

## О повышении эффективности ферромагнитного умножителя частоты

АТРАШКЕВИЧ П.В., БАЛАШЕВИЧ В.М., ИВЛЕВ М.Л., КОПТЯЕВ Е.Н.

*В известных конструкциях ферромагнитных умножителей частоты используются трансформаторы с пульсирующим полем высших гармоник, что снижает энергетическую эффективность умножителей частоты. Среди трансформаторов с пространственной конструкцией, также применяемых для умножителей частоты, выделяются конструкции на базе трансформатора с вращающимся полем, характеризующегося дополнительной степенью свободы. Использование пространственного перемещения магнитного потока в нем отличается от классических конструкций трансформаторов с пульсирующим полем. Подобное изменение определяет его зависимость от параметров магнитопровода (числа зубцов) и типа первичной трехфазной обмотки, причем нелинейности распределения могут быть значительны. Использование вращающегося поля позволяет также управлять магнитным потоком по зубцам магнитопровода, при этом в качестве вторичной обмотки выступает группа зубцовых катушек. Это позволяет реализовать умножение частоты путем образования непрерывной последовательности полуолн выходного напряжения повышенной частоты, получаемой из отдельных полуолн катушек. Сделанные в статье выводы подтверждаются как экспериментом, так и результатами компьютерного моделирования.*

**Ключевые слова:** ферромагнитный умножитель частоты, повышение эффективности, трансформатор с вращающимся полем, магнитный поток, концентрическая обмотка, качество напряжения

Силовые трансформаторы используются для преобразования параметров трехфазного напряжения и частоты при питании силовых потребителей [1, 2], в том числе изменения частоты напряжения на выходе (умножения). Кроме ставшего уже классическим трехстержневого трансформатора с несимметрией магнитной системы, существует ряд конструкций, имеющих пространственное расположение стержней магнитопровода [1]. Все подобные симметричные конструкции относятся к трансформаторам с пульсирующим магнитным полем, в которых магнитный поток модулируется частотой питающей сети, а содержание высших гармоник в нем остается сравнительно малым.

Создан новый класс трансформаторов с вращающимся полем (ТВП) по аналогии с электрическими машинами переменного тока. В частности, ТВП обладают полностью симметричной конструкцией магнитопровода с распределенной в пазах первичной многофазной обмоткой [2, 4, 9]. К достоинствам можно отнести простоту конструкции и возможность увеличения числа фаз выходного напряжения без ухудшения массогабаритных характеристик. Эти преимущества (магнитная симметрия и возможность получения многофазного выходного напряжения) обуславливают перспективность применения ТВП в полупроводниковых преобразователях [2, 5], а также для питания промышленной нагрузки и увеличения числа фаз напряжения.

Как известно, основное отличие трансформаторов ТВП заключается в наличии дополнительной пространственной степени свободы в конструкции магнитной системы [3, 9, 10]. Магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой, распределяется по зубцам магнитопровода, а вектор суммарного потока зависит от фазы питающей сети и перемещается в пространстве, наводя ЭДС вторичной обмотки. Таким образом, возникновение ЭДС вторичной обмотки, пропорциональное изменению потока  $dB/dt$ , достигается пространственным перемещением поля, а не его амплитудной модуляцией, как в случае стержневых трансформаторов. Это дает принципиальную возможность управления формой ЭДС, наводимой во вторичной обмотке трансформатора за счет перераспределения магнитного потока.

Одна из областей применения трансформаторов — известные в электротехнике ферромагнитные умножители частоты, в частности утроители частоты напряжения [6, 8]. Их работа основана на выделении третьей гармоники магнитного потока, содержание которой в ЭДС вторичной обмотки не превышает 30% [10]. Кроме того, использование последовательного соединения катушек разных фаз вторичной обмотки приводит к спадающей нагрузочной характеристике и еще больше снижает эффективность преобразования частоты.

Известны попытки использования ТВП для умножения (утроения) частоты выходного напряжения [7] для питания нагрузки, требующей повышенной частоты. При этом авторами предполагалась возможность использования различных вариантов первичной обмотки (однофазной, двухфазной, многофазной) и многофазной вторичной, что означало бы удобство промышленного использования подобного умножителя частоты (стоит отметить, что на практике варианты обмоток с числом фаз  $m < 3$  имеют пульсации магнитного потока с частотой питающей сети, поэтому их использование затруднительно).

В основу принципа работы было положено выделение высших (в частности третьей) гармоник магнитного потока за счет конденсаторов и образующих ими совместно с индуктивностью обмотки резонансных контуров. Получаемое таким образом выходное напряжение повышенной частоты будет зависеть от параметров фильтра и их девиации при колебаниях температуры, частоты питающей сети и разброса значений параметров элементов. Энергетическая эффективность описанного выше решения также вызывает сомнения, поскольку содержание третьей гармоники в магнитном потоке статорных обмоток электрических машин, как правило, намного меньше основной частоты [6]. В первоисточнике отсутствуют сведения о результатах испытаний опытных образцов такого типа.

Для сравнения рассмотрим наиболее известную схему трехкратного умножителя частоты [6, с. 172], использующую выделение третьей гармоники магнитного потока. В этом случае группа из трех однофазных трансформаторов соединяется первичными обмотками в звезду, подключенную к трехфазной сети. Вторичные обмотки трансформаторов соединяются последовательно-согласно, а поскольку сумма ЭДС трехфазной сети равна нулю, на выходе появляется синусоидальное однофазное напряжение утроенной частоты, значения напряжения которой во вторичных обмотках совпадают и суммируются.

Подобная схема проста и легко повторяема, поэтому возможно не только убедиться в ее работоспособности, но и снять нагрузочные характеристики. Для опыта использовались обычные отечественные трансформаторы мощностью 10 Вт. Наибольший интерес для практического внедрения представляет нагрузочная характеристика утроителя частоты, результаты измерений приведены в таблице. Они показывают, что нагрузочная характеристика имеет резко спадающий вид (рис. 1). Самая главная отличительная особенность ферромагнитных умножителей частоты — стремление к нулю мощности, отдаваемой в нагрузку, при стремлении

к нулю ее сопротивления. Практически это означает невозможность проведения опыта короткого замыкания и снятия соответствующей характеристики, а также несрабатывание защитной коммутационной аппаратуры в случае замыкания в промышленной нагрузке. Начиная с некоторого значения, умножитель переходит в режим стабилизации тока, при этом мощность снижается при уменьшении сопротивления нагрузки.

Сопротивление нагрузки, Ом	Напряжение на выходе, В	Мощность на выходе, Вт
Холостой ход	24,4	0
$10 \cdot 10^3$	21,1	0,045
910	6	0,039
300	2,1	0,015
9,1	0,065	0,00046

Авторами статьи при проведении опытов с различными конструкциями ТВП был изготовлен вариант трансформатора на основе статора серийного асинхронного двигателя типа АО2-41-6, имеющего следующие характеристики: мощность  $P=3$  кВт,  $n=960$  мин<sup>-1</sup>, тип обмотки — однослойная концентрическая с числом полюсов  $2p=6$  и  $Z=36$ . В полость статора был вставлен вырезанный из изотропной электротехнической стали шихтованный ротор, не имеющий воздушного зазора. Для определения характеристик и дальнейшего расчета вторичной обмотки в получившейся конструкции на зубцах ротора были намотаны катушки. Осциллографирование наведенной в них ЭДС (пропорциональной  $dB/dt$ ) показало, что магнитный поток каждого полюса первичной обмотки стремится концентрироваться в отдельном зубце

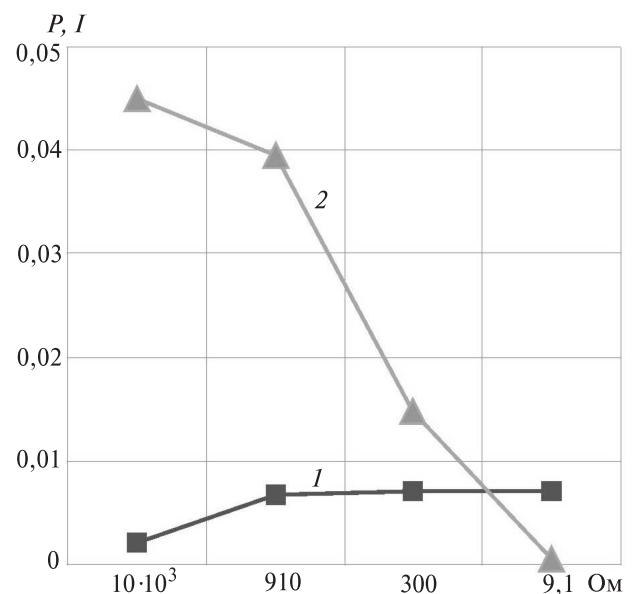


Рис. 1. Зависимость тока ( $I$ ) и мощности ( $P$ ) от сопротивления нагрузки ферромагнитного умножителя частоты

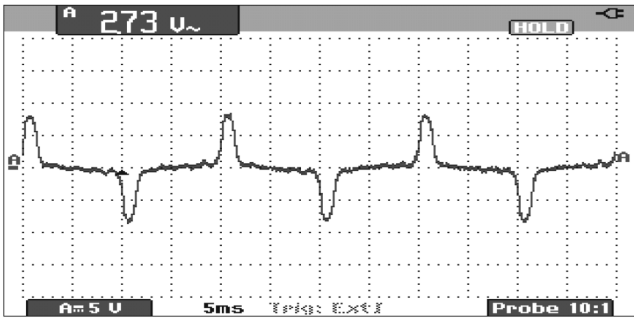


Рис. 2. Оциллограмма выходного напряжения катушек

(рис. 2). При этом индукция в соседних зубцах практически отсутствует, а измерения проводились при напряжении питания 36, 127, 220, 380 В и нулевом воздушном зазоре. Результаты измерений показали, что качественно картина распределения индукции по зубцам не зависит от питающего напряжения при условии отсутствия воздушного зазора.

Таким образом, в катушках вторичной обмотки образуется последовательность полуволн с большими интервалами между полуволнами каждой полярности [11] и длительностью, в 6 раз меньшую полупериода частоты выходного напряжения. Полуволны ЭДС последовательно переходят из катушки (зубца) в следующую катушку (зубец), при этом магнитный поток полюсов не прерывается, изменяется лишь его пространственное положение. Наведенная ЭДС была синусоидальной по форме и имела искажения, обусловленные в основном качеством намотки. Схема обмотки статора (использованного асинхронного двигателя) и чертеж магнитопровода в сборе представлены на рис 3 и 4.

Результаты численного моделирования электромагнитного поля в программе ANSYS представлены на рис. 5. Результаты моделирования показывают, что в общем виде картина концентрации силовых линий поля в отдельных зубцах с соблюдением последовательности перехода из зубца в зубец подтверждается и по результатам численного модели-

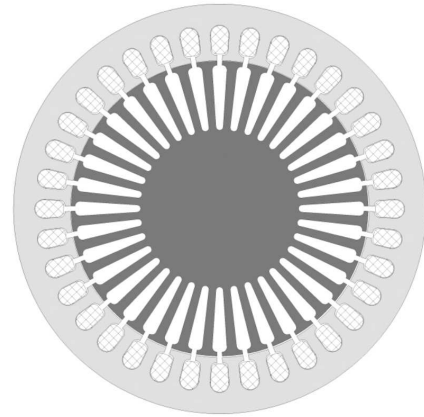


Рис. 4. Чертеж опытного магнитопровода трансформатора в сборе

рования. Однако распределение поля по окружности ротора магнитопровода показывает, что в каждый момент времени в большинстве зубцов индукция по модулю значительна. Для получения экспериментальной зависимости при разных конфигурациях был изготовлен ротор с уменьшенным числом зубцов. На рис. 5,б показано распределение силовых линий индукции по зубцам магнитопровода для  $Z=18$  зубцов. Очевидно, картина концентрации поля в отдельных зубцах сохраняется, как и в случае  $Z=36$ . С учетом особенности такой конфигурации магнитопровода концентрация магнитного поля в зубцах носит более выраженный характер.

На рис. 6 изображен график распределения индукции по зубцам ротора для случая  $Z=36$ . Очевидно, зависимость распределения индукции в магнитопроводе носит обратный характер относительно ЭДС, наведенной в зубцовых катушках (см. рис. 3). Таким образом, в большинстве зубцов ротора индукция близка к максимальным значениям и более того близка по численному значению. Число групп зубцов с максимальным значением равняется числу полюсов обмотки статора, в данном случае шести.

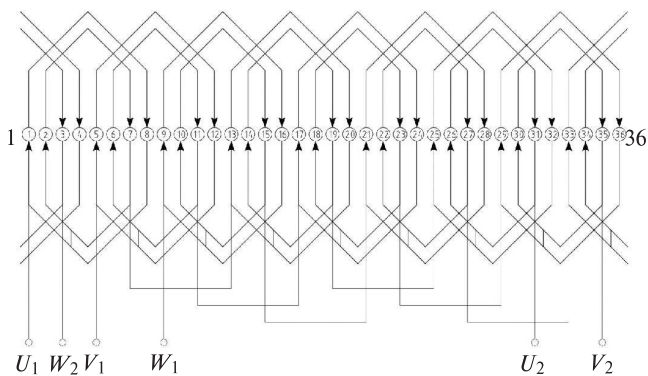


Рис. 3. Схема трехфазной обмотки статора I

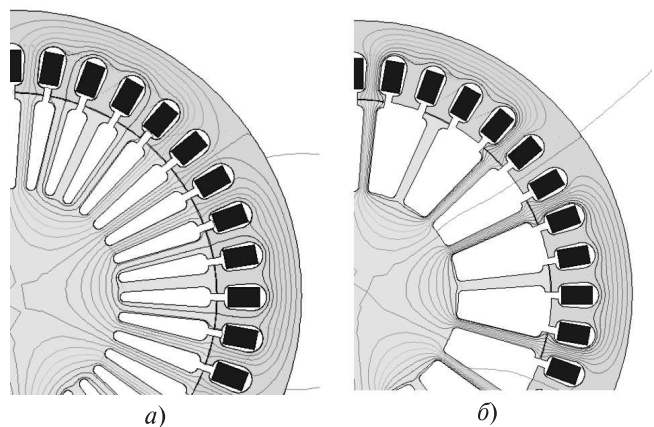


Рис. 5. Распределение силовых линий поля в зубцах магнитопровода при моделировании в ANSYS для ротора с  $Z = 36$  (а) и  $Z = 18$  (б)

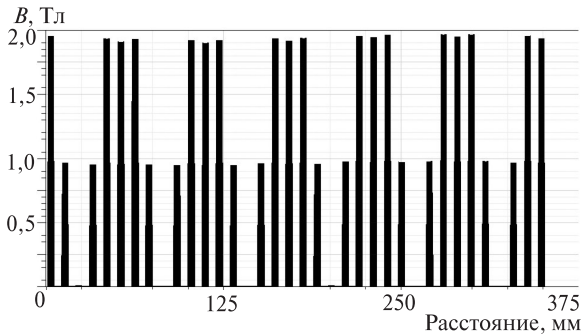


Рис. 6. Распределение модуля индукции по зубцам магнитопровода при моделировании в ANSYS для ротора с  $Z = 36$

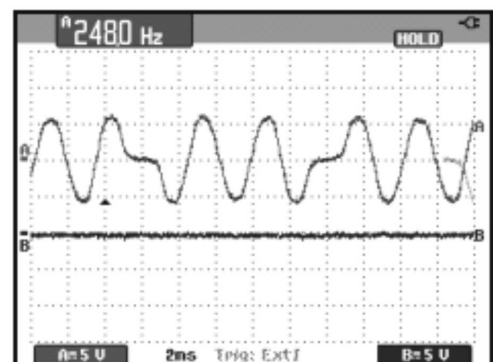
Представленную на рис. 6 картину можно трактовать следующим образом. Использование жестко зафиксированного ротора и равного числа зубцов  $Z=36$  при нулевом воздушном зазоре является крайним случаем применения концентрической обмотки и приводит к существенно нелинейному распределению поля. Магнитный полюс обмотки статора в определенные моменты времени почти равномерно распределяется между тремя зубцами, а в смежных с ними зубцах индукция находится в состоянии спада, причем в одном зубце каждой группы модуль индукции близок к нулю. Следует уточнить, что при моделировании в среде ANSYS использовался идеализированный материал, для которого была задана относительная проницаемость без указания кривой намагничивания и индукции насыщения. Соответственно, представленная на рис. 6 картина распределения индукции сохраняется при различных значениях токов первичной обмотки статора и в целом не определяется насыщением.

Были построены графики распределения модуля индукции по зубцам ( $Z=36$ ) в относительных единицах для различных моментов времени — от  $t=0$  до  $t=0,01$  с шагом 1,6667 мс. Следует пояснить, что число полюсов первичной обмотки  $2p=6$ , и при  $Z=36$  это дает шесть перемещающихся зон индукции. Процесс перемещения поля является также нелинейным, однако существуют дискретные моменты времени, соответствующие амплитудному значению ЭДС во вторичных катушках и нулевой индукции в соответствующем зубце. Длительность интервала перехода определяется полупериодом  $\pi$  питающей сети (10 мс), деленным на число полюсов. В таком случае за период питающей сети  $2\pi$  (20 мс) число интервалов удваивается, последовательность повторяется с противоположной полярностью. Из сказанного следует вывод, что картина наведенной в установленных на зубцах ротора катушках ЭДС имеет вид, обратный фактическому распределению индукции по окружности магнитопровода. Причиной является зависимость

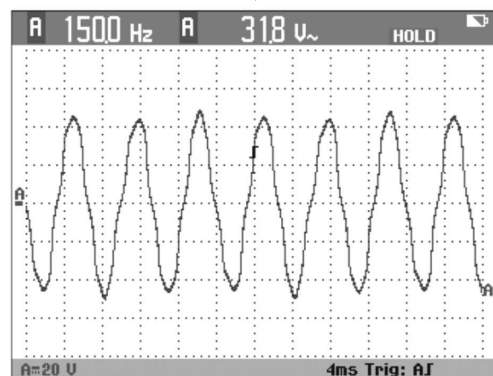
ЭДС от скорости нарастания индукции  $dB/dt$ . Поскольку в большей части зубцов индукция близка к максимальным значениям, то в соответствующих катушках ЭДС отсутствует, а в формировании выходного напряжения участвует только область с нулевой индукцией, которая перемещается по окружности магнитопровода в соответствии с вращением магнитных полюсов статора, обеспечивая необходимое для возникновения ЭДС изменение индукции.

Форма наводимой в катушках ЭДС имеет вид одиночных полувольт квазисинусоидальной формы, чередующейся полярности, а полувольты смежных катушек имеют длительность, меньшую частоты питающей сети, и образуют непрерывную последовательность. Степень синусоидальности определяется несколькими факторами, в первую очередь типом первичной обмотки и формой зубцов магнитопровода.

Авторами был проведен опыт суммирования полувольт для получения выходного напряжения повышенной частоты [12]. Для этого катушки соединялись последовательно-встречно, так что суммарная ЭДС имела чередующиеся полувольты разной полярности. Однако, поскольку для случая  $Z=36$  и при длительности полувольт, в 6 раз меньшей питающей сети,  $k=z/2p=6$  (коэффициент умножения частоты), получение непрерывной последовательности невозможно по причине совпадения по-



а)



б)

Рис. 7. Осциллограммы выходного напряжения: а —  $k=6$ ; б —  $k=3$

лярности чередования в последовательности полу- волн (рис. 7,а). Поэтому был выбран вариант с числом зубцов  $Z=18$  и коэффициентом умножения частоты  $k=3$  (рис. 7,б); схема соединения катушек – на рис. 8.

Очевидно, катушки разделяются на три группы

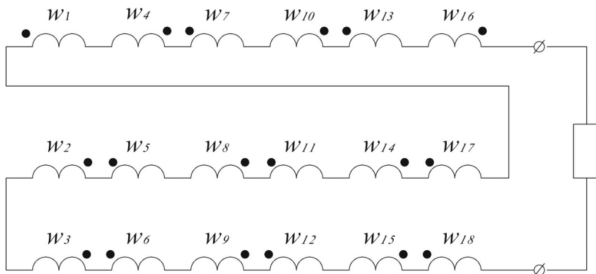


Рис. 8. Схема соединения катушек для трехкратного умножения

со встречным включением, соответственно номеру полувольты выходного напряжения. Каждая катушка используется дважды за период питающей сети: один раз для положительной полувольты, другой – для отрицательной. Поскольку полярность полувольт в смежных катушках совпадает, необходимо встречное включение каждой второй катушки, а также одной из групп катушек.

Приведенная схема позволяет реализовать любые нечетные коэффициенты умножения, однако использование последовательного соединения ка-

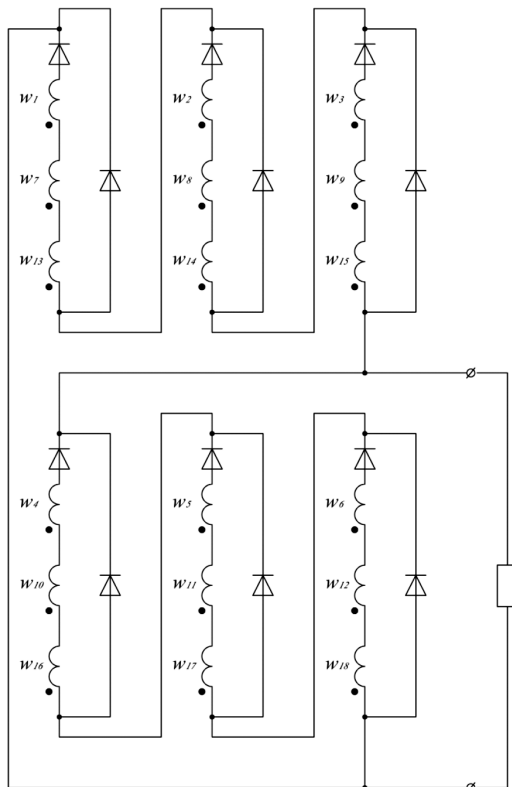


Рис. 9. Схема диодного коммутатора

тушек увеличивает не только активное, но и реактивное внутреннее сопротивление умножителя. Это не может ни сказаться на нагрузочной характеристике. Для случая опытного образца, включенного по изображенной на рис. 8 схеме, ток короткого замыкания составил 6 А, в то время как для любой включенной отдельно катушки 26 А. Происходит ограничение по току, и прямо пропорционально коэффициенту умножения снижается отдаваемая в нагрузку мощность.

Для решения этой проблемы авторами была разработана схема диодного коммутатора, позволяющего реализовать четные коэффициенты умножения по частоте и увеличить энергетическую эффективность. Принципиальная схема такого коммутатора, изображенная на рис. 9, работает следующим образом. В основу положено использование двух столбов катушек, отвечающих каждая за свою полярность полувольты выходного напряжения, при этом столбы включены параллельно, а полярность последовательности катушек неактивного в данный момент времени столба обеспечивает запускание его диодного коммутатора. Диоды, шунтирующие группу катушек, обеспечивают обтекание ее током других групп в момент отсутствия в ней ЭДС, а последовательный диод запирается при наличии в данной группе противоположной полярности и защищает от замыкания через шунтирующий диод. Таким образом, схема представляет собой замкнутую обмотку, в которой поочередно один столб работает на питание нагрузки, а диоды второго заперты встречной ЭДС. Для нормальной работы столбов диодного коммутатора требуется вполне определенная последовательность включения катушечных групп.

Описанная выше схема позволяет избежать последовательного соединения катушек, что улучшает нагрузочные характеристики и увеличивает ток короткого замыкания обмотки. Используемые в коммутаторе диоды являются неуправляемыми ключами, что позволяет отказаться от сложной системы управления, импортных комплектующих изделий, упростить и повысить надежность работы.

К недостаткам можно отнести снижение эффективности использования обмоточного провода и активных материалов. Однако это сопровождается ростом нагрузочного тока, что означает сложную зависимость между габаритами, коэффициентом умножения по частоте и мощностью трансформатора; данный вопрос требует дополнительного исследования.

Искажения синусоидальности, заметные на рис. 7,б, определяются недостатками конструкции опытного образца и, в частности, использованием неравного числа зубцов на внутренней части маг-

ниотпровода. Результаты испытаний в основном согласуются с компьютерным моделированием. Для анализа создаваемого первичной обмоткой магнитного поля возможно также использование матричных методов, например описанных в [13], но следует учитывать отсутствие воздушного зазора. Создаваемая таким способом картина будет иметь упрощенный характер.

**Выводы.** 1. Предложенный вариант умножителя частоты позволяет значительно повысить энергетическую эффективность преобразования частоты благодаря использованию пространственного распределения магнитного потока, что подтверждается опытными результатами.

К недостаткам можно отнести невозможность плавного регулирования выходной частоты, существование прямой зависимости от параметров питающей сети. Это несущественно, если допуски на возможные колебания параметров питающей и выходной сетей совпадают.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов. — М.: Альянс, 2013, 528 с.
2. Черевко А.И., Дмитриев Б.Ф., Рябенский В.М., Музыка М.М., Солуянов П.В. Судовые полупроводниковые преобразователи: Учебник. — СПб.: Изд-во СПб Государственного морского технического университета, 2011, 526 с.
3. Атрашкевич П.В., Балашевич В.М., Душкин Ю.В., Коптяев Е.Н., Кузнецов И.В. Трансформатор с вращающимся полем как структура с дополнительной степенью свободы. — Изв. вузов. Электромеханика, 2015, № 4, с. 17—21.
4. Гайтов Б.Х., Гайтова Т.Б., Кашин Я.М. Перспективные конструкции аксиальных многофазных трансформаторов и регуляторов с вращающимся магнитным полем. — Изв. вузов. Электромеханика, 2005, № 3, с. 44—47.
5. Кузьмин И.Ю., Черевко А.И., Лимонникова Е.В. Влияние конструктивных особенностей трансформатора с вращающимся магнитным полем на качество выходного напряжения автономного инвертора. — Электротехника, 2015, № 8, с. 11—16.
6. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины, т. 1. — М.: Изд-во Московского энергетического института, 2006, 654 с.
7. Загрядский В.И., Кобыляцкий Н.И., Недзельский А.П. Ферромагнитные умножители частоты с вращающимся магнитным полем. — Кишинев: Картя Молдаванэске, 1973, 102 с.
8. Сончик Л.И. Трансформаторные преобразователи частоты с витым магнитопроводом пространственной конструкции: Автореф. дис.... канд. техн. наук. — Минск: Изд. Белорусского политехнического института, 1984, 31 с.
9. Новожилов О.П. Умножители частоты на синтезированных нелинейных реактивных элементах. — Электричество, 1988, № 5, с. 68—73.
10. Атрашкевич П.В. Перспективный преобразователь сети 400 Гц. — Сб. докладов Молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее» — 2015. — СПб.: Изд-во ОАО «ЦЛБ МТ «Рубин», с. 7—13.
11. Атрашкевич П.В., Коптяев Е.Н. Преобразователь частоты для питания корабельных спецпотребителей. — Сб. докладов Молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее» — 2016. — СПб.: Изд-во ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», с. 23—31.
12. Патент РФ №2592864. Способ умножения частоты и устройство для его осуществления/П.В. Атрашкевич, М.Л. Ивлев, Е.Н. Коптяев, И.В. Кузнецов, А.И. Черевко. — БИ, 2016, № 21.
13. Сарваров А.С., Омельченко Е.Я. Магнитодвижущие силы трехфазных обмоток электрических машин. — Электротехника, 2013, № 1, с. 31—35.

[25.01.2017]

*А в т о р ы:* Атрашкевич Павел Васильевич окончил в 2006 г. Севмашвтуз — филиал Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (СПбГМТУ). И.о. начальника бюро испытаний АО «СПО «Арктика».

Балашевич Вячеслав Михайлович окончил в 1972 г. Новочеркасский политехнический институт (НПИ). Ведущий инженер НИИ Энергетики Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ).

Ивлев Марк Леонидович окончил в 2000 г. Севмашвтуз — филиал СПб ГМТУ. Защитил кандидатскую диссертацию «Управление режимами электрооборудования судоремонтного предприятия». Директор филиала ФГАОУ ВО САФУ в г. Северодвинске.

Коптяев Евгений Николаевич окончил в 2002 г. Севмашвтуз — филиал СПбГМТУ. Технический руководитель испытаний АО «СПО «Арктика».

*Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 8, pp. 29–35*

*DOI:10.24160/0013-5380-2017-8-29-35*

## On Designing Efficient Ferromagnetic Frequency Multipliers

**ATRASHKEVICH Pavel V.** (Public Company «Arktika», Severodvinsk, Russia) — Acting head of the test bureau

**BALASHEVICH Vyacheslav M.** (Scientific and Research Institute of Energy, South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia) — Leading engineer

**IVLEV Mark L.** (Branch of the North Arctic Federal University, Severodvinsk, Russia) — Director

**КОПТЯЕВ Evgenii N.** (Public Company «Arktika», Severodvinsk, Russia) — Technical Test Manager

*The well-known designs of ferromagnetic frequency converters use transformers with a pulsating field of higher harmonic components in the magnetic flux, due to which these devices have rather poor energy efficiency. The range of transformers with a spatial magnetic system, which are also used to construct frequency multipliers, includes, in particular, designs involving a transformer with rotating magnetic field,*

which is distinguished by an additional degree of freedom. The use of spatially moving magnetic flux in it differs from the classic designs of transformers with pulsating field. Such a change determines its dependence on the magnetic core parameters (number of teeth) and on the type of the primary three-phase winding. It is important to note that the field distribution pattern may be essentially nonlinear with such an arrangement. The use of rotating field also opens the possibility to control the magnetic flux at the magnetic core teeth; in this case, the group of tooth coils behaves as the secondary winding. As a result, the frequency multiplication effect can be produced through forming a continuous sequence of output voltage half-waves with elevated frequency obtained from individual half-waves of coils. The derived conclusions are confirmed both by experiment and by the computer simulation results.

**Key words:** ferromagnetic frequency multiplier, efficiency improvement, rotating-field transformer, magnetic flux, concentric winding, voltage quality

## REFERENCES

1. **Tikhomirov P.M.** *Raschet transformatorov: Uchebnoye pos. dlya vuzov* (Calculating of the transformers. Educational quid for higher educational institutions). Moscow, Publ. «Al'yans», 2013, 528 p.
2. **Cherevko A.I., Dmitriyev B.F., Ryaben'kii V.M., Muzyka M.M., Soluyanov P.V.** *Sudovye poluprovodnikovye preobrazovateli: Uchebnik* (Ship semiconductor converters. Textbook). St. Petersburg, St. Petersburg State Sea Technical University, 2011, 526 p.
3. **Atrashkevich P.V., Balashevich V.M., Dushkin Yu.V., Koptayev Ye. N., Kuznetsov I.V.** *Izv. vuzov. Elektromekhanika – in Russ. (News of Higher Education Institutions. Electromechanics)*, 2015, No. 4, pp. 17–21.
4. **Gaitov B.Kh., Gaitova T.B., Kashin Ya.M.** *Izv. vuzov. Elektromekhanika – in Russ. (News of Higher Education Institutions. Electromechanics)*, 2005, No. 3, pp. 44–47.
5. **Kuz'min I.Yu., Cherevko A.I., Limonnikova Ye.V.** *Elektrotehnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2015, No. 8, pp. 11–16.
6. **Ivanov-Smolenskii A.V.** *Elektricheskiye mashiny, t. 1* (Electrical machines, vol. 1). Moscow, Moscow Power Engineering Institute, 2006, 654 p.
7. **Zagryadskii V.I., Koblyatskii N.I., Nedzel'skii A.P.** *Ferromagnitnye umnozhiteli chastoty s vrashchayushchimsya magnitnym polem* (Ferromagnetic Frequency Multipliers with Rotating Magnetic Field). Kishinev, Kaptya Moldavyaneske, 1973, 102 c.
8. **Sonchik L.I.** *Transformatornye preobrazovateli chastoty s vitym magnetoprovodom prostranstvennoi konstruktsii Avtoref. dis.... kand. tekhn. nauk* (Transformer Frequency Converters with a Wound Spatial Magnetic Core. Diss. for the Degree of Cand. Sci. (Eng.)). Minsk, Belorusskii Politehnicheskii Institute, 1984, 31 p.
9. **Novozhilov O.P.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1988, No. 5, pp. 68–73.
10. **Atrashkevich P.V.** *Sb. dokladov Molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konf. «Vzglyad v budushcheye» – in Russ. (Collection of reports of Youth Scientific and Technical conf. «A glance at the future –2015»). St. Petersburg, JSC «StKB MT «Rubin», 2015, pp. 7–13.*
11. **Atrashkevich P.V., Koptayev E.N.** *Sbornik dokladov Molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konf. «Vzglyad v budushcheye» (Collection of reports of Youth Scientific and Technical conf. «A glance at the future – 2016»). St. Petersburg, JAC «StKB MT «Rubin», 2015, pp. 23–31.*
12. **Patent RF No. 2592864.** *Sposob umnozheniya chastoty i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* (Method of frequency multiplication and device for its implementation / P.V. Atrashkevich, M.L. Ivlev, E.N. Koptayev, I.V. Kuznetsov, A.I. Cherevko. Bulletin of inventions, 2016, No. 21.
13. **Sarvarov A.S., Omel'chenko E.Ya.** *Elektrotehnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2013, No. 1, pp. 31–35.

[25.01.2017]