

ДВЕНАДЦАТИФАЗНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ СХЕМА ВЫПРЯМЛЕНИЯ С КОЛЬЦЕВЫМ КОММУТАТОРОМ

Игольников Ю. С., Нестеров С. А.

ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», г. Саранск, тел. (8342) 29-06-05, E-mail: nesterov@mrsu.ru

Аннотация. В статье описывается эквивалентная двенадцатифазная схема выпрямления трехфазного тока, в которой соединенные друг с другом анодная и катодная группы вентилей трехфазных мостов заменены кольцевым вентильным коммутатором, что позволяет снизить прямое падение напряжения на вентилях выпрямителя. Произведен расчет основных соотношений для схемы выпрямления, приведены векторная и временные диаграммы ее работы.

Ключевые слова: выпрямитель трехфазного тока, двенадцатифазная схема выпрямления, кольцевой коммутатор, прямое падение напряжения на вентилях.

Для снижения пульсаций выпрямленного напряжения и улучшения гармонического состава тока, потребляемого из сети, в мощных установках находит применение двенадцатифазная схема выпрямления на базе последовательно соединенных трехфазных мостов. Мосты питаются от отдельных вторичных обмоток трансформатора, одна из которых соединена в треугольник, а другая — в звезду. За счет сдвига фаз между одноименными линейными напряжениями вторичных обмоток на угол $\pi/6$ обеспечивается режим выпрямления с фазностью $m = 12$, что обеспечивает весьма низкий коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения (1,4% по основной гармонике). Ток, потребляемый из сети, содержит только гармоники с номерами $12n \pm 1$, где $n = 1, 2, 3, \dots$, поэтому доля высших гармоник в сетевом токе невелика (9,1% для 11-й гармоники и 7,7% для 13-й гармоники) [1,2].

Существенным недостатком такой схемы является пониженный КПД, поскольку выпрямленный ток протекает через четыре последовательно соединенных вентиля, создавая прямое падение напряжения и потери мощности на каждом из них.

С целью повышения КПД выпрямительной установки предлагается соединенные друг с другом анодную и катодную группы вентилей, принадлежащих разным мостовым секциям,

заменить кольцевым вентильным коммутатором [3]. При этом схема приобретает вид, показанный на рис. 1.

Произведенная замена не отражается на работе секций. По-прежнему, мгновенные значения выпрямленного напряжения для каждой секции представляют собой огибающие соответствующей шестифазной системы линейных ЭДС (рис. 2а). Суммируясь на участке нагрузки, они дают двенадцатифазную кривую выпрямленного напряжения, среднее значение которого равно

$$U_d = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U_{2л} \approx 2,70 U_{2л}.$$

Порядок работы вентилей катодной и анодной групп остается таким же, как и в исходной

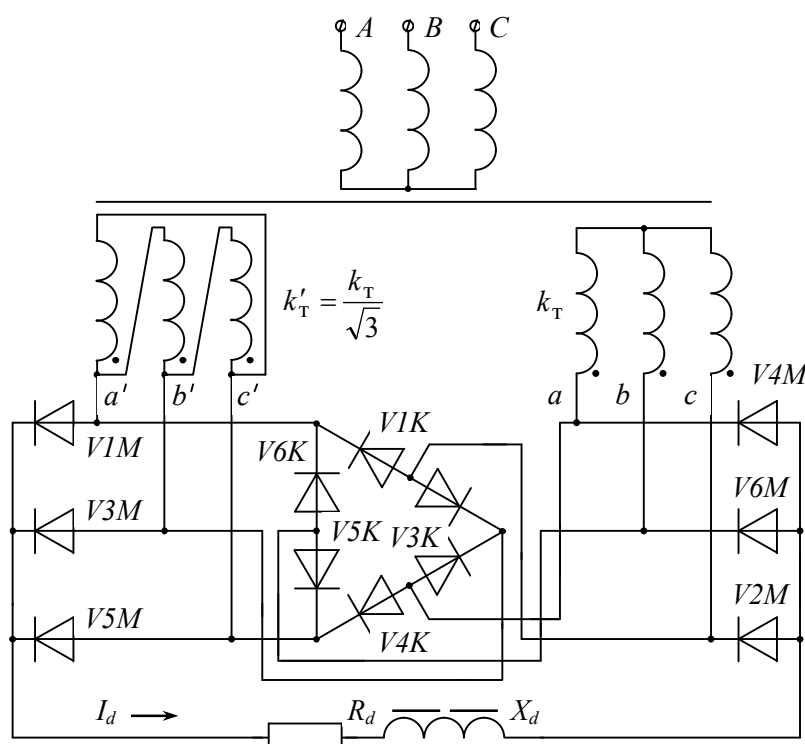


Рис. 1. Двенадцатифазная схема выпрямления с кольцевым коммутатором.

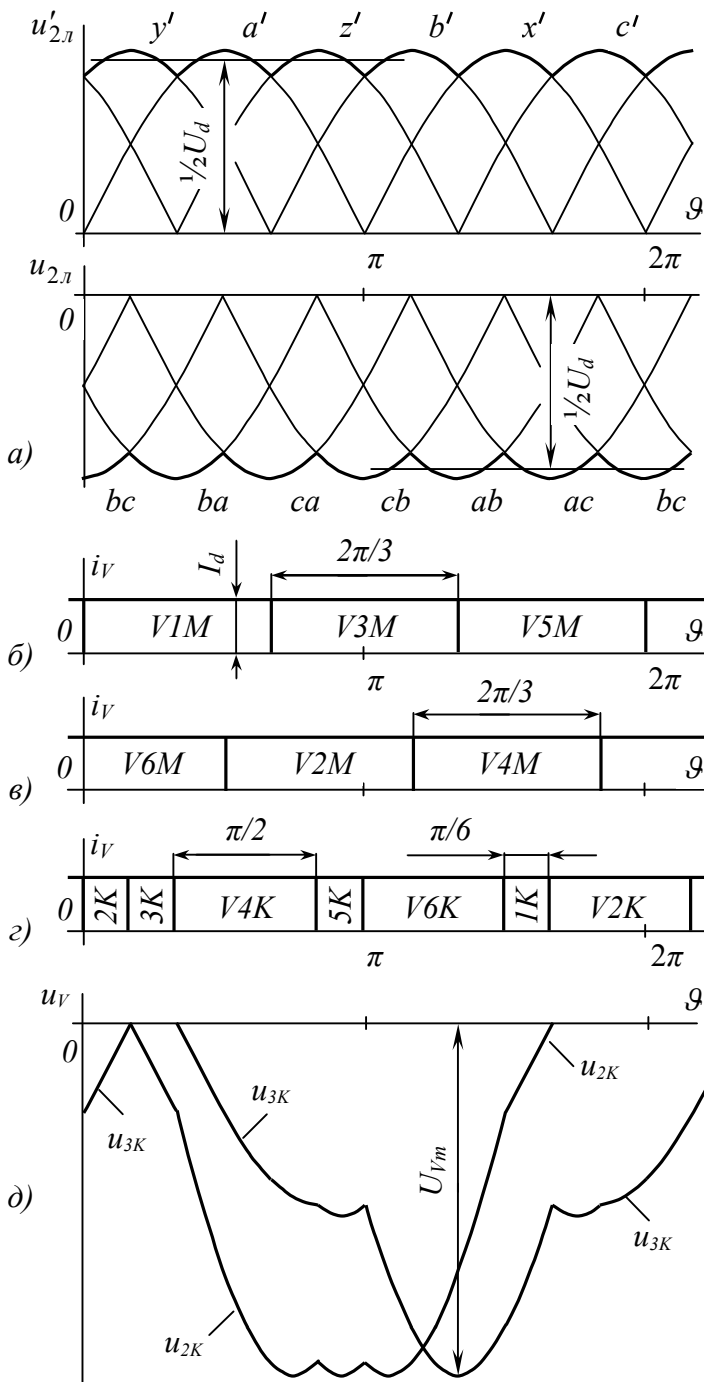


Рис. 2. Временные диаграммы работы схемы.

$$I_{Vcp} = I_d/12 \approx 0,083 I_d \text{ и } I_V = I_d/2\sqrt{3} \approx 0,289 I_d,$$

а для вентилях с четными номерами

$$I_{Vcp} = I_d/4 = 0,25 I_d \text{ и } I_V = I_d/24 = 0,5 I_d.$$

Нетрудно заметить, что эти значения ниже, чем для вентилях катодной и анодной групп. Это является дополнительным преимуществом схемы, поскольку вентили кольцевого коммутатора выбираются на меньший ток.

Описанный выше принцип работы схемы может быть проиллюстрирован также и с помощью векторной диаграммы, приведенной на рис. 3. Кривая выпрямленного напряжения на нагрузке формируется симметричной двенадцатифазной системой напряжений, которая получается в результате сложения линейных напряжений обмотки, соединенной в звезду с соответствующими линейными напряжениями обмотки, соединенной в треугольник.

схеме (рис.2б,в). Угол проводимости для них составляет $\lambda = 2\pi/3$, а средние и действующие значения токов равны соответственно:

$$I_{Vcp} = I_d/3 \text{ и } I_V = I_d/\sqrt{3} \approx 0,577 I_d.$$

Вентили кольцевого коммутатора работают последовательно, по порядку номеров, коммутируя выпрямляемые ЭДС секций (рис. 2г). Например, на интервале от $\pi/6$ до $\pi/2$ выпрямляются линейные ЭДС u'_y и u_{ba} . При этом ток протекает от зажима a' треугольника через вентиль $V1M$, на нагрузку, вентиль $V6M$, фазы b и a звезды и возвращается к зажиму b' треугольника. Очевидно, что на данном интервале должен работать вентиль $V3K$. В момент $\pi/2$ происходит коммутация тока с ЭДС u'_y на ЭДС u'_a . Теперь ток возвращается к зажиму c' треугольника, поэтому происходит коммутация тока с $V3K$ на $V4K$. Рассматривая два последующих интервала, легко заметить, что на этих интервалах ток по-прежнему протекает от фазы a звезды к зажиму c' треугольника, следовательно, коммутаций вентилях в кольцевой секции не происходит и вентиль $V4K$ работает в течение трех межкоммутационных интервалов подряд.

Таким образом, углы проводимости вентилях кольцевого коммутатора неодинаковы. Для вентилях с нечетными номерами угол проводимости равен $\lambda = \pi/6$, а для вентилях с четными номерами $\lambda = 2\pi/3$. Соответственно, различаются средние и действующие значения токов вентилях. Для вентилях с нечетными номерами они равны:

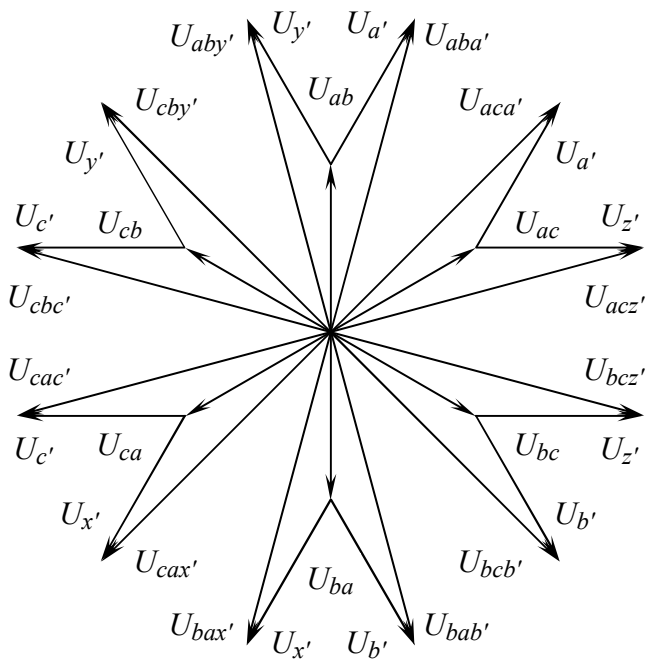


Рис. 3. Векторные диаграммы напряжений схемы.

Обратные напряжения на вентилях катодной и анодной групп имеют ту же форму, что и в трехфазной мостовой схеме [1,2], а их максимальное значение равно амплитуде линейного напряжения обмоток:

$$U_{vm} = \sqrt{2}U_{2n} = \frac{\pi}{6}U_d \approx 0,524U_d.$$

Обратные напряжения на вентилях кольцевой группы существенно выше, поскольку на отдельных участках они определяются суммой линейных напряжений обеих вторичных обмоток. Мгновенные значения напряжений на вентилях *V2K* и *V3K* для разных интервалов проводимости приведены в таблице:

Проводит	<i>V1K</i>	<i>V2K</i>	<i>V3K</i>	<i>V4K</i>	<i>V5K</i>	<i>V6K</i>
u_{2K}	u'_y	0	u_{ca}	$u_{ca} + u'_c$	$u_{cb} + u'_c$	$u_{cb} + u'_y$
u_{3K}	$u_{ac} + u'_y$	u_{ac}	0	u'_c	$u_{ab} + u'_c$	$u_{ab} + u'_y$

Кривые обратных напряжений на этих вентилях приведены на рис. 2д. Максимальное обратное напряжение на вентиле кольцевой группы равно:

$$U_{vm} = 2\sqrt{2}U_{2n} \cos \frac{\pi}{12} \approx 2,732U_{2n} \approx 1,012U_d.$$

Расчет трансформатора производится как и для традиционной двенадцатифазной последовательной схемы. Действующие значения фазных токов для обмотки соединенной в звезду $I_2 = 0,817I_d$, а для обмотки, соединенной в треугольник $I_2 = 0,471I_d$. Расчетные мощности этих обмоток одинаковы: $S_2 = S'_2 = 0,524P_d$. Суммарная мощность вторичных обмоток равна $S_{2\Sigma} = 1,05P_d$.

Действующее значение тока первичной обмотки равно:

$$I_1 = 1,577 \frac{I_d}{k_T},$$

где k_T — коэффициент трансформации, определенный для вторичной обмотки трансформатора, соединенной в звезду. (для вторичной обмотки трансформатора, соединенной в треугольник, коэффициент трансформации равен $k'_T = k_T / \sqrt{3}$). Расчетная мощность первичной обмотки равна $S_1 = 1,012P_d$ и типовая мощность трансформатора, определяемая как среднее арифметическое расчетных мощностей его обмоток, равна $S_T = 1,03P_d$.

Так, например, вектор $U_{aby'}$ образуется в результате сложения линейного напряжения звезды U_{ab} с фазным напряжением $U_{y'}$ треугольника, а вектор $U_{aba'}$ — в результате сложения этого же линейного напряжения с фазным напряжением $U_{a'}$ треугольника. Под действием напряжения, обусловленного вектором $U_{y'}$, ток нагрузки будет протекать по цепи: фазы *a* звезды вентиль *V3K*, фаза *y'* треугольника (зажимы *b'* — *a'*), вентиль *V1M*, нагрузка, вентиль *V6M*, фазы *b* звезды.

Аналогично можно проследить за порядком работы остальных фаз обмоток, соединенных в звезду и треугольник, и связанных с ними вентилях. В любой момент времени ток протекает через три последовательно соединенных вентиля, что обеспечивает повышенный КПД по сравнению с традиционной схемой.

Коммутация вентиля в схеме происходит точно так же, как и в трехфазной мостовой схеме. Коммутирующим напряжением является линейное напряжение соответствующей обмотки. За период частоты питающей сети в каждой вторичной обмотке происходит шесть коммутаций. При этом в трех коммутациях участвуют вентили катодной (или анодной для обмотки, соединенной в звезду) группы и в трех коммутациях — вентили кольцевой группы. Коммутационные потери напряжения на каждом интервале коммутации будут такими же, как и трехфазной мостовой схеме. Таким образом, среднее значение коммутационных потерь напряжения будет вдвое больше, чем в трехфазной мостовой схеме, но и среднее значение выпрямленного напряжения в рассматриваемой схеме вдвое выше. Следовательно, уравнение внешней характеристики выпрямителя будет иметь тот же вид, что и в трехфазной мостовой схеме:

$$U_d = U_{d0} - \frac{3}{\pi} X_a I_d,$$

где X_a — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки трансформатора.

Таким образом, рассмотренная схема, сохраняя все достоинства традиционной схемы (низкий коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения, хороший гармонический состав тока, потребляемого из сети и низкую типовую мощность трансформатора), имеет и существенные преимущества: более низкое прямое падение напряжения на вентилях и меньшие значения рабочих токов для шести вентилях из двенадцати. Следует также отметить, что данная схема не требует использования каких-либо дополнительных элементов, усложняющих и удорожающих конструкцию выпрямителя.

Литература

1. Попков О. З. Основы преобразовательной техники : учеб. пособие для вузов / О. З. Попков. — М. : Изд-во МЭИ, 2005. — 200 с. : ил.
2. Полупроводниковые выпрямители / Е. И. Беркович, В. Н. Ковалев, Ф. И. Ковалев и др.; ред.: Ф. И. Ковалев, П. П. Мосткова. — 2-е изд., перераб. - М. : Энергия, 1978. — 447 с. : ил.
3. Преобразователь переменного напряжения в постоянное : а. с. 995231 СССР : МПК⁵ Н 02 М 7/06 / О. Н. Дегтярев (СССР). — № 2920432 ; заявл. 07.05.80 ; опубл. 07.02.83, Бюл. № 5. — 3 с. : ил.