DOI: 10.15862/129TVN414 (<https://doi.org/10.15862/129TVN414>)

УДК 621.314.6

Коптяев Евгений Николаевич

ОАО «Северное Производственное Объединение «Арктика»

Россия, Северодвинск¹

Инженер по наладке и испытаниям 1 категории

Аспирант, старший преподаватель

E-Mail: evgenijkoptyaev@gmail.com

Душкин Юрий Владимирович

ОАО «Северное Производственное Объединение «Арктика»

Россия, Северодвинск

E-Mail: yuri.dushkin@yandex.ru

Атрашкевич Павел Васильевич

ОАО «Северное Производственное Объединение «Арктика»

Россия, Северодвинск

E-Mail: bimfin@mail.ru

Полупроводниковый выпрямитель с боковыми пульсациями

Аннотация. Описанный в статье выпрямитель с двенадцатью пульсациями выходного напряжения предназначен для питания промышленной нагрузки и линий электропередач постоянного тока, и обеспечивает экономию материалов и снижение себестоимости установки. Предложена схема управляемого выпрямителя с боковыми пульсациями, которая дает выигрыш до 30% по массе и габаритам по сравнению с классическими схемами с двумя вторичными обмотками звезда-треугольник и обеспечивает лучшую электромагнитную совместимость с питающей сетью. Суть способа в том, что сумма отрезков двух синусоидальных функций дает в результате отрезок также синусоидальной функции с амплитудой и фазой, определяемыми амплитудами и фазами слагаемых. В случае использования управляемых полупроводниковых вентилях в схеме трехфазного моста, появляется возможность получить дополнительный фазовый сдвиг – за счет алгоритма управления, что и является предметом данной статьи. Суммарное напряжение двух последовательно соединенных трехфазных мостов (второй – управляемый, с “боковыми пульсациями”), подключенных к двум вторичным обмоткам питающего трехфазного трансформатора, с соотношением числа витков в пропорции 2,8:1 соответственно, и одинаковом способе включения обеих вторичных обмоток «звездой», имеет 12 пульсаций.

Ключевые слова: статический выпрямитель; трехфазный; трансформатор; 12-пульсный; обмотка с соединением звездой; обмотка с соединением в треугольник; улучшенные массогабариты; улучшенная электромагнитная совместимость.

Идентификационный номер статьи в журнале 129TVN414

¹ ул. Трухинова, 11, кв. 106, г. Северодвинск, 164522

В настоящее время генерирование и распределение электроэнергии в основном осуществляется на переменном токе. Тем не менее, часть потребителей требует питания постоянным током, основным источником которого в промышленности служат статические управляемые выпрямители (УВ) – полупроводниковые устройства, предназначенные для преобразования рода тока и стабилизации его значения. По некоторым данным вклад таких потребителей в общую потребляемую мощность составляет до 25% [1, с. 6].

Один из важнейших параметров, определяющих качество преобразователя – это коэффициент пульсаций. Требования к нему зависят от типа питаемой нагрузки. До начала проектирования УВ необходимо иметь данные о влиянии пульсаций выпрямленного тока на работу потребителей. В общем случае, пользуются требованиями ГОСТ к качеству электроэнергии сетей постоянного тока.

Проанализировав различные схемы выпрямления, составим таблицу зависимости коэффициента пульсаций от числа фаз выпрямления. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициент пульсации различных схем выпрямления

m	1	2	3	4	5	6
k_n	1,57	0,667	0,253	0,057	0,014	0,003

Здесь m – это число фаз выпрямления, равное кратности пульсаций выпрямленного тока. Наиболее распространена в преобразователях схема выпрямления с $m=6$, соответствующая 12 пульсациям выпрямленного напряжения. При этом параллельному соединению выпрямительных мостов присущ ряд недостатков, в том числе – наличие уравнивающего реактора, и возможность уравнивающих токов между мостами [5,6].

Известна схема Скотта, изначально созданная для модернизации двухфазной системы токов в трехфазную систему [8], выполненная на двух однофазных трансформаторах. В дальнейшем появилась схема трансформаторного преобразователя числа фаз, выполненного на основе схемы Скотта. Уже в наше время, попытки улучшить качество выпрямления, привели к многочисленным вариациям схемы Скотта [2,3,4,7]. Работа подобных схем основана на комбинированном включении вторичных обмоток питающих трансформаторов, суммирование э.д.с. которых дает дополнительное увеличение фазности выпрямителя.

Поиск новых схемотехнических решений в области УВ продолжается до сих пор, можно выделить ряд публикаций [2,3,4], подтвержденных патентами РФ. В качестве основы этих вариаций выступают различные варианты включения обмоток трехфазных питающих трансформаторов, чем достигается дополнительный фазовый сдвиг выходного напряжения обмоток, и как следствие – увеличение числа пульсаций выпрямленного напряжения, что улучшает его качество. Особенно стоит отметить вариативность включения обмоток в [2], и разное число витков секций вторичной обмотки. В [3] предложен более простой способ увеличения числа пульсаций выходного напряжения – при этом автором использована неправильная терминология: 24-фазность выпрямителя предполагает 48 пульсаций за период питающей сети, а их только 24 что соответствует 12-фазной схеме выпрямления. Дальнейшее развитие идеи в публикации [4], где использованы две вторичные обмотки, соединенные звездой и уравнивающий реактор, соединенный в треугольник.

Предельно простое решение применено в патенте РФ на изобретение №2367082, представляющее собой выпрямитель, содержащий трехфазный трансформатор, первичные и вторичные обмотки которого соединены по схеме звезды, причем вторичные обмотки выполнены секционированными с последовательным соединением секций и трехфазных выпрямительных мостов, к отпайкам первой секции вторичных обмоток присоединен

трехфазный выпрямительный мост на диодах, а к отпайкам других секций вторичных обмоток - трехфазные управляемые выпрямительные мосты, соединенные по выходу последовательно, при этом параллельно выходу каждого выпрямительного поста подключены накопители энергии большой емкости. Недостаток – всего лишь 6 пульсаций выпрямленного напряжения, при повышенной сложности схемотехники и наличии накопительных конденсаторов большой емкости.

В целом, главным недостатком всех подобных вариантов является повышенный расход активных материалов питающего трансформатора – меди и трансформаторной стали. Это неизбежное следствие подобного увеличения фазности схемы выпрямления: любая схема комбинация обмоток разных фаз дает на выходе напряжение с фазой и амплитудой, зависящей от амплитуды и фазы исходных напряжений, и влечет за собой потерю коэффициента использования витков вторичной обмотки. Например, соединение вторичной обмотки треугольником требует в $\sqrt{3}$ раз больше витков, чем у обмотки с включением звездой. Дальнейшие попытки улучшить подобным образом качество выходного напряжения УВ влекут ухудшение массогабаритных показателей, что зачастую неприемлемо при больших мощностях установки.

Выходом может стать новый способ построения УВ, основанный на алгоритме “боковых пульсаций”. Суть способа в том, что сумма отрезков двух синусоидальных функций дает в результате отрезок также синусоидальной функции с амплитудой и фазой, определяемыми амплитудами и фазами слагаемых. В случае использования управляемых полупроводниковых вентилей в схеме трехфазного моста, появляется возможность получить дополнительный фазовый сдвиг – за счет алгоритма управления, что и является предметом данной статьи. Суммарное напряжение двух последовательно соединенных трехфазных мостов (второй – управляемый, с “боковыми пульсациями”), подключенных к двум вторичным обмоткам питающего трехфазного трансформатора, с соотношением числа витков в пропорции 2,8:1 соответственно, и одинаковом способе включения обеих вторичных обмоток «звездой», имеет 12 пульсаций. Таким способом удалось избавиться от необходимости включения одной из вторичных обмоток «треугольником» или «зигзагом». Управляемый мост формирует 6 пульсаций выпрямленного напряжения, состоящих из фрагментов фронтов полуволн, коммутируемых в моменты равенства фронтов модулей полуволн напряжения разных фаз (нарастающий и спадающий фронты при этом чередуются), и сдвинутых относительно пульсаций неуправляемого выпрямительного моста на угол $\pi/6$.

В таблице 1 приведен алгоритм работы выпрямителя.

Таблица 1

Последовательность пульсаций выходного напряжения

№ пульсации	Интервал работы неуправляемого моста	Интервал работы управляемого моста	Фазы
П1	$0 \div \pi/3$	$0 \div \pi/6$	+AB + -CA
П2		$\pi/6 \div \pi/3$	+AB + -BC
П3	$\pi/3 \div 2\pi/3$	$\pi/3 \div 3\pi/6$	-BC + +AB
П4		$3\pi/6 \div 2\pi/3$	-BC + +CA
П5	$2\pi/3 \div \pi$	$2\pi/3 \div 5\pi/6$	+CA + -BC
П6		$5\pi/6 \div \pi$	+CA + -AB
П7	$\pi \div 4\pi/3$	$\pi \div 7\pi/6$	-AB + +CA
П8		$7\pi/6 \div 4\pi/3$	-AB + +BC
П9	$4\pi/3 \div 5\pi/3$	$4\pi/3 \div 3\pi/2$	+BC + -AB
П10		$3\pi/2 \div 5\pi/3$	+BC + -CA
П11	$5\pi/3 \div 2\pi$	$5\pi/3 \div 11\pi/6$	-CA + +BC
П12		$11\pi/6 \div 2\pi$	-CA + +AB

Рис. 1. Диаграмма работы управляемого выпрямителя с «боковыми пульсациями»

Описанный выпрямитель с двенадцатью пульсациями выходного напряжения предназначен для питания промышленной нагрузки и линий электропередач постоянного тока, и обеспечивает экономию материалов и снижение себестоимости установки.

В случае выпрямителя с “боковыми пульсациями” частота пульсаций напряжения на выходе выпрямителя составляет 12 за период питающей сети, и достигается при отсутствии фазового сдвига между двумя вторичными обмотками питающего трансформатора, что соответствует общепринятой норме коэффициента пульсаций выходного напряжения 6-фазного выпрямителя.

Следует отметить, что точность соблюдения соотношения витков двух вторичных обмоток в УВ с “боковыми пульсациями” определяет симметричность пульсаций выходного напряжения выпрямителя.

Еще одним достоинством УВ с “боковыми пульсациями” является то, что половина силовых полупроводниковых вентилях может быть неуправляемыми диодами. Другая половина – должна быть управляемыми полупроводниковыми приборами (например, полностью управляемыми тиристорами типа IGCT). В случае если не требуется регулирования выходного напряжения, можно использовать в управляемом мосте обычные тиристоры, подавая сигнал на их открытие с некоторым опережением для обеспечения коммутации тока с вентиля на вентиль. За счет управления обмоткой с уменьшенным числом витков, а значит – и индуктивностью, обеспечивается лучшая электромагнитная совместимость с питающей сетью и линейность потребляемого из нее тока. Последняя проблема традиционно решалась применением пассивных фильтров [9], либо применением активных выпрямителей с использованием мощных полупроводниковых модулей.

Подводя итог, можно сказать, что основными критериями выбора схемы выпрямления, определяющими целесообразность ее применения, являются стоимость, коэффициент полезного действия, вес, габариты и качество выходного напряжения. При этом схема УВ с “боковыми пульсациями” дает до 30% выигрыша по массе и габаритам по сравнению с классическими схемами с двумя вторичными обмотками звезда-треугольник, что можно признать значительным достижением. Данное решение является новым, и было запатентовано [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Беркович Е.И., Боровой А.И. Полупроводниковые выпрямители. – М.: Энергия, 1967.
2. Вильбергер М.Е., Ворфоломеев Г.Н., Евдокимов С.А., Щуров Н.И. Теоретические основы многопульсных выпрямителей с ортогональными системами напряжений. – Электротехника, 2007, №8, с. 18
3. Игольников Ю.С. 24-фазный выпрямитель. – Электротехника, 2004, №10, с. 51
4. Игольников Ю.С., Курганов А.А. Кольцевая схема выпрямителя с уравнительным реактором. – Электротехника, 2013, №5, с.
5. Арефьев А.Н., Севрюгов А.В. Анализ переходных процессов в схеме с параллельным соединением мостовых преобразователей. – Электротехника, 1982, №2, с. 15
6. Зборовский И.А. Расчет пульсаций тока в реакторах шестифазного и двенадцатифазного преобразователей. – Электричество, 1992, №11, с. 28
7. Ворфоломеев Г.Н., Щуров Н.И., Мятёж С.В., Евдокимов С.А. Источник постоянного напряжения с шестнадцатикратной частотой пульсации. – Электротехника, 2003, №9, с. 34
8. Ворфоломеев Г.Н. Теоретические основы преобразования однофазного тока в трехфазный для питания асинхронного двигателя. – Электротехника, 1994, №5, с.28
9. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В. Современные методы улучшения качества электроэнергии. – Электротехника, 1998, №3, с. 10
10. Черевко А.И., Коптяев Е.Н., Душкин Ю.В., Атрашкевич П.В., Телепнев А.И., Потего П.И. Трехфазный выпрямитель с улучшенными массогабаритными показателями – патент РФ на полезную модель №139772.

Рецензент: Абрамов Сергей Станиславович, ведущий конструктор, кандидат технических наук, филиал ОАО «Силовые машины» завод «Электросила».

Evgenij Koptjaev

JSC «Northern Industrial Association «Arctic»
Russia, Severodvinsk
E-Mail: evgkop79@mail.ru

Jurij Dushkin

JSC «Northern Industrial Association «Arctic»
Russia, Severodvinsk
E-Mail: yuri.dushkin@yandex.ru

Pavel Atrashkevich

JSC «Northern Industrial Association «Arctic»
Russia, Severodvinsk
E-Mail: bimfin@mail.ru

Semiconductor rectifier with side pulsation

Abstract. Described rectifier with twelve output voltage ripple is designed to supply industrial load and power lines DC, and provides savings in material and installation cost savings. A scheme managed rectifier with side pulsations, which gives a gain of up to 30% on mass and dimensions compared to classical schemes with two secondary windings are star-delta and provides better electromagnetic compatibility with the mains. The essence of the method is that the amount of segments of two sine waves results in a segment as a sinusoidal function to the amplitude and phase determined by the amplitude and phase terms. In the case of controlled semiconductor valves in a three-phase bridge circuit, it is possible to obtain an additional phase shift - at the expense of the control algorithm, which is the subject of this article. The total voltage of the two series-connected three-phase bridges (second - controlled with the "side pulsation ") connected to two secondary windings supplying three-phase transformer with a ratio of the number of turns in a ratio of 2.8: 1, respectively, and the same method of switching the two secondary windings with star connection has 12 pulsations.

Keywords: static rectifier; three phase transformer; 12-pulse; winding with star connection; winding with a delta connection; improved weight and dimensions; improved EMC.

Identification number of article 129TVN414

REFERENCES

1. Berkovich E.I., Borovoj A.I. Poluprovodnikovye vyprjamiteli. – M.:Jenergija, 1967.
2. Vil'berger M.E., Vorfolomeev G.N., Evdokimov S.A., Shhurov N.I. Teoreticheskie osnovy mnogopul'snyh vyprjamitelej s ortogonal'nymi sistemami naprjazhenij. – Jeлектrotehnika, 2007, №8, s. 18
3. Igol'nikov Ju.S. 24-faznyj vyprjamitel'. – Jeлектrotehnika, 2004, №10, s. 51
4. Igol'nikov Ju.S., Kurganov A.A. Kol'cevaja shema vyprjamitelja s uravnitel'nym reaktorom. – Jeлектrotehnika, 2013, №5, s.
5. Aref'ev A.N., Sevrjugov A.V. Analiz perehodnyh processov v sheme s parallel'nym soedineniem mostovyh preobrazovatelej. – Jeлектrotehnika, 1982, №2, s. 15
6. Zborovskij I.A. Raschet pul'sacij toka v reaktorah shestifaznogo i dvenadcatifaznogo preobrazovatelej. – Jeлектричestvo, 1992, №11, s. 28
7. Vorfolomeev G.N., Shhurov N.I., Mjatezh S.V., Evdokimov S.A. Istochnik postojannogo naprjazhenija s shestnadcatikratnoj chastotoj pul'sacii. – Jeлектrotehnika, 2003, №9, s. 34
8. Vorfolomeev G.N. Teoreticheskie osnovy preobrazovanija odnofaznogo toka v trehfaznyj dlja pitaniya asinhronnogo dvigatelja. – Jeлектrotehnika, 1994, №5, s.28
9. Rozanov Ju.K., Rjabchickij M.V. Sovremennye metody uluchshenija kachestva jelektrojenergii. – Jeлектrotehnika, 1998, №3, s. 10
10. Cherevko A.I., Koptjaev E.N., Dushkin Ju.V., Atrashkevich P.V.,Telepnev A.I., Potego P.I. Trehfaznyj vyprjamitel' s uluchshennymi massogabaritnymi pokazateljami – patent RF na poleznuju model' №139772