

Построение гибридной схемы 9-пульсного выпрямителя методом схмотехнического перемещения элементов

АСЛАН-ЗАДЕ А.Г.

Показана последовательность построения гибридной схемы 9-пульсного выпрямителя методом схмотехнического перемещения элементов с использованием нового базового элемента — двойного последовательного зигзага, позволяющего устранить все виды намагничивания трехфазного преобразовательного трансформатора. Данный метод по широте охвата, простоте и наглядности имеет преимущества по сравнению с известным методом Штейнера и может быть применен для всех 3N-пульсных разомкнутых схем выпрямителей. Иллюстративно представлен калейдоскопический характер преобразования схем 9-пульсных выпрямителей, показывающий, что возможность применения метода схмотехнического перемещения элементов диагностирует объект исследования как результат элементарных инженерных преобразований. Задача статьи — оценка результата альтернативного метода построения и усовершенствования гибридной схемы 9-пульсного выпрямителя с учетом влияния на него неравенства углов коммутации вентилялей.

Ключевые слова: 9-пульсный выпрямитель, гибридная схема, метод построения, перемещение элементов, оценка результатов

Незавершенность попыток решения задачи построения 9-пульсных выпрямителей на основе применения различных методов, информативное описание которых приведено в [1], — причина обращения к методу Штейнера [2]. В этой связи трудно переоценить эффективность использования для решения этой задачи более простого метода схмотехнического перемещения элементов [3–5] с привлечением в качестве нового базового элемента двойного последовательного зигзага [6].

В основе двойного последовательного зигзага — последовательное соединение на трехфазном трансформаторе трех групп вторичных обмоток. Первая соединена в звезду и подключена на зигзаг каждым свободным выводом к одноименному выводу смежной по фазе обмотки второй группы. Фазная обмотка второй группы подключена аналогично к разноименному выводу фазной обмотки третьей группы, смежной по фазе относительно последовательно соединенных с ней фазных обмоток первой и второй групп. При этом сумма чисел витков обмоток второй и третьей групп равна числу витков обмоток первой группы. При однополупериодном нечетнопульсном, кратном трем, выпрямлении в таком трансформаторе отсутствуют все виды намагничивания, так как независимо от соотношения чисел витков второй и третьей групп обмоток среднее значение магнитного потока в каждом его стержне и сумма первичных фазных токов равны нулю.

Свойством зигзага является возможность устранения намагничивания без изменения исходной фазы выпрямляемого напряжения. В случае многопульсного выпрямления каждое выпрямляемое на-

пряжение (не совпадающее по фазе ни с гипотенузой равнобедренного треугольника линейного и фазных напряжений, ни с его катетом) может быть представлено некой суммой линейного (гипотенузой) и фазного (продолжением катета равнобедренного треугольника) напряжений. Второе из них, в отличие от первого, является источником намагничивания, для устранения которого оно может быть составлено путем замены фазной обмотки разработанным зигзагом.

Данное свойство было положено в основу преобразований схемы 9-пульсного выпрямителя-аналога (стр. 330, [7]) методом схмотехнического перемещения элементов [3–5]. Эти преобразования [6] привели к построению 9-пульсного двухполупериодного управляемого выпрямителя (рис. 1) с коэффициентом превышения расчетной мощности трансформатора $k_T = 1,2012$ вместо $k_T = 1,27$ и пятью группами вторичных обмоток вместо шести в гибридной диодной схеме 9-пульсного выпрямителя. Подробное описание гибридной схемы, три обмотки которой работают в двухполупериодном режиме, две — в однополупериодном, одна — в смешанном, дано в [4], а ее построение методом Штейнера, предусматривающее обращение к теории графов, — в [2].

Хронологически гибридная схема была построена раньше двухполупериодной. Однако выбор в качестве исходной двухполупериодной схемы как содержащей наименьшее количество обмоток при отсутствии всех видов намагничивания трансформатора наиболее удобен для ее преобразования до гибридной схемы методом схмотехнического перемещения элементов. Удобство выбора заключа-

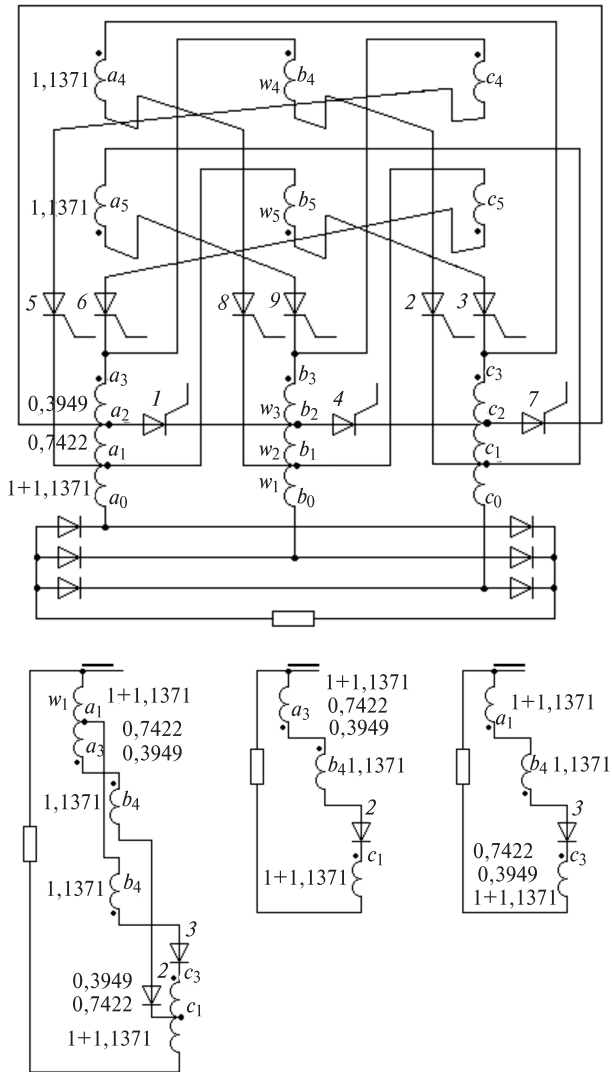


Рис. 1. Принципиальная схема 9-пульсного управляемого выпрямителя и одна из трех ее составных частей без выводов a_2 , b_2 , c_2 и вентиляей 1, 4, 7 с двумя вычлененными из нее фрагментами

ется в минимальном объеме преобразований, попутно показывающих возможность исключения из двухполупериодной схемы 6-вентильного моста с заменой управляемых вентиляей на диоды. Кроме того, метод схемотехнического перемещения элементов может выявить, действительно ли достигнутый в [4] предел усовершенствования схемы 9-пульсного выпрямителя является конечным.

Двухполупериодная схема на трехфазном трансформаторе с вторичными фазными обмотками w_1-w_6 , приведенные числа витков (далее везде – числа витков) которых указаны рядом с этими обмотками, и с очередностью включения управляемых вентиляей, соответствующей их нумерации, может быть рассмотрена подобно известному из курса ТОЭ методу наложения. Для этого вычленим из нее одну из трех составных частей без выводов a_2 , b_2 , c_2 и вентиляей 1, 4, 7. Затем вычленим из этой составной части два фрагмента, в одном из которых

включен вентиль 2, а в другом – вентиль 3, с заменой тиристоров на диоды для упрощения визуализации (рис. 1). Для удобства рядом с некоторыми обмотками результирующие значения чисел витков показаны в виде нескольких суммируемых.

Далее (рис. 2), попутно унифицировав обозначения, перегруппируем фазные обмотки при постоянстве их суммарного числа витков в каждой фазе для достижения единообразия при дальнейшем объединении каждой пары вычлененных фрагментов в одно из трех содержащих звезду трехфазных соединений. Каждое из трехфазных соединений содержит пару одноименных и идентичных фазных обмоток, замыкающих одинаковые токи через разные вентиля, например 2 и 3, т.е. обмотки, имеющие дублирующие функции, которые могут быть объединены путем совмещения при перемещении одного из этих вентиляей относительно другого. Результат этого объединения показан на рис. 2, внизу.

Получим три трехфазных соединения, состоящих из трех соединенных в звезду трехфазных обмоток и трех пар идентичных в каждой паре разноименных и встречно последовательно соединенных фазных обмоток (рис. 2, внизу). Фазные обмотки в каждой паре можно сократить вдвое путем совме-

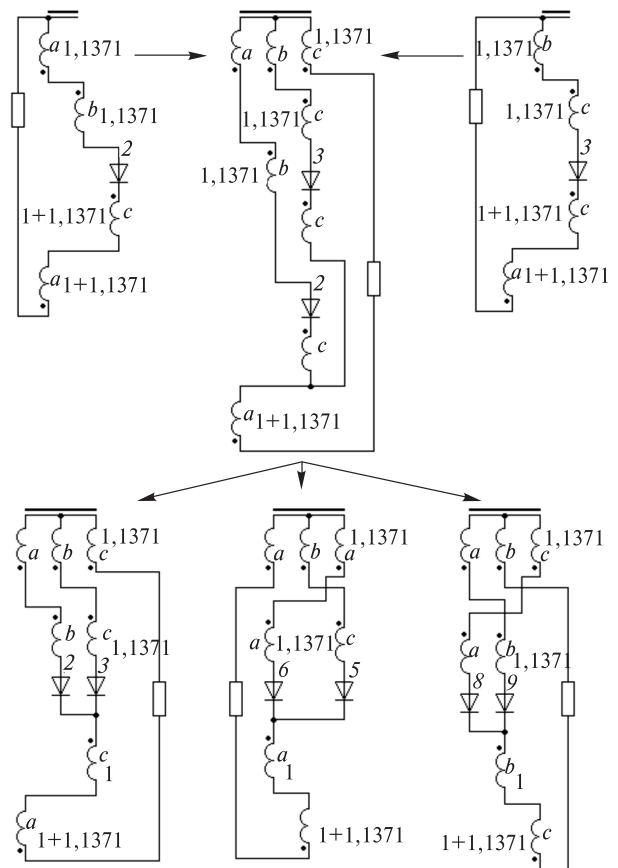


Рис. 2. Взаимное перемещение в вычислительных фрагментах частей фазных обмоток и совмещение их дублирующих функций

шения их функций и тем самым построить два одинарных разнонаправленных зигзага, соединенных друг с другом через общую нагрузку и вентили с упраздненной нумерацией (рис. 3, слева сверху). Можно заметить, что число витков фазных обмоток ветви правого зигзага, равное $1+1,1371$, включает число витков фазных обмоток ветви левого зигзага, равное $1,1371$, в котором и можно совместить витки с числом $1,1371$ путем перемещения крайних выводов правого зигзага относительно

внешних ветвей левого зигзага (рис. 3, справа сверху). Здесь согласно принятому правилу чередование фаз происходит против направления вращения часовой стрелки. Для построения гибридной схемы остается подключить к полученной схеме дополняющую часть в виде третьего одинарного зигзага (рис. 3, внизу). Число витков неравных ветвей этого зигзага в сумме с числом витков фазных обмоток звезды равно числу витков вышеупомянутой ранее неучтенной части двухполупериодной схемы, включающей выводы a_2, b_2, c_2 и вентили $1, 4, 7$. Для большей точности на рисунке в скобках указаны числа витков тех же обмоток в случае принятия за единицу наибольшего числа витков ветви третьего зигзага, равного $1,7422$.

Гибридная схема на рис. 3 в отличие от ее изображения на рис. 5 в [2] обладает большей наглядностью благодаря тому, что изображение фактического размещения обмоток на стержне заменено мнимым, при котором направление тока обмотки на схеме не зависит от направления ее намотки. Это проще позволяет увидеть, что пары ветвей двух из трех одинарных зигзагов с числами витков, соответственно, $0,605$ и 1 или $1,7422$ и 1 можно совместить друг с другом. Общий ток нагрузки в разных интервалах дискретности замыкается всегда от концов к началам одной пары ветвей этих разных зигзагов и от начал к концам другой пары ветвей. В первом примере можно совместить ветви с числами витков $0,605$ и 1 (рис. 4) с изменением числа витков одной ветви от 1 до $0,395$, а во втором – $1,7422$ и 1 с изменением числа витков одной ветви от $1,7422$ до $0,7422$ (рис. 5). Наряду с некоторым уменьшением k_T от $1,27$ до $1,2405$ в первом варианте и до $1,221$ во втором упрощается конструктивное исполнение трансформатора за счет соединения ветвей одного из зигзагов через вентили на зигзаг.

Сопоставительные расчеты проводились с учетом того, что при активной нагрузке константа C_m , принимающая значение $0,99996$ при периодичности $m=9$ [8] (C_m с достаточно высокой степенью точности может быть принято равным единице при $m \geq 4$), является множителем выражения для действующего значения каждой пульсации тока $I_{\text{пд}}$ относительно выпрямленного тока I_d :

$$I_{\text{пд}} = \left(C_m = \frac{\sqrt{\pi(2\pi + m \sin \frac{2\pi}{m})}}{2m \sin \frac{\pi}{m}} \approx 1 \right) I_d \frac{1}{\sqrt{m}}$$

Однако расчет k_T не корректен для понижающего коэффициента трансформации и без учета неравенства углов коммутации. Первый из этих факторов в связи с противоречием между необходимо-

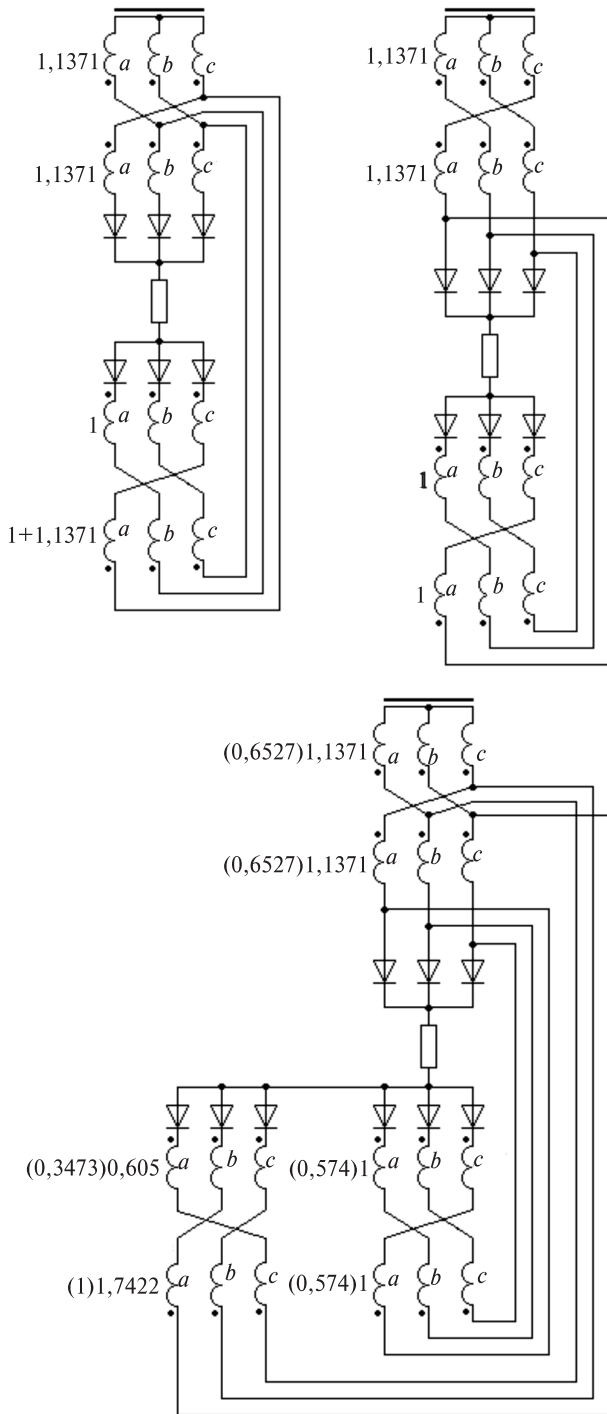


Рис. 3. Совмещение дублирующих свойств фазных обмоток в 3-фазном варианте схемы и подключение ее дополняющей части

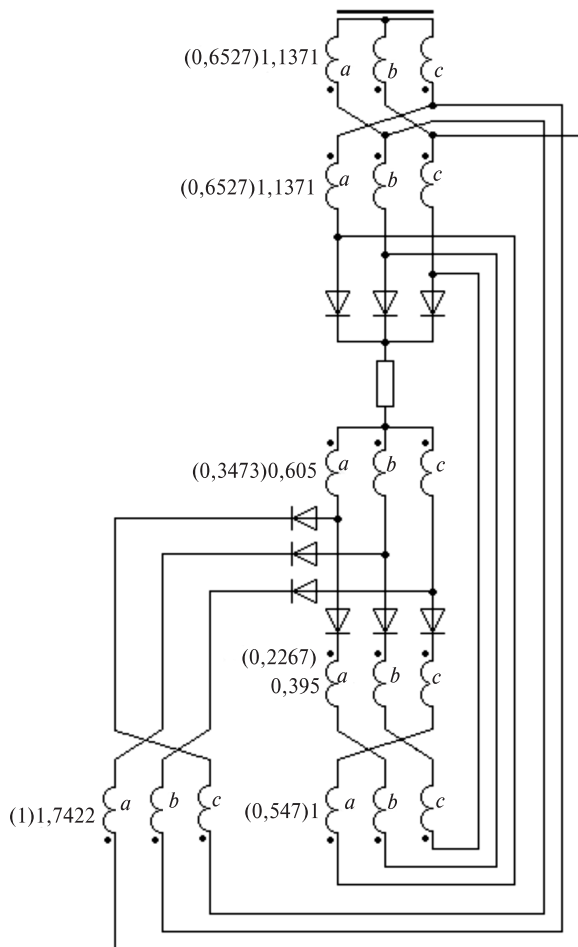


Рис. 4. Совмещение части витков пары обмоток с дублирующими свойствами

стью размещения на каждом стержне трансформатора обмоток с целым числом витков при их дробном соотношении, с одной стороны, и точном выполнении расчетных соотношений, с другой, приводит к увеличению суммарного числа витков вторичных обмоток. Для компенсации увеличения вторичных напряжений приходится увеличивать число витков первичной обмотки. Обойти проблему непомерного роста мощности таких трансформаторов можно только за счет их применения при существенно более высоких значениях вторичных напряжений.

Причина второго фактора заключается в неравенстве реактансов вентильных цепей, которое зависит от разности чисел витков обмоток и определяется схемой выпрямителя. Увеличение этой разности приводит к увеличению неравенства амплитуд пульсаций выпрямленного напряжения, т.е. к искажению его формы вплоть до полной утраты заданной периодичности, даже при нивелировании за счет управления вентилями, к тому же снижающем коэффициент мощности от значения 0,9798.

Например, в 9-фазных выпрямителях, рассмотренных в [4], на рис. 5 разность чисел витков об-

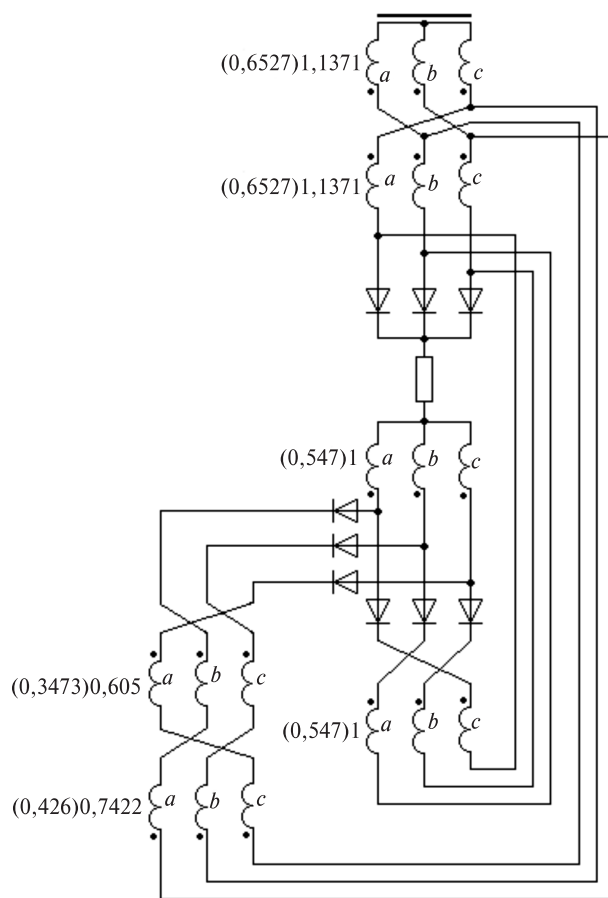


Рис. 5. Совмещение части витков другой пары обмоток с дублирующими свойствами

моток в разных группах вентильных цепей Δw почти равна вычитаемому и составляет 47% уменьшаемого. Возможность уменьшения Δw за счет включения в вентильную цепь с меньшим реактансом дополнительных встречно последовательно соединенных обмоток с равными числами витков имеет еще большие ограничения при понижающем коэффициенте трансформации в связи с необходимостью четного суммарного числа их витков. Кроме того, выделяемая в цепях дополнительных обмоток мощность повышает k_T до значения k_{TX} . Так, в схеме на рис. 3 возможно подключение пары дополнительных обмоток в цепь каждого вентиля, подключенного к фазной обмотке с числом витков 0,605 или одной пары тех же обмоток в общую цепь этих вентилях. Соответственно, $k_{TX} = 1,3275$ или $k_{TX} = 1,3$ при равных реактансах. Схемы на рис. 4 и 5 лишены такой возможности. В схемах на рис. 3–5 Δw составляет 12% уменьшаемого, причем в схеме на рис. 4 коэффициент $k_{TX} = 1,2977$, а в схеме на рис. 5 он равен 1,2782, т.е. показатели схем соизмеримы.

Сопоставление приведенных схем с 9-вентильными однополупериодными схемами другого типа

построения показывает, что при использовании разомкнутых треугольников [10] для устранения всех видов намагничивания значение Δw возрастает от 12 до 26 % уменьшаемого, а $k_T = 1,665$. При выравнивании реактансов с включением одной пары дополнительных обмоток в общую цепь вентиляей $k_{TX} = 1,8167$.

Построение 9-вентильной однополупериодной схемы выпрямителя с использованием уравнивающих реакторов (УР) на вторичной стороне трансформатора уменьшает число его вторичных обмоток до четырех, значение Δw между вентильными цепями с УР и без него уменьшается до 4% уменьшаемого, а $k_T = 1,2464$. Но при выравнивании реактансов с включением трех пар дополнительных обмоток в цепи вентиляей, соединяющих отводы вторичных обмоток, значение $k_{TX} = 1,2698$; в диодном режиме работы $k_{T,ур} = 0,0877$. Эта схема может быть построена в два этапа.

На первом этапе, подобно перестроению схемы рис. 1 в схему рис. 2 в [9], выводы первичной и вторичной обмоток трансформатора исходной 15-вентильной 9-пульсной двухполупериодной схемы выпрямителя взаимнообратно переключаются между фазными входными выводами и входными выводами выпрямительного моста. На втором этапе по аналогии с перестроением схемы на девяти вентилях с четной или нечетной нумерацией в однополупериодную, но с симметрией второго вида (при симметрии первого вида на девяти вентилях имеет место постоянный поток намагничивания), выпрямительный мост исключается. При этом вторичная обмотка расщепляется на «две звезды» с выходными выводами между их нейтральными и подключением вентиляей, в том числе через УР в их цепи между их крайними выводами, в направлении от одной и той же звезды к другой и с тем же соотношением чисел витков обмоток. В схеме с первичной обмоткой, разделенной отводами на две неравные части, т.е. с двумя первичными обмотками, значение Δw между вентильными цепями с УР и без него равно 17,4%, $k_T = 1,0854$, $k_{T,ур} = 0,0877$. Реактанс цепи с УР на отводах первичной стороны меньше, поэтому выравнивание реактансов возможно за счет увеличения числа витков обмоток УР. Тогда $k_{T,ур} = 0,1021$ при $k_{TX} = k_T = \text{const}$, а $k_{TX} + k_{T,ур} = 1,0854 + 0,1021 = 1,1875$. Это единственная причина увеличения числа витков обмоток УР независимо от угла отпираания тиристоров, так как он защищен реактансом первичной обмотки трансформатора.

Распространим сопоставление на схему на девяти вентилях с четной или нечетной нумерацией с ее перестроением в однополупериодную схему, подобную рис. 2 в [10], но с симметрией второго

вида. Тогда для двухполупериодной схемы, несмотря на замену двойного последовательного зигзага треугольником первичной обмотки трансформатора, получим $\Delta w = 3,2\%$, $k_T = 1,1565$, $k_{TX} = 1,1699$. Однако для реализации этих показателей нужно 15 вентиляей, 9 из которых должны быть управляемыми, хотя эти 9 вентиляей могут работать и в управляемом «диодном режиме» путем формирования импульса управления тиристора от напряжения, прикладываемого к его управляющему электроду через гасящую R-цепь [6]. Что касается упомянутой однополупериодной схемы в [10] с симметрией второго вида, то ее $k_{TX} = 1,4216$.

Как видно из этих сопоставлений, построение 9-пульсных трансформаторных выпрямителей сопровождается фактором неравенства углов коммутации вентиляей, выравнивание которых приводит к увеличению либо коэффициента превышения расчетной мощности трансформаторного оборудования, либо числа вентиляей. Среди 9-пульсных однополупериодных трансформаторных выпрямителей на девяти вентилях наилучшими показателями обладает сложная гибридная схема на рис. 5.

Как видно из последовательности построения схем, представленных в [4–6] и в данной статье, их перестроение носит калейдоскопический характер, определяемый последовательным взаимным перемещением трансформирующих и вентильных элементов. Это является ограничением их кажущегося многообразия, потому что оно не может выйти за пределы границ, обусловленных применяемым методом. Например, широко известное размещение вентильных обмоток с пространственным сдвигом $2\pi/m$ рад на вторичной стороне трансформатора с вращающимся магнитным полем позволяет решить проблему неравенства углов коммутации без необходимости обращения к другим методам.

Другое ограничение – необходимость в исходной схеме для ее преобразования. Но при отсутствии такой схемы возможное решение заключается в построении многофазной топографической векторной диаграммы напряжений на основе симметрии первого или второго вида [10]. Применительно к рассматриваемым схемам гибридных 9-пульсных выпрямителей это означает, что из упомянутой 18-векторной диаграммы с симметрией второго вида со сквозной нумерацией результирующих векторов можно выбрать векторы с четной или нечетной нумерацией и заменить их фазную часть (продолжение катета равнобедренного треугольника) векторами двойного последовательного зигзага. Проведя идентификацию этих векторов с напряжениями фазных обмоток трансформатора, можно построить согласно методу частичных напряжений [10] исходную схему выпрямителя и приступить к

ее усовершенствованию путем взаимного перемещения трансформирующих и вентильных элементов, как это показано в [4–6] и на рис. 1–5.

Вопрос о целесообразности применения метода схмотехнического перемещения элементов для построения новых схем многопульсных выпрямителей, как правило, упирается в проблему неравенства углов коммутации вентилях. Но этот метод может найти применение и в качестве достоверного инструмента анализа, подобно компьютерному моделированию, так как он обладает возможностью выявления схемных решений, полученных в результате элементарных инженерных преобразований. Критерием такого выявления служит фактор применимости метода к исследуемому техническому решению.

Выводы. 1. Построение методом схмотехнического перемещения элементов с привлечением двойного последовательного зигзага промежуточного варианта гибридной схемы 9-пульсного выпрямителя с возможностью ее дальнейшего усовершенствования — эффективная альтернатива построению методом Штейнера.

2. Калейдоскопический характер построений схем методом схмотехнического перемещения элементов свидетельствует о том, что они есть результат элементарных инженерных преобразований и что достоверность любой из них — признак достоверности любой другой, связанной с ней неразрывной последовательностью преобразований.

3. Неравенство углов коммутации вентильных цепей трансформаторных схем выпрямителей — тотальный фактор негативного сопровождения результата их построения.

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 10, pp. 39–45.

Constructing the Hybrid Circuit of a 9-pulse Rectifier Using the Circuit Engineering-based Component Shifting Method

ASLAN-ZADE Arif Gasan ogly (Kislovodsk, Russia). Pensioner

The article shows the sequence for constructing the hybrid circuit of a 9-pulse rectifier by applying the circuit engineering-based component shifting method using a new basic element in the form of a double series-connected zigzag, a component that makes it possible to remove all magnetization kinds of a three-phase converter transformer. The circuit construction approach on the basis of this method has advantages as compared with the well-known Steiner method in terms of coverage width, simplicity, and clarity, and can be used for all 3T-pulse open-loop rectifier arrangements. A kaleidoscopic nature of transforming the circuit arrangements of 9-pulse rectifiers is presented in the form of illustration, which shows that the possibility of applying the circuit engineering component shifting method diagnoses the studied subject as a result of elementary engineering transformations. The aim of the article is to evaluate the result from applying an alternative method for constructing and perfecting the hybrid circuit of a 9-pulse rectifier taking into account the effect the inequality of commutation overlap angles of different switches has on it.

Key words: 9-pulse rectifier, hybrid circuit, construction method, shifting of components, assessment of results

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волкова О.Л. Выпрямители с кольцевыми и лестничными вентильными схемами для систем электроснабжения электрического транспорта, 2011: <http://goo.gl/aXf7LU>
2. Евдокимов С.А., Щуров Н.И., Волкова О.Л., Степанов А.А. Повышение энергоэффективности трехфазных преобразователей напряжения с помощью метода Штейнера. — Электротехника, 2011, № 6, с. 3–9.
3. Аслан-заде А.Г. Преобразование схем многофазных выпрямителей путем взаимного перемещения смежных вентильных и трансформаторных элементов. Инновационная энергетика 2010. — Материалы II Научно-практической конф. с международным участием. — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2010, с. 194–197.
4. Аслан-заде А.Г., Евдокимов С.А., Волкова О.Л. 3N-фазные разомкнутые схемы выпрямления и их производные. — Новосибирск: Научный вестник НГТУ, 2011, № 3, с. 159–172.
5. Аслан-заде А.Г. Метод схмотехнического перемещения элементов и схемы выпрямителей, построенные в результате элементарных инженерных преобразований. — Материалы X Научно-практической конф. «Динамика современной науки». — София, 2014, т. 11, с. 29, 30: <http://goo.gl/uaLzNt>
6. Патент РФ № 2569929. Преобразователь трехфазного переменного напряжения в постоянное/А.Г. Аслан-заде. — БИ, 2015, № 34.
7. Шляпошников Б.М. Игнитронные выпрямители для тяговых подстанций железных дорог. — М.: Трансжелдориздат, 1947, 736 с.
8. Аслан-заде А.Г. Улучшение гармонического состава токов и напряжений тиристорного выпрямителя посредством использования токов нулевой последовательности при управлении. — Электричество, 2013, № 11, с. 19–25.
9. А.С. № 1220086 (SU). Преобразователь переменного напряжения/А.Г. Аслан-заде. — БИ, № 12.
10. Абдулаев А.А., Аслан-заде А.Г. Анализ многопульсного выпрямления. — Электричество, 1977, № 8, с. 57–63.

[13.05.2016]

Автор: Аслан-заде Ариф Гасан оглы окончил в 1968 г. энергетический факультет Азербайджанского института нефти и химии им. М. Азизбекова. Пенсионер.