

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №2 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-2>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/112TVN215.pdf>

DOI: 10.15862/112TVN215 (<https://doi.org/10.15862/112TVN215>)

УДК 621.314.572

Коптяев Евгений Николаевич

ОАО «Северное Производственное Объединение «Арктика»»

Российская Федерация, г. Северодвинск¹

Инженер по наладке и испытаниям 1 категории

Старший преподаватель

E-mail: evgenijkoptyaev@gmail.com

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=792304

Балашевич Вячеслав Михайлович

НИИ Энергетики ЮРГТУ

Российская Федерация, г. Новочеркасск²

Ведущий инженер

E-mail: bmashka@gmail.com

Атрашкевич Павел Васильевич

ОАО «Северное Производственное Объединение «Арктика»»

Российская Федерация, г. Северодвинск³

Инженер по наладке и испытаниям 1 категории

E-mail: bimfin@mail.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=799760

Промышленный умножитель частоты на базе трансформатора с вращающимся полем

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

² 346428, Ростовская область г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

³ 164500, г. Северодвинск, Архангельской области, Архангельское шоссе, 34

Аннотация. Недостатком отечественных статических преобразователей прошлых поколений являются худшие габариты в сравнении с электромашинными преобразователями. Современные преобразователи используют широтно-импульсную модуляцию, что вызывает проблемы с электромагнитной совместимостью. Введенные странами Евросоюза и США санкции вызвали на повестку дня замещение импортных комплектующих и компонентов, в том числе поиск новых путей развития отечественной техники. Известные ферромагнитные умножители частоты не получили применения в промышленной энергетике по причине большой массы и низкой эффективности. Предложенный в статье новый способ умножения частоты решает указанные выше вопросы, позволяя реализовать простой и надежный преобразователь без использования импортных комплектующих. Выходное напряжение повышенной частоты умножителя формируется за счет использования магнитного потока трансформатора с вращающимся полем, имеющего дополнительную степень свободы, что является новым решением. Возможно умножение с различными коэффициентами умножения частоты, включая 8 раз, что позволяет получить напряжение частотой 400 Гц.

Ключевые слова: ферромагнитный умножитель частоты; трансформатор с вращающимся полем; магнитный поток; степень свободы; промышленные потребители; преобразователь частоты; концентрическая трехфазная обмотка; вторичная обмотка; полувольты напряжения.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Коптяев Е.Н., Балашевич В.М., Атрашкевич П.В. Промышленный умножитель частоты на базе трансформатора с вращающимся полем // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №2 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/112TVN215.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/112TVN215

Питание промышленных спецпотребителей и систем автоматики осуществляется от сети переменного тока частотой 400 Гц. Традиционно для питания таких сетей использовались электромашинные преобразователи серий АПТ, АПО, АТТ и ВПР. В настоящее время идет процесс вытеснения электромашинных преобразователей, и замена их статическими, что позволяет снизить уровень шумов и повысить надежность. Недостатком применяемых в промышленности статических преобразователей являются худшие габариты в сравнении с электромашинными преобразователями. В преобразователях ПЧ-ТТВ, используемых для питания сети 400 Гц/220В на судах, используются батареи конденсаторов большой емкости, а также относительно громоздкая силовая схема с тиристорами.

Использование статических преобразователей с ШИМ-модуляцией позволяет снизить массу и габариты преобразователей, но имеет проблемы с электромагнитной совместимостью. Введенные странами Евросоюза и США санкции вызвали на повестку дня замещение импортных комплектующих и компонентов, в том числе поиск новых путей развития отечественной техники.

Известны различные конструкции специальных трансформаторов для преобразования параметров электрической энергии, к которым относятся ферромагнитные умножители частоты, принцип действия которых основан на выделении нужной гармоники с помощью различного рода комбинаций соединения вторичных обмоток и в некоторых случаях, резонансных контуров [1, 2].

Наиболее распространенной конструкцией является соединение первичных обмоток группы из трёх однофазных трансформаторов в звезду без нулевого провода, при этом в магнитном потоке трансформаторов возникает составляющая третьей гармоники [1, 2, 3]. При соединении вторичных однофазных обмоток трансформаторов в разомкнутый треугольник (то есть последовательно согласно), первая гармоника напряжения в сумме равняется нулю, а поскольку фаза напряжений вторичных обмоток одинакова, то на выходе выделяется третья гармоника с частотой, равной утроенной частоте питающей сети. Однако содержание третьей гармоники в магнитном потоке сердечника такого решения составляет не более 10%, что предопределяет низкую эффективность преобразования частоты, и невысокие массогабаритные показатели. Соединение первичных обмоток по схеме звезды с нулевым проводом приводит к снижению уровня напряжения утроенной частоты. Включение вторичных обмоток по схеме замкнутого треугольника, приводит к возникновению тока третьей гармоники, снижающему уровень напряжения утроенной частоты. Эти особенности ограничивают возможность дальнейшей модернизации подобных умножителей частоты.

Интересным представляется ферромагнитное умножение частоты на базе трансформаторов с вращающимся магнитным полем [3]. В основу данного способа умножения частоты положено явление генерирования высших гармонических составляющих напряжения при питании цепей, содержащих нелинейные ферромагнитные сердечники, от источника синусоидального напряжения. Для выделения высшей гармоники индукции трансформатора с вращающимся магнитным полем задают число пар полюсов первичной обмотки обычно равным 1, выбирают коэффициенты соотношения витков обмоток и число пар полюсов вторичной обмотки, таким образом, что пространственный период выделяемой высшей гармоники должен совпадать с удвоенным полюсным делением вторичной обмотки. Конструкция такого умножителя частоты, предназначенного для преобразования трехфазного напряжения одной частоты в трехфазное напряжение утроенной частоты, содержит наружный магнитопровод с пазами по типу магнитопровода асинхронной машины – это наружный сердечник, внутренний неподвижный магнитопровод – это внутренний сердечник, а также две трехфазные обмотки: первичную и вторичную, лежащие в общих пазах. Внутренний сердечник трансформатора набирается из колец электротехнической стали, при этом геометрия

магнитной системы такова, что спинки магнитопровода насыщены, а зубцы – нет. Первичная трехфазная обмотка выполняется на одну пару полюсов с укороченным шагом обмотки и соединяется в звезду, а вторичная обмотка имеет три пары полюсов и также соединяется в звезду.

Указанные выше решения считается наиболее эффективным из известных, а варианты умножителей, выполненные на многостержневых трансформаторах, имеют худшие параметры. Наибольшую известность получили схемы удвоения и утроения частоты, они же имеют наилучшие массогабаритные показатели и эффективность. Максимально возможный коэффициент умножения частоты в подобных схемах составляет шесть раз.

Указанные недостатки умножителей частоты, существенно ограничивают их промышленное применение. Известны случаи использования ферромагнитных умножителей частоты только во вспомогательных устройствах автоматики.

Авторам неизвестно о случаях использования ферромагнитных умножителей в области промышленной энергетики и силовой преобразовательной техники. Для питания мощной промышленной нагрузки напряжением повышенной частоты применяют электромашинные преобразователи (все реже из-за известных недостатков) и полупроводниковые статические преобразователи частоты (все чаще с ШИМ-модуляцией того или иного рода).

Тем не менее, потребность в простых конструктивно, надежных и не требующих обслуживания умножителях частоты объективно существует. Главным условием в данном случае становится эффективность и массогабаритные показатели. Потребителями таких умножителей могут быть различные устройства автоматики, электропривод с повышенной частотой вращения (например, гироскопы) и в ряде случаев, промышленные устройства индукционного нагрева (при частотах выше 400 Гц).

Существующие варианты умножителей частоты не удовлетворяют запросам промышленности в части эффективности и их массогабаритных показателей. Это обусловлено способом умножения частоты, который основан на выделении высших гармоник магнитного потока преобразовательного трансформатора тем или иным образом, что приводит к частичному использованию рабочего магнитного потока и низкой эффективности [2].

В широком смысле, трансформаторы, как и электромашинные преобразователями, можно считать разновидностью индуктивной электрической машины переменного тока [1, 8, 10]. В настоящее время выпускаются трансформаторы напряжения самого различного назначения и широким диапазоном мощностей вплоть до 1 ГВ·А. Силовые трансформаторы с пульсирующим магнитным полем (ТПМП) можно рассматривать как систему с одной степенью свободы (с точки зрения распределения магнитного потока): рабочий магнитный поток протекает в одной плоскости, не меняя своего положения; переменная составляющая тока первичной обмотки заключается в изменении (пульсировании) значения индукции в стержнях магнитопровода (амплитудная модуляция).

Обратимся к эволюции математической модели обобщенной электрической машины, частным случаем которой является индуктивный преобразователь переменного тока (трансформатор) [8, 10]. Простейшим состоянием электромагнитного поля является пульсирующее поле неподвижной одиночной катушки; следующая ступень – круговое поле однофазной электрической машины, при этом, если её ротор неподвижен – конструкция соответствует катушке с броневой конструкцией магнитопровода; далее следует вращающееся магнитное поле – образованное m -фазной системой ЭДС [8]. В основе всех этих вариаций лежит разное число степеней свободы.

Развитием конструкции трансформаторов стало появление трансформаторов и реакторов с вращающимся магнитным полем (ТВП), обладающих симметричной магнитной

системой и синусоидальным током, потребляемым из сети [9]. Их конструкция в основном аналогична электрическим машинам переменного тока с заторможенным ротором и пространственно-распределенной трехфазной первичной обмоткой, обладающей круговой симметрией [4, 5, 6, 7].

Последнее время было ознаменовано промышленным внедрением мощных трансформаторов ТВП, в частности заводом «Электросила». Их использование было обусловлено как технологическими соображениями производства, так и возможностью конструктивного сдвига фаз напряжения на вторичных обмотках без использования соединения трехфазных обмоток в треугольник, требующий в 1,7 раза большего числа витков для получения той же ЭДС.

До сих пор существует недопонимание физической сущности трансформаторов ТВП, а именно – наличия дополнительной степени свободы. По сравнению с асинхронными двигателями, отсутствие механического перемещения приводит к снижению степеней свободы, и как следствие – к упрощению математической модели и уменьшению числа уравнений, описывающих систему. Тем не менее, число степеней свободы больше, чем в трансформаторах с пульсирующим магнитным полем, где нет пространственного перемещения магнитного потока, который описывается законами изменения во времени мгновенного значения индукции [1, 9].

Обратимся к физическому смыслу вращающегося магнитного поля. Как известно, первичная трехфазная обмотка ТВП создает вращающееся магнитное поле, так что закон изменения трехфазных токов в фазах обмотки определяет пространственное распределение во времени намагничивающих сил, при этом электромагнитное поле не пульсирует – а перемещается в пространстве, численное же его значение постоянно и является подобным постоянному магнитному полю [9]. Сохраняется аналогия с электромеханическими преобразователями, и пространственное перемещение суммарного магнитного поля трехфазной первичной обмотки, на основании чего можно сделать вывод о возможности преобразования частоты ЭДС вторичной обмотки.

При этом отсутствие изменения потокосцеплений контуров не позволяет плавно регулировать выходную частоту, как следствие снижения степени свободы системы. Тем не менее, очевидна теоретическая возможность умножения частоты выходного напряжения в фиксированное количество раз.

В отличие от трансформаторов для преобразования частоты (иначе – ферромагнитные умножители частоты), где в пульсирующем магнитном потоке выделяются высшие (чаще всего третья) гармоники с крайне низкой эффективностью, предлагаемый способ умножения частоты на базе ТВП отличает лучшие масса, габариты и энергетические параметры.

Моделирование магнитного поля магнитопровода в программе Ansys, указало на существование ряда конфигураций, при которых суммарный магнитный поток распределен крайне неравномерно по зубцам магнитопровода.

В результате проведенных авторами опытов было установлено, что при использовании однослойных концентрических обмоток наблюдается крайне нелинейная картина распределения магнитного поля по зубцам магнитопровода, таким образом, что практически весь магнитный поток сосредотачивается в отдельном зубце. При этом ЭДС катушек вторичной обмотки, установленных на отдельных зубцах, имеет прерывистый циклический характер (рисунок 1). В течение некоторого время поле концентрируется в текущем зубце, при этом ЭДС катушки имеет квази-синусоидальный характер, после чего резко переходит на следующий зубец. При смене полярности магнитного потока в зубце возникает импульс ЭДС противоположной полярности. Через отрезок времени, равный периоду частоты питающей сети

(20 миллисекунд при 50 Гц), последовательность импульсов повторяется, а интервал между импульсами положительной и отрицательной полярности составляет половину периода.

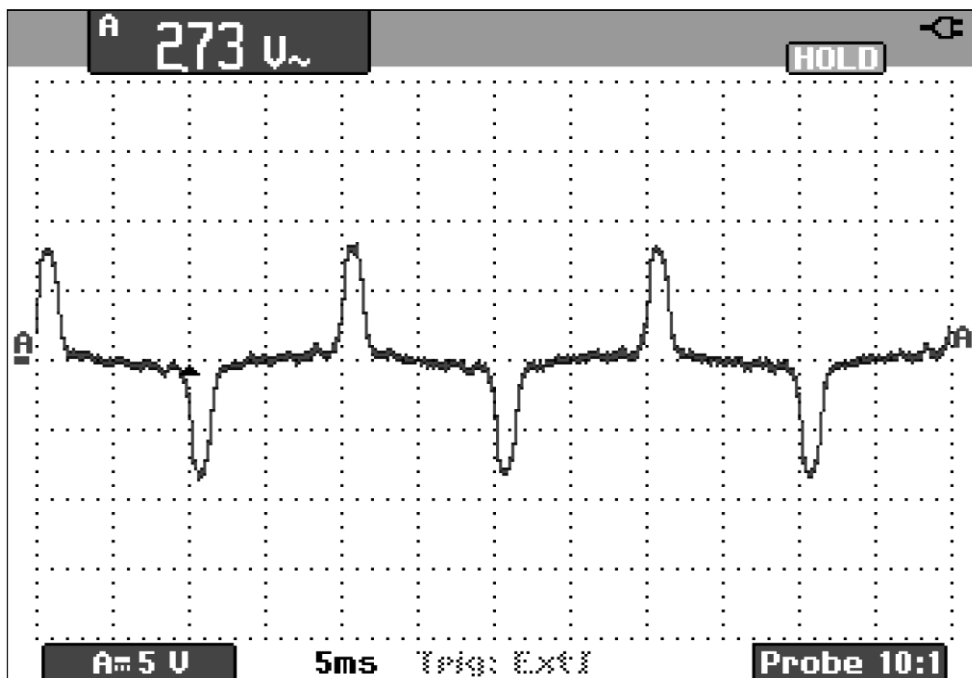


Рисунок 1. Форма ЭДС наведенной в катушке вторичной обмотки

Таким образом, длительность импульсов на выходе катушек составляет только часть от периода питающей сети, и повторяется дважды с разной полярностью на его протяжении, а форма импульсов близка синусоидальной.

Последовательность импульсов повторяется от одной катушки к другой со сдвигом, таким образом, что каждому интервалу времени соответствует определенная катушка, в которой в течение его наводится ЭДС. Полувольты наводимой в катушках вторичной обмотки ЭДС имеют частоту, повышенную по отношению к частоте питающей сети, что определяется меньшей в целое число раз (кратное коэффициенту умножения частоты) длительностью полувольт. Очевидно, что сумма интервалов всех полувольт в катушках вторичной обмотки равняется периоду питающей сети.

Такой вариант соответствует варианту первичной обмотки с числом полюсов $2p=2$, но нет никаких принципиальных отличий для случая с большим числом пар полюсов. Возможно увеличение числа полюсов при пропорциональном увеличении числа зубцов трансформатора, и количества катушек вторичной обмотки. Также как и при двухполюсном варианте будет наблюдаться чередование полувольт положительной и отрицательной полярности на выходе катушек вторичной обмотки, через промежутки, равные половине периода питающей сети.

Используя полувольты ЭДС повышенной частоты на выходе катушек вторичной обмотки, коммутируя их в последовательной очередности, можно сформировать непрерывное выходное напряжение повышенной частоты.

В ходе опытов авторами был изготовлен образец умножителя частоты в шесть раз. В качестве магнитопровода по технологическим соображениям был выбран вариант с 36 зубцами, при этом число полюсов составило $2p=6$, и каждой паре полюсов соответствует 12 зубцов и катушек вторичной обмотки.

Каждая пара полюсов формирует последовательность из 6 полувольт положительной, и 6 полувольт отрицательной полярности, наводимых в катушках вторичной обмотки. Интервалы полувольт соответствует коэффициенту умножения в 6 раз (1,67 миллисекунд при частоте

питающей сети 50 Гц). Циклическая последовательность выходного напряжения формируется 12 катушками, установленными на 12 зубцах магнитопровода, при этом в каждой катушке за период питающей сети наводятся две полуволны – положительной и отрицательной полярности ЭДС.

Таким образом, катушки разбиваются на пары, сдвинутые относительно друг друга на 6 зубцов, при этом их временные интервалы совпадают при обратной полярности полуволн. Данная последовательность наглядно представлена в таблице 1, где показаны временные интервалы катушек, и полярность наведенной ЭДС. Таблица отображает только первые 12 катушек вторичной обмотки, чередование катушек повторяется через 12 зубцов.

Выходы катушек вторичной обмотки трансформатора подсоединяются к полупроводниковому коммутатору, обеспечивающему необходимую последовательность подключения катушек к выходу умножителя. При этом важно количество полупроводниковых ключей, задействованных в коммутаторе, но максимальная эффективность использования катушек ТВП будет при использовании реверсивного коммутатора, что потребует большего числа полупроводниковых ключей.

Таблица 1

Последовательность полувольт отрицательной и положительной полярности в катушках вторичной обмотки

Номер катушки	интервал времени											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+						-					
2		+						-				
3			+						-			
4				+						-		
5					+						-	
6						+						-
7	-						+					
8		-						+				
9			-						+			
10				-						+		
11					-						+	
12						-						+

Существенное отличие такого умножителя заключается в использовании дополнительной степени свободы структуры трансформатора с вращающимся магнитным полем, и за счет нелинейного распределения создаваемого первичной трехфазной обмоткой магнитного потока. Реализовать подобный способ возможно только на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем, выходное напряжение в этом случае формируется из отдельных полувольт, снимаемых с катушек вторичной обмотки, и коммутируемых в заданной последовательности, что в результате обеспечивает умножение частоты выходного напряжения.

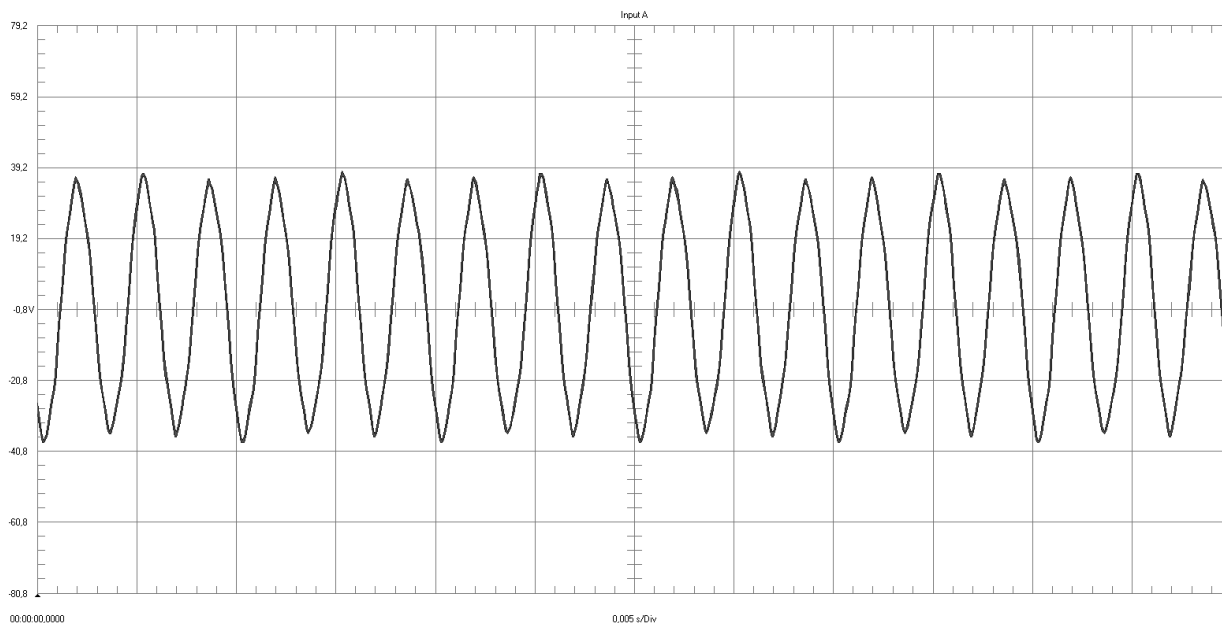


Рисунок 2. Осциллограмма выходного напряжения умножителя частоты в 6 раз

В заключение можно сделать следующие обобщающие выводы:

1. За счет первичной трехфазной обмотки достигается предельно нелинейная картина распределения магнитного поля по зубцам магнитопровода, с концентрированием магнитного потока в отдельных зубцах, благодаря чему практически весь магнитный поток первичной обмотки участвует в создании выходного напряжения повышенной частоты;
2. Предлагаемый способ умножения позволяет реализовать различные коэффициенты умножения частоты, в том числе в 8 раз, что позволяет получить напряжение частотой 400 Гц, востребованное в промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. Том 1. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006.
2. Сончик Л.И. Ферромагнитные умножители частоты. Трансформаторные преобразователи частоты с витым магнитопроводом пространственной конструкции. – диссертация, Минск, 1984.
3. Загрядцкий В.И., Кобыляцкий Н.И., Недзельский А.П. Ферромагнитные умножители частоты с вращающимся магнитным полем. – Кишинев: «Карта Молдовеняскэ», 1973.
4. Атрощенко В.А., Гайтов Б.Х., Сингаевский Н.А., Луков Ф.И. Гармонический анализ кривой МДС трансформатора с вращающимся магнитным полем. – Электромеханика, 1997, №1, с. 9.
5. Гайтов Б.Х., Прасько Д.Г., Гайтова Т.Б. Разработка многофазных трансформаторов. – Электротехника, 2000, №8, с.42.
6. Гайтов Б.Х., Гайтова Т.Б., Кашин Я.М. Перспективные конструкции аксиальных многофазных трансформаторов и регуляторов с вращающимся магнитным полем. – Электромеханика, 2005, №3, с. 44.
7. Забудский Е.И. Совмещенные регулируемые реакторы: монография – М.: МГАУ, Энергоатомиздат, 2003.
8. Копылов И.П. Обобщенная электрическая машина и обобщенный электромеханический преобразователь. Электротехника, 2008, №2, с. 50.
9. Черевко А.И., Дмитриев Б.Ф., Рябенский В.М., Музыка М.М., Солуянов П.В. Судовые полупроводниковые преобразователи: учебник. – СПб: СПбГМТУ, 2011.
10. Копылов И.П., Гандилян С.В., Гандилян В.В. Некоторые вопросы обобщенного физико-математического моделирования электромеханических преобразователей энергии. – Электротехника, 1998, №9, с. 25.

Рецензент: Каплин В.Н., зам. главного конструктора по спецтехнике НИИ Энергетики ЮРГПУ (НПИ).

Koptjaev Evgenij Nikolaevich

JSC "Northern Industrial Association" Arctic"
Russian Federation, Severodvinsk
E-mail: evgkop79@mail.ru

Balashovich Vyacheslav Mikhailovich

Energy Research Institute YURGPU
Russian Federation, Novocherkassk
E-mail: bmashka@gmail.com

Atrashkevich Pavel Vasilevich

JSC "Northern Industrial Association" Arctic"
Russian Federation, Severodvinsk
E-mail: bimfin@mail.ru

Industrial frequency multiplier based on a transformer with a rotating field

Abstract. The disadvantage of domestic static converters past generations are the worst dimensions in comparison with rotating converters. Modern inverters use pulse width modulation, which causes problems with electromagnetic compatibility. Imposed by the EU and US sanctions have caused on the agenda of the replacement of imported parts and components, including the search for new ways to develop domestic technology. Known ferromagnetic frequency multipliers have not received applications in industrial energy due to the large mass and low efficiency. Proposed in the article a new method of frequency multiplication solve the above issues, allowing you to implement a simple and reliable converter without the use of imported components. The output voltage of high frequency multiplier is formed by the use of magnetic flux transformer with a rotating field, which has an additional degree of freedom, which is a new solution. Perhaps multiplication with different coefficients of frequency multiplication, including 8 times to provide voltage with a frequency of 400 Hz.

Keywords: ferromagnetic frequency multiplier; transformer with the rotating field; the magnetic flux; the degree of freedom; industrial consumers; frequency converter; concentric three-phase winding; a secondary winding; a half-wave voltage.

REFERENCES

1. Ivanov-Smolenskiy A.V. Elektricheskie mashiny: uchebnik dlya vuzov. Tom 1. – M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2006.
2. Sonchik L.I. Ferromagnitnye umnozhiteli chastoty. Transformatornye preobrazovateli chastoty s vitym magnitoprovodom prostranstvennoy konstruksii. – dissertatsiya, Minsk, 1984.
3. Zagryadtskiy V.I., Kobilyatskiy N.I., Nedzel'skiy A.P. Ferromagnitnye umnozhiteli chastoty s vrashchayushchimsya magnitnym polem. – Kishinev:«Kartya Moldovenyaske», 1973.
4. Atroshchenko V.A., Gaytov B.Kh., Singaevskiy N.A., Lukov F.I. Garmonicheskiy analiz krivoy MDS transformatora s vrashchayushchimsya magnitnym polem. – Elektromekhanika, 1997, №1, s. 9.
5. Gaytov B.Kh., Pras'ko D.G., Gaytova T.B. Razrabotka mnogofaznykh transformatorov. – Elektrotehnika, 2000, №8, s.42.
6. Gaytov B.Kh., Gaytova T.B., Kashin Ya.M. Perspektivnye konstruksii aksial'nykh mnogofaznykh transformatorov i regulyatorov s vrashchayushchimsya magnitnym polem. – Elektromekhanika, 2005, №3, s. 44.
7. Zabudskiy E.I. Sovmeshchennye reguliruemye reaktory: monografiya – M.:MGAU, Energoatomizdat, 2003.
8. Kopylov I.P. Obobshchennaya elektricheskaya mashina i obobshchenny elektromekhanicheskiy preobrazovatel'. Elektrotehnika, 2008, №2, s. 50.
9. Cherevko A.I., Dmitriev B.F., Ryaben'kiy V.M., Muzyka M.M., Soluyanov P.V. Sudovye poluprovodnikovye preobrazovateli: uchebnik. – SPb: SPbGMTU, 2011.
10. Kopylov I.P., Gandilyan S.V., Gandilyan V.V. Nekotorye voprosy obobshchennogo fiziko-matematicheskogo modelirovaniya elektromekhanicheskikh preobrazovateley energii. – Elektrotehnika, 1998, №9, s. 25.