до 20%.

Ключевые слова: трехфазный трансформатор, уравнительный реактор, вентиль, моделирование, напряжение, ток.

Известные классические решения построения преобразователей с повышенной частотой пульсации выходного напряжения [1], обладают рядом недостатков:

- повышенные потери обусловленные протеканием тока через четыре последовательно включенных вентиля;
- большие токовые перегрузки при коротких замыканиях;
- использование трансформаторов с разным коэффициентом трансформации и различными схемами соединения вторичных обмоток.

Улучшение энергетических показателей мощных преобразователей может быть достигнуто за счет применения новых схемотехнических решений, к которым можно отнести многофазные кольцевые схемы [2].

В статье рассматривается двенадцатипульсная схема выпрямителя (рис. 1) на базе коль-

The paper considers the twelve-rectifier circuit based on a ring circuit with smoothing reactor. Analysis of the scheme revealed several positive qualities in comparison with known. These include: the same duration of current flow through the valves equal 120el. deg. simultaneous parallel operation of two valves ring circuit, performing unification transformer secondaries – two stars or two triangles, the ability to connect to the zero point of the secondary winding and the additional load on the simultaneous operation of different loads in a six-pulse and the twelve modes. We consider the principle of the scheme, and basic relations for calculating transformer, rectifier elements and circulating reactor. The results of modeling and experimental verification on the model sample in all modes are the basis for its practical use. Waveform shown in the simulation and experimental verification. Circuit simulation for the parameter values according to the elements of the model sample showed a decrease in losses in semiconductor devices up to 20% and increase efficiency.

Key words: three-phase transformer, surge reactor valve, modeling, voltage, current.

цевой схемы с уравнительным реактором (УР) [3, 4]. К её достоинствам следует отнести:

- использование трансформаторов с одинаковыми вторичными обмотками, соединенными в звезду или треугольник;
- лучшие энергетические показатели;
- меньшее число последовательно включенных вентилях в цепи протекания тока;
- защита от ударных токов;
- высокий коэффициент использования вентилях по току;
- возможность подключения к нулевым точкам вторичной обмотки дополнительной нагрузки и одновременная работа на разные нагрузки и в шестипульсном, и двенадцатипульсном режимах.

Схема (рис. 1) содержит трехфазный силовой трансформатор с двумя одинаковыми вторичными обмотками, соединенными в звезду каждая, двенадцать вентилях, шесть из кото-

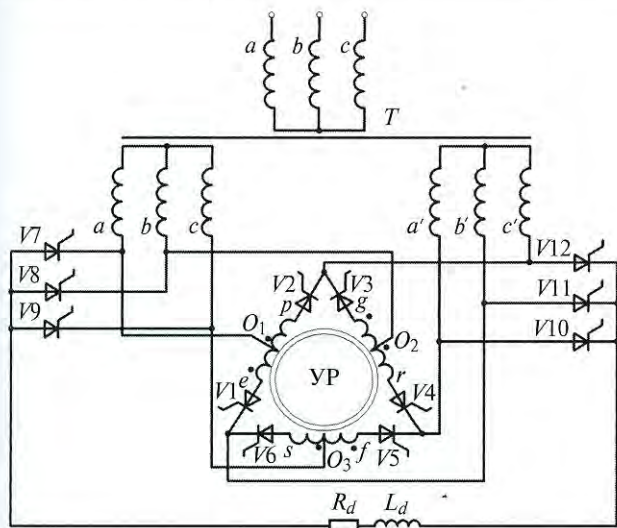


Рис. 1. Схема кольцевого двенадцатипульсного выпрямителя с УР

рых (V7–V12) соединены по мостовой схеме, а другие шесть (V1–V6) – в замкнутое кольцо так, что каждая фаза одной вторичной обмотки через вентили связана с разноименными фазами второй вторичной обмотки. Уравнительный реактор (УР), входящий в схему, выполнен в виде трех обмоток (со средней точкой), расположенных на одном магнитопроводе. Средняя точка каждой обмотки реактора подключена к одной из фазных обмоток одной группы вторичных обмоток трансформатора, а сама обмотка реактора соединена последовательно с одноименными электродами двух вентилях, через которые указанная фазная обмотка соединена с разноименными фазами второй вторичной обмотки. Обмотки реактора соединены между собой через вентили по схеме треугольника. Активно-индуктивная нагрузка R_d-L_d подключена к общим анодам и катодам одной и другой групп вентилях. Следует отметить, что схема допускает подключение дополнительной нагрузки ко вторичным обмоткам по схеме кольцевого выпрямителя с УР [3] и обеспечивает и совместную, и независимую работу.

Рассмотрим работу схемы в двенадцатипульсном режиме с момента времени $t=0$ в соответствии с диаграммами (рис. 2), на которых показаны: ЭДС фазы a (e_a), фазы b (e_b) и фазы c (e_c), напряжение на нагрузке u_d , напряжение на УР u_p и токи вентилях.

Напряжение на нагрузке u_d формируется в результате сложения через УР и группу вентилях (V1–V6) напряжения анодной цепи двух фаз первой звезды, линейного напряжения двух фаз другой звезды через группу вентилях

(V10–V12) и фазного напряжения первой звезды через вентили (V7–V9). В момент времени t_0 вступает в работу вентиль V1, а вентиль V6 продолжает проводить ток (рис 2, в, з). Таким образом выравнивается напряжение анодной цепи фаз a и c первой звезды, которое складывается с линейным напряжением фаз b' и c' другой звезды, а через вентили V10 и V8 и нагрузке складывается с напряжением фазы b первой звезды. В момент времени t_1 вентиль V10 кончает работать, а вентиль V12 (рис. 2, е) вступает в работу, подключая к нагрузке фазу a' взамен фазы c' . В момент t_2 вентиль V6 заканчивает работу, а вентиль V2 начинает проводить ток нагрузки. С этого момента УР выравнивает анодное напряжение в цепи фаз b' и c' другой звезды. В дальнейшем вентили переключаются по аналогичному алгоритму, который можно проследить по диаграммам (рис 2, в–е).

Было выполнено моделирование схемы выпрямителя в программе PSIM [5] (рис. 3). Для моделирования использовалась стандартная библиотека моделей элементов с параметрами, соответствующими разработанному макету.

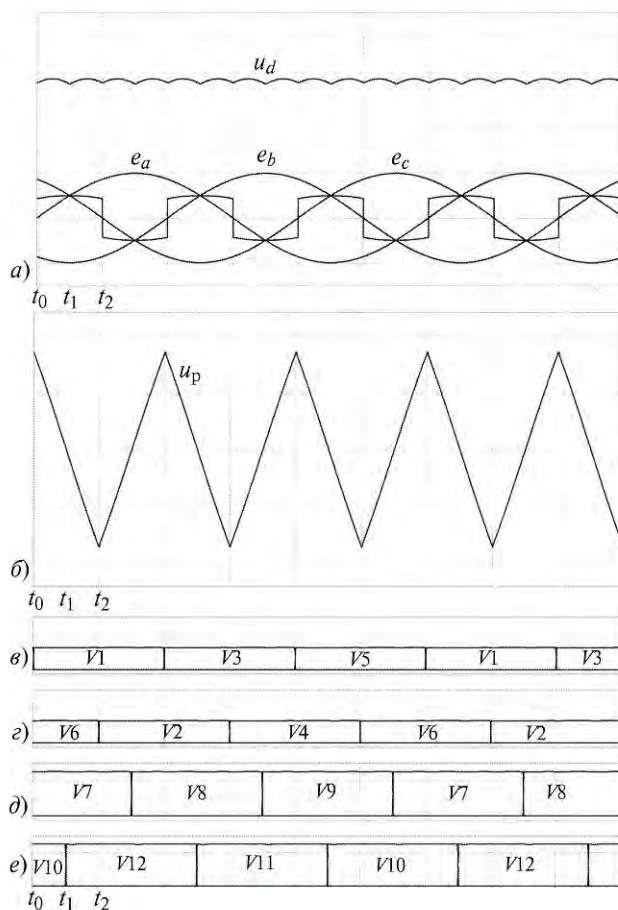


Рис. 2. Диаграммы работы схемы

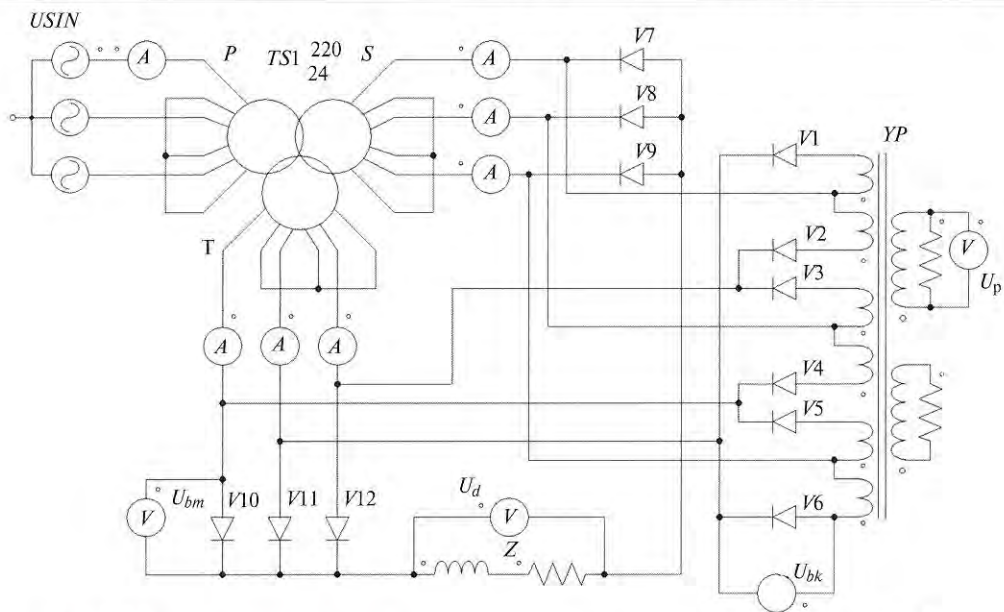


Рис. 3. Модель кольцевого двенадцатипульсного выпрямителя с УР в программе PSIM

Модель схемы выпрямителя (рис. 3) состоит из трехфазного источника ЭДС $USIN$ с частотой 50 Гц и линейным напряжением 220 В, трансформатора $TS1$, обмотки которого соединены по схеме звезда–звезда с коэффициентом трансформации равным 9,2, вентильных элементов ($V1–V12$) и активно-индуктивной нагрузки Z с параметрами $R=10$ Ом, $L=0,1$ Гн. За основу модели трансформатора был выбран трансформатор $TS1$ с параметрами, соответствующими макетному образцу. Уравнительный реактор УР реализован в модели в виде однофазного трансформатора с шестью обмотками.

На рис. 4 представлены: диаграмма выпрямленного напряжения (рис. 4,а), напряжения на УР (рис. 4,б) и токи вентилях (рис. 4,в), полученные в ходе моделирования.

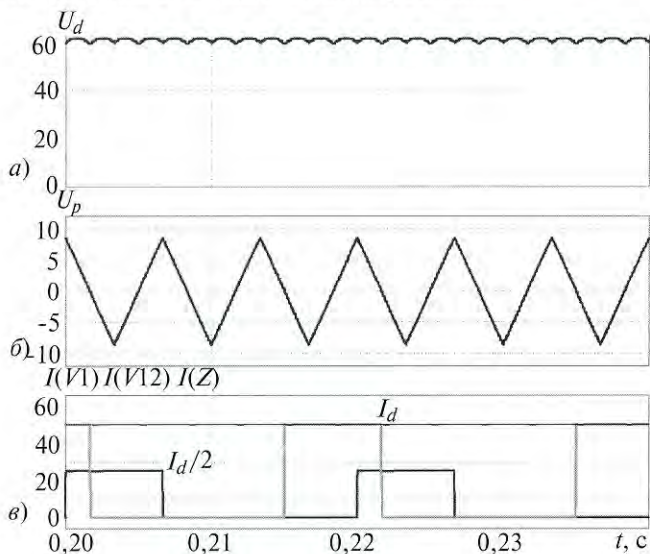


Рис. 4. Диаграмма работы схемы: а – напряжение на нагрузке; б – напряжение на УР; в – ток вентильных элементов ($I_d/2$ – ток через вентиль кольцевой группы, I_d – мостовой группы)

Как видно из диаграммы (рис. 4,а) выпрямленное напряжение имеет двенадцатикратную частоту пульсации, среднее значение которого определяется соотношением:

$$U_d = \frac{9\sqrt{2} + 6\sqrt{6}}{2\pi} \times U_{2\phi} = 4,36U_{2\phi},$$

где $U_{2\phi}$ – действующее значение фазного напряжения вторичной обмотки.

Можно объяснить получение двенадцатикратной частоты пульсаций как сложение выпрямленного напряжения мостовой схемы с выпрямленным напряжением кольцевой схемы с уравнительным реактором, отличающимися фазовым сдвигом в 30 эл. град. Напряжение на уравнительном реакторе (рис. 4,б) формируется известным способом [1].

Эквивалентное напряжение на уравнительном реакторе $U_{\text{э}}$ [1]:

$$U_{\text{э}} = \frac{2\pi - \pi\sqrt{3}}{9\sqrt{2} + 6\sqrt{6}} U_d = 0,028U_d.$$

Токи обмоток уравнительного реактора будут соответствовать токам вентилях, соединённых в кольцо (рис. 4,в). Все вентили схемы проводят ток в течение 120 эл. град, причем вентили ($V1–V6$) проводят половину тока нагрузки I_d . Среднее значение токов вентилях $I_{\text{ак}}$, соединённых в кольцо и их действующее значение $I_{\text{вк}}$ определяются по формулам:

$$I_{\text{ак}} = \frac{I_d}{6}; \quad I_{\text{вк}} = \frac{I_d}{2\sqrt{3}},$$

где I_d – среднее значение тока нагрузки.

Среднее значение токов вентилей анодной и катодной групп моста [6]:

$$I_{ам} = \frac{I_d}{3}.$$

Из принципа работы схемы следует, что обратное напряжение вентилей анодной и катодной групп моста определяются линейным напряжением вторичной обмотки, а вентилей кольцевой схемы – как сумма линейного напряжения одной звезды, выравненного анодного напряжения второй звезды, фазного напряжения второй звезды с фазным напряжением этой же звезды и напряжения полуобмотки УР (рис. 5,а).

Максимальное напряжение на вентилях $U_{вmax}$ кольцевой группы определяется по формуле:

$$U_{вmax} = \frac{3\pi + 2\pi\sqrt{3}}{9\sqrt{2} + 6\sqrt{6}} U_d.$$

Действующее значение тока первичных и вторичных обмоток трансформатора I_1 и I_2 для ступенчатой кривой (рис. 5,б) в соответствии с [7] может быть найдено по формуле:

$$I_2 = \sqrt{\frac{7}{12}} I_d = 0,763 I_d; \quad I_1 = \frac{I_d}{k} \times \sqrt{\frac{13}{6}},$$

где k – коэффициент трансформации.

Габаритная мощность трансформатора для данной схемы определяется формулой:

$$S_T = \frac{3U_{1\phi} I_{1\phi} + 6U_{2\phi} I_{2\phi}}{2},$$

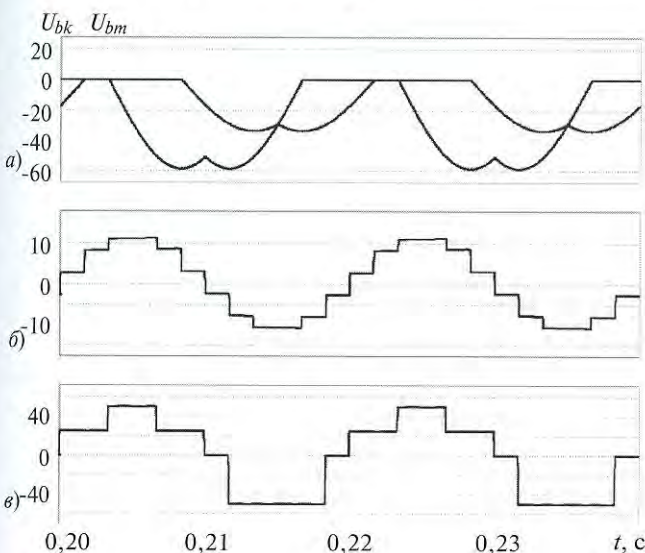


Рис. 5. Диаграмма работы схемы: а – напряжение U_b на вентиле; б – ток фазы а i_{a0} первичной обмотки трансформатора; в – ток фазы а вторичной обмотки трансформатора

где $U_{1\phi}$, $I_{1\phi}$ – соответственно действующее значение фазного напряжения и тока первичной обмотки; $I_{2\phi}$ – ток фазы вторичной обмотки.

В соответствии с найденными значениями токов и напряжений габаритная мощность трансформатора в долях от выпрямленной будет равна $0,945P_d$, а мощность УР, найденная в соответствии с [1], – $0,048P_d$.

Общая габаритная мощность трансформаторного оборудования будет равна $0,993P_d$.

Экспериментальная проверка схемы проводилась на макете, состоящем из силового трехфазного трансформатора с двумя вторичными обмотками габаритной мощностью 3 кВ·А, трех блоков вентилей, соединённых согласно схеме (рис. 1), уравнивающего реактора и нагрузки, состоящей из реостата и дросселя. Питание первичных обмоток осуществлялось от трехфазной сети 220 В, фазное напряжение вторичных обмоток составляло 24 В. Трансформатор и реактор были изготовлены из имеющихся в наличии магнитопроводов.

Диаграммы напряжений, полученные в результате эксперимента, представлены на рис. 6. Они подтверждают результаты теоретического анализа и моделирования.

Небольшие отклонения в выпрямленном напряжении от полученного на модели обусловлены некоторой несимметрией вторичных фазных напряжений трансформатора, а на УР – коммутацией вентилей.

По схеме (рис. 1) проверена проверка работоспособности и при соединении вторичных обмоток в треугольник. Основные диаграммы напряжений и токов, полученные в результате эксперимента, соответствовали соединению обмоток в звезду.

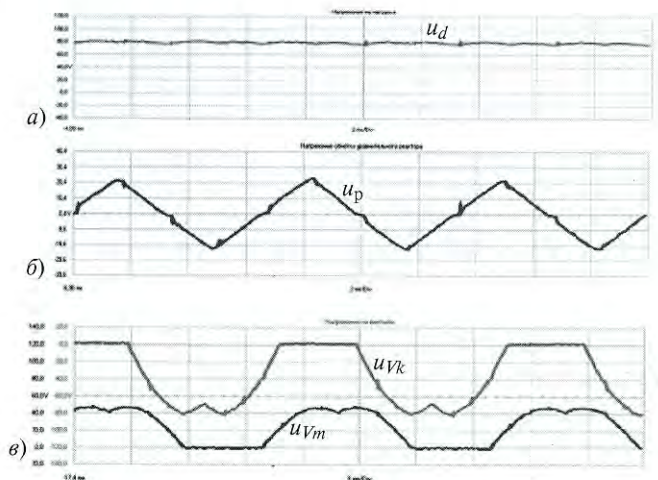


Рис. 6. Осциллограммы работы схемы: а – выпрямленное напряжение на нагрузке; б – напряжение на полуобмотке УР; в – напряжение на вентиле

Была также проверена работоспособность схемы одновременно с двумя нагрузками: одна из них была подключена на выход двенадцатипульсной схемы, вторая — к нулевым точкам звезд в соответствии с кольцевой схемой. Получены результаты оказались также положительными.

Моделирование схемы с моделями реальных модулей и экспериментальная проверка показали снижение потерь мощности в схеме на 25% относительно схемы двух последовательно включенных мостов.

Список литературы

1. **Полупроводниковые** выпрямители / Под ред. Ф.И. Ковалева, Г.П. Мостковой. М.: Энергия, 1978.
2. **Волкова О.Л.** Выпрямители с кольцевыми и лестничными вентильными схемами для систем электроснабжения электрического транспорта. Дисс... канд.техн. наук. Новосибирск, 2011.
3. **Патент RU 2 325 025 С1.** Преобразователь трехфазного переменного напряжения в постоянное / Ю.С.Игольников. БИ. 2008. №14.

4. **Игольников Ю.С., Курганов А.А.** Кольцевая схема выпрямителя с уравнительным реактором // Электротехника. 2013. №5.
5. **PSIM User Manual.** Powersim Technologies Inc., 1999.
6. **Каганов И.Л.** Электронные и ионные преобразователи. Ч. 3. М.:Госэнергоиздат, 1956.
7. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высш. школа, 2002.

Игольников Юрий Соломонович — доцент кафедры ТОЭ ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет (МГУ) им. Н.П. Огарева», канд. техн. наук. Окончил физико-математический факультет МГУ им. Н.П. Огарева в 1959 г. и электротехнический факультет этого же университета в 1964 г. Защитил диссертацию по теме «Регулируемые тиристорные преобразователи с повышенным коэффициентом мощности» в 1976 г. в МЭИ.

Курганов Андрей Александрович — аспирант ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарева». Окончил факультет электронной техники ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарева» в 2011 г.