

УДК 621.316.722.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Горбунов Роман Леонидович,**

аспирант кафедры промышленной и медицинской электроники  
Института неразрушающего контроля ТПУ, Россия, 634050, г. Томск,  
пр. Ленина, д. 30. E-mail: romangorbunov91@gmail.com

**Посконный Геннадий Ильич,**

канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной электроники  
Новоуральского технологического института НИЯУ МИФИ,  
Россия, г. Новоуральск, ул. Ленина, д. 85. E-mail: pgi\_ngti@mail.ru

*Актуальность работы обусловлена необходимостью создания силовых электронных преобразователей трёхфазного напряжения с высокими энергетическими показателями и улучшенной электромагнитной совместимостью с сетью и двигателем, имеющих простую и надёжную систему управления и относительно низкую стоимость.*

**Цель работы:** исследование предложенного трёхфазного широтно-импульсного преобразователя переменного напряжения, предназначенного для регулирования напряжения на статорных обмотках асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

**Методы исследования:** методы теории сигналов и систем, преобразовательной техники, схемотехнического и численного моделирования; экспериментальное исследование выполнялось на собранном макете преобразователя.

**Результаты:** получены регулировочная характеристика преобразователя, выражение для расчёта коэффициента гармоник в кривой выходного напряжения, приведены результаты схемотехнического моделирования и экспериментального исследования преобразователя, выполнено их сопоставление.

### **Ключевые слова:**

*Широтно-импульсный преобразователь переменного напряжения, регулирование напряжения, модуляция, ключ переменного тока, асинхронный двигатель.*

### **Введение**

Потребление электроэнергии в мире постоянно растёт и согласно прогнозам Международного энергетического агентства к 2035 г. увеличится на 47 % по сравнению с 2012 г. Значительную долю этого увеличения можно скомпенсировать повышением энергоэффективности промышленных предприятий, расходующих около 42 % всей генерируемой электроэнергии, из которых почти 70 % приходится на электродвигатели. Причём более чем в 90 % электроприводов либо нет возможности управлять энергопотреблением, либо это осуществляется неэффективно [1].

В связи с этим первостепенной задачей является повышение энергетических показателей и качества пусковых и тормозных режимов работы трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором – наиболее массового в промышленности. Решение этой задачи можно достичь за счёт регулирования напряжения на обмотках статора двигателя в зависимости от нагрузки на валу с целью снижения потребляемой активной/реактивной мощности, а также потерь в двигателе [2, 3]. Возможность перевода технологических механизмов в режим повторно-кратковременных включений приводит к экономии электроэнергии в пределах 30...70 % и снижению мощности исполнительных электродвигателей [4]. Кроме решения задач энергосбережения использование регуляторов напряжения позволяет расширить функциональные

возможности привода, повысить уровень автоматизации, а также обеспечить эффективную защиту двигателя и всей системы в целом.

Так как энергоэффективность, надёжность и стоимость системы зависит не только от двигателя, то важной задачей является повышение энергетических показателей регулятора напряжения при его максимальной простоте, надёжности и компактности, а также минимальной стоимости. Кроме этого, необходимо учитывать электромагнитную совместимость устройства с двигателем, с питающей сетью и с другими сетевыми потребителями. В противном случае достигаемое улучшение показателей двигателя может оказаться нецелесообразным.

### **Преобразователи переменного напряжения с широтно-импульсным регулированием на высокой частоте**

На сегодня имеется множество технических решений, позволяющих осуществлять регулирование напряжения на обмотках двигателя [5–9]. Одним из наиболее перспективных является использование непосредственных преобразователей переменного напряжения с широтно-импульсным регулированием на высокой частоте (далее ШИП переменного напряжения). В отличие от преобразователей напряжения с фазовым регулированием или широтно-импульсным регулированием на пониженной частоте, в основном используемых в

промышленности, ШИП переменного напряжения обладают высокими энергетическими показателями и лучшей электромагнитной совместимостью с питающей сетью и двигателем, а также позволяют снизить потери в переходных режимах работы [10]. Высокое качество выходного напряжения с отсутствием низкочастотных гармонических составляющих, близкий к единице коэффициент мощности, широкий диапазон и высокая плавность регулирования, отсутствие влияния изменения нагрузки на выходное напряжение, возможность двусторонней передачи энергии являются важными достоинствами устройств этого класса. Благодаря высокой частоте коммутации  $f_k$  (единицы–десятки килогерц) ШИП переменного напряжения практически безынерционны, что положительно влияет на качество переходных процессов, а также позволяет компенсировать искажения и колебания сетевого напряжения [11], повышая тем самым стабильность и надёжность работы системы. Также ШИП переменного напряжения способны выполнять квазичастотное управление двигателем по различным алгоритмам [10, 12].

При работе преобразователя на асинхронный электродвигатель основное требование предъявляется к выходному току [13], спектральный состав которого определяется формой выходного напряжения. Так как двигатель представляет собой индуктивную нагрузку, то увеличение частоты высших гармонических составляющих выходного напряжения приводит к уменьшению амплитуды гармоник тока двигателя. Но с энергетической точки зрения увеличение частоты коммутации нежелательно, так как это ведёт к возрастанию коммутационных потерь в преобразователе. Поэтому важным достоинством ШИП переменного напряжения является возможность широтно-импульсной модуляции (ШИМ) выходного напряжения по различным законам, в частности, с целью подавления высших гармоник с наименьшей частотой [14, 15] (которые в основном и влияют на качество тока двигателя), тем самым получая спектральный состав, аналогичный для случая двухкратного увеличения частоты коммутации, но при тех же коммутационных потерях в преобразователе.

ШИП переменного напряжения позволяют реализовать ещё один способ улучшения формы выходного тока – снижение амплитуд высших гармоник напряжения. Указанного результата можно достичь, применяя алгоритмы ШИМ с изменением частоты коммутации по случайному закону [16]. В связи с распределением искажений по разным частотам амплитуды высших гармоник существенно уменьшаются и эффективно фильтруются индуктивностями двигателя.

При синусоидальном фазном токе, что обычно имеет место в устройствах этого класса, спектр потребляемого из сети тока  $i_c$  аналогичен спектру фазного напряжения. Поэтому использование малогабаритных и относительно дешёвых сетевых фильтров позволяет получить практически синус-

оидальный входной ток преобразователя, то есть высокий коэффициент мощности. Применение указанных выше способов повышения качества выходного напряжения за счёт ШИМ также приводят к улучшению спектрального состава потребляемого из сети тока.

В ШИП переменного напряжения имеется возможность регулирования сдвига по фазе между сетевым током и напряжением при использовании специальных алгоритмов ШИМ [17]. Другими словами, удаётся регулировать потребляемую из сети реактивную мощность и, в частности, поддерживать полный коэффициент мощности системы равным единице при различных режимах работы двигателя.

Реализация ШИП переменного напряжения связана с использованием полностью управляемых двунаправленных ключей, выполняемых на основе однонаправленных приборов (транзисторов и диодов) по различным схемам [18]. С учётом различия в топологии схем и типе используемого ключа возможно построение большого количества преобразователей. Предложенные на сегодня схемы трёхфазных ШИП переменного напряжения имеют ряд недостатков, которые выражаются в искажении фазных напряжений двигателя [10], низком коэффициенте полезного действия [19, 20], большом количестве управляемых полупроводниковых приборов [10, 18], сложных и ненадёжных при реализации алгоритмах коммутации ключей [10, 21, 22], влиянии характера и величины нагрузки на формируемое напряжение [23] и др. Поэтому разработка схемы ШИП переменного напряжения с высоким качеством регулирования при минимальном количестве управляемых приборов, простой и надёжной системе управления без необходимости согласования её работы с токами и напряжениями силовой цепи до сих пор остаётся актуальной задачей.

#### Описание предложенного шип переменного напряжения

Схема исследуемого преобразователя изображена на рис. 1.

Основные допущения, принимаемые при анализе:

- входное трёхфазное напряжение и обмотки фаз двигателя симметричны;
- активные и индуктивные сопротивления обмоток фаз являются линейными;
- насыщение магнитопровода машины не учитывается;
- транзисторные ключи и диоды являются идеальными.

Анализ переходных процессов удобно проводить с использованием эквивалентной Т-образной схемы замещения фазы двигателя (рис. 3, б, в).

Силовая часть преобразователя состоит из трёхфазного диодного мостового выпрямителя VD1–VD6, включённого в рассечку нулевой точки обмоток статора, полностью управляемого ключа

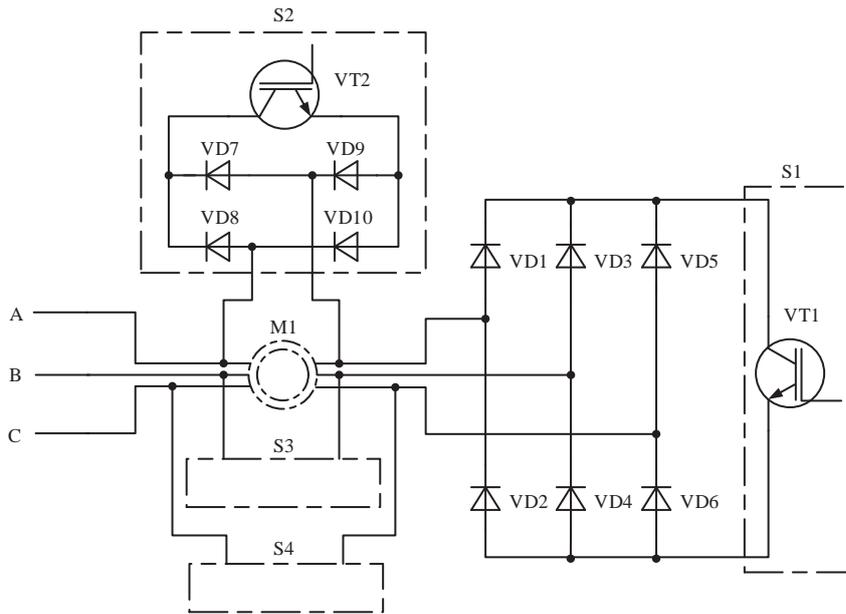


Рис. 1. Схема функциональная исследуемого ШИП переменного напряжения

S1, включённого в цепь выпрямленного тока выпрямителя, и трёх ключей переменного тока S2–S4, включённых параллельно обмоткам статора.

Схема работает в два такта.

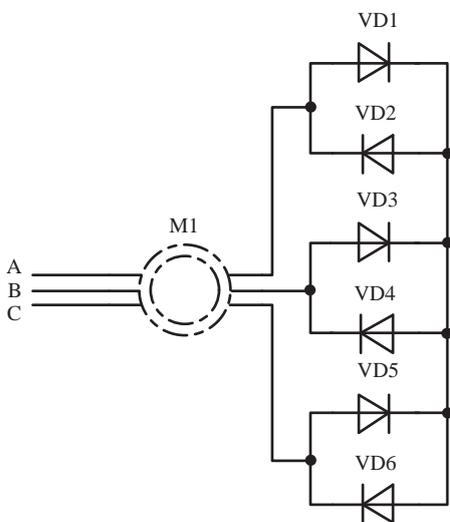


Рис. 2. Схема подключения двигателя к сети при замыкании ключа S1

На интервале времени  $t_p$  замкнут ключ S1 (напряжение управления  $u_{ge1} > 0$ ), ключи S2–S4 разомкнуты. Выпрямитель находится в режиме короткого замыкания, и двигатель оказывается подключённым к сети со встречно параллельно включёнными диодами в каждой фазе (рис. 2, 3, б). Структура диод–диод обладает двухсторонней проводимостью, поэтому одновременно в проводящем состоянии оказываются по одному диоду каждой фазы. Напряжение  $u_1$  на каждой фазе двигателя повторяет форму сетевого напряжения  $u_c$  (рис. 3, а).

Ток фазы двигателя  $i_1$ , равный сумме токов намагничивания  $i_m$  и ротора  $i_2'$ , нарастает (из-за индуктивностей  $L_1, L_m, L_2'$ ) (рис. 3, а, б).

На интервале времени  $T_k - t_p$  ключ S1 разомкнут, а ключи S2–S4 замкнуты (рис. 3, в), в результате чего токи  $i_m, i_2'$  и  $i_1$  продолжают протекать в фазных обмотках двигателя, уменьшаясь по величине (рис. 3, а).

Таким образом, изменяя относительное время  $\chi_k = t_p / T_k$  подключения двигателя к сети (коэффициент заполнения), на выходе преобразователя (на нагрузке) можно формировать переменное напряжение регулируемой величины.

В исследуемой схеме замыканием каждой обмотки отдельным двунаправленным ключом S2–S4, на время разомкнутого состояния ключа S1, достигается непрерывность протекания тока через статорные обмотки двигателя. Тем самым запасённая в двигателе за время подключения к сети энергия циркулирует в обмотках, поддерживая его работу, а не рассеивается в виде тепла в демпфирующих цепях, как например в [20]. При этом практически исключаются перенапряжения на ключе S1 за счёт обеспечения неразрывности протекания тока в нагрузке, а потери энергии в преобразователе складываются лишь из потерь проводимости ключей и динамических потерь в ключах при коммутациях.

Временные диаграммы токов и напряжений преобразователя и элементов силовой схемы, при синусоидальном токе двигателя, изображены на рис. 4. Для наглядности число импульсов на периоде  $M = f_k / f_c = 18$ , коэффициент заполнения  $\chi_k = 0,6$ .

В случае постоянной длительности импульсов на всем периоде сетевого напряжения в спектре имеются гармонические составляющие с частотами  $f_{(n)} = (n-1)f_k \pm f_c, n \in Z$ , (рис. 5) и амплитудами (рис. 6)

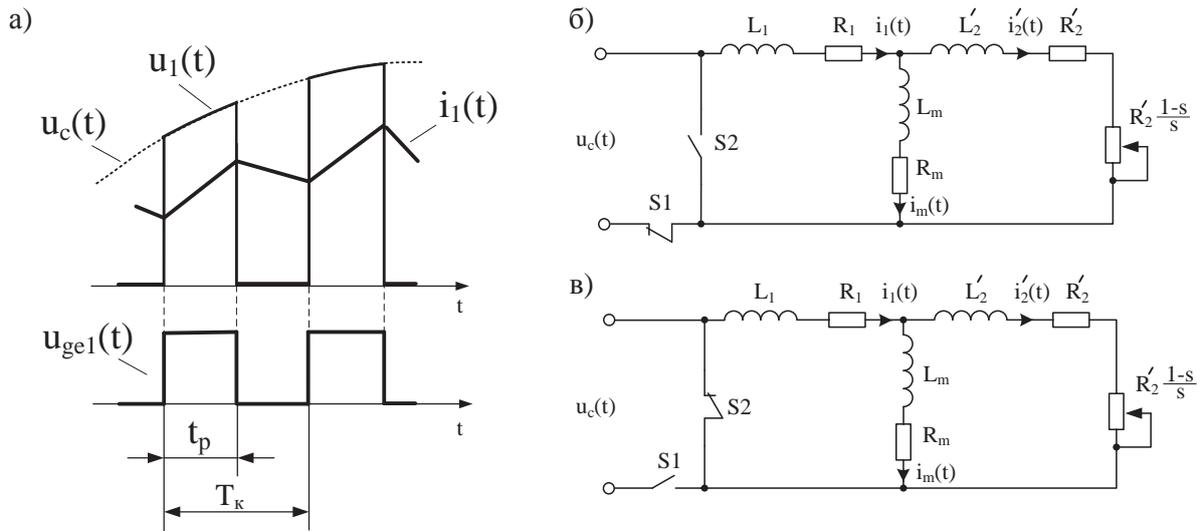


Рис. 3. Переходные процессы в преобразователе (а) и эквивалентные схемы замещения фаз (б, в) на интервалах работы преобразователя

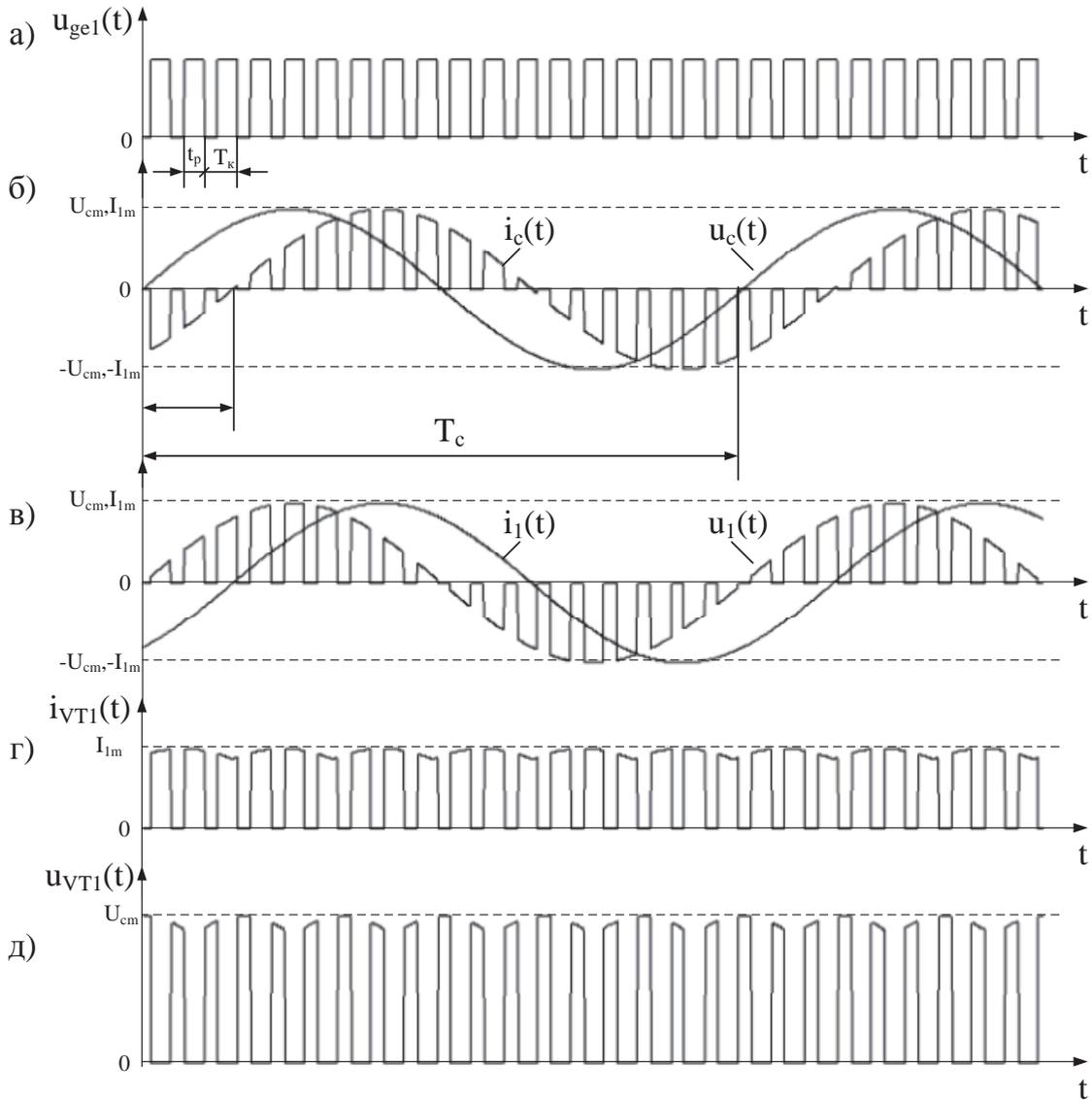


Рис. 4. Временные диаграммы токов и напряжений преобразователя

$$U_{1m(n)} = U_{cm} \chi_k \frac{\sin((n-1)\pi\chi_k)}{(n-1)\pi\chi_k},$$

$$K_U = \frac{U_{1m(1)}}{U_{cm}} = \chi_k,$$

где  $U_{cm}$  – амплитуда сетевого напряжения.

Амплитуда первой гармоники напряжения ( $n=1$ )

$$U_{1m(1)} = U_{cm} \chi_k,$$

то есть её зависимость от коэффициента заполнения линейна, что упрощает реализацию системы управления.

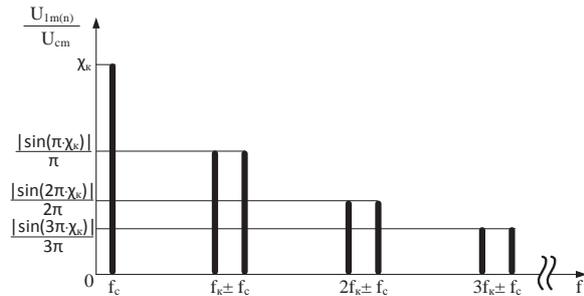


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) выходного напряжения

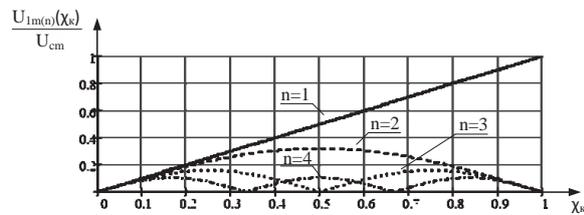


Рис. 6. Зависимость относительных амплитуд первых 7-ми ненулевых гармоник выходного напряжения от коэффициента заполнения

Коэффициент гармоник выходного напряжения зависит от коэффициента заполнения

$$K_{Gu}(\chi_k) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (U_{(n)})^2}}{U_{(1)}} \cdot 100 = \sqrt{\frac{1}{\chi_k} - 1} \cdot 100.$$

Очевидно, что при такой форме напряжения с увеличением коэффициента заполнения коэффициент гармоник уменьшается (рис. 7).

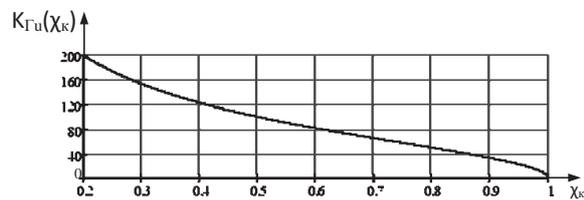


Рис. 7. Зависимость коэффициента гармоник выходного напряжения от коэффициента заполнения

Так как электродвигатель является относительно инерционным объектом управления, то при частотах коммутации единицы–десятки килогерц (что характерно для рассматриваемого устройства) ШИП переменного напряжения можно рассматривать как безынерционное звено системы управления электропривода с коэффициентом передачи (по первой гармонике)

то есть регулируемым в диапазоне 0...100 %.

По сравнению с другими известными устройствами предложенный преобразователь (рис. 1) обладает рядом достоинств:

- 1) при регулировании в цепи выпрямленного тока статора удаётся реализовать импульсный способ регулирования напряжений в статорной цепи двигателя с минимальным количеством управляемых приборов в силовой схеме [7, 12];
- 2) использование диодных мостовых ключей переменного тока для замыкания обмоток статора двигателя на время паузы позволяет уменьшить количество управляемых вентилях в схеме и исключает необходимость контроля полярности напряжений и направления токов.

Кроме того, выбор диодных мостовых ключей переменного тока обусловлен ещё несколькими причинами.

Применение двухтранзисторных ключей переменного тока в широтно-импульсном преобразователе переменного напряжения позволяет уменьшить общие потери за счёт уменьшения числа элементов. Однако при управлении требуется синхронизация переключения транзисторов с сетевым напряжением [21] или токами и напряжениями нагрузки [10, 22], что в целом усложняет систему управления. Но более существенным является то, что ошибка в определении полярности тока/напряжения приводит к нарушению работы устройства или возникновению коротких замыканий в силовой схеме [23]. Эта проблема особенно актуальна для преобразователей, используемых при высоком уровне внешних помех или на объектах с маломощной сетью, где зачастую возникают колебания и скачки напряжений [4, 17]. Использование же модифицированных алгоритмов переключения транзисторов без токовых пауз, которые могут быть реализованы без синхронизации, приводит к влиянию изменения нагрузки на форму выходного напряжения [23].

Несмотря на необходимость ввода паузы между переключениями, характеристики современных транзисторов позволяют её уменьшить до незначительной величины, благодаря чему использование в предлагаемой схеме одной маломощной и малогабаритной демпфирующей цепи исключает перенапряжения на ключевых элементах при коммутациях, в то время как влияние на энергетические и массогабаритные показатели устройства практически отсутствует.

#### Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование

Моделирование устройства было выполнено в пакете Matlab Simulink. В составленной модели (рис. 8) сигналы управления ключами формируются генератором прямоугольных импульсов постоянной частоты и поступают непосредственно на

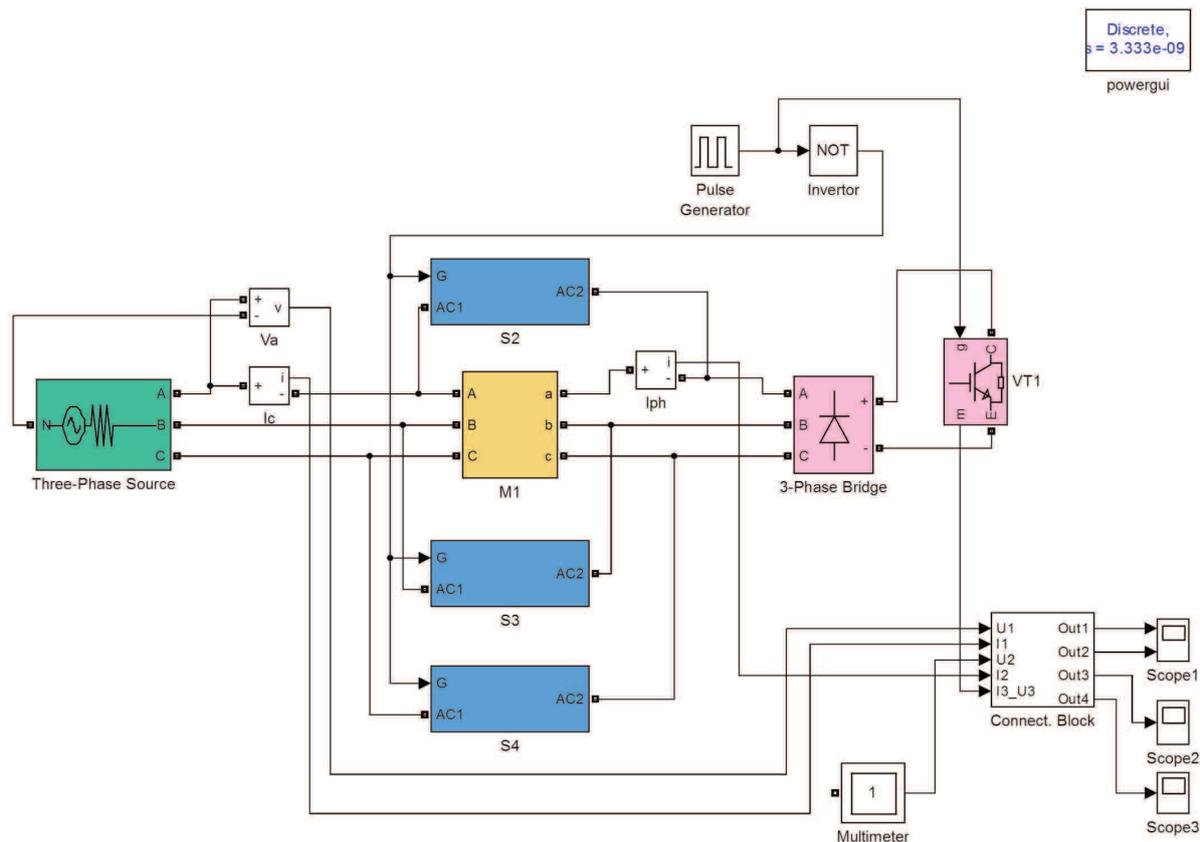


Рис. 8. Исследуемая схема в Simulink

вход управления транзистором VT1. Инвертированный сигнал подаётся на входы управления ключей S2–S4, представленных в модели блоками диодно-транзисторных ключей. Параметры блока двигателя (M1) были установлены согласно экспериментально измеренным для трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором марки АИР90L4: мощность 2,2 кВт, линейное напряжение 380 В, номинальный фазный ток 5,2 А, частота вращения при номинальной нагрузке 1420 об/мин.

Экспериментальное исследование преобразователя выполнялось на собранном макете на IGBT-транзисторах. Для реализации ШИР была разработана система управления (с независимым управлением каждым ключом от индивидуального драйвера) и соответствующее программное обеспечение [24]. Блок управления построен на 8-разрядном микроконтроллере семейства AVR – ATmega32.

Результаты моделирования и экспериментов при работе преобразователя (без фильтров) на двигатель АИР90L4 с номинальной нагрузкой на валу приведены на рис. 9–11. Напряжение сети  $U_c=220$  В,  $f_c=50$  Гц, частота коммутации транзисторов преобразователя  $f_k=3$  кГц, коэффициент заполнения  $\chi_k=0,76$ . По осям абсцисс диаграмм, полученных при моделировании, указано время в се-

кундах, по осям ординат – напряжение в вольтах и ток в амперах. Для осциллограмм напряжения масштаб 90 В/дел., для осциллограмм тока масштаб 3,5 А/дел.

Для подавления перенапряжений, возникающих на ключах схемы при паузах между коммутациями, использовалась демпфирующая RCD-цепь, установленная на транзисторе VT1. При этом потери мощности в демпфирующей цепи не превышали 23-х ватт.

На рис. 12–14 приведены спектры выходного напряжения и тока, спектр сетевого тока. Очевидно, что ток двигателя непрерывный и практически синусоидальный. Напряжение на фазе двигателя имеет характерную для широтно-импульсного регулирования форму, огибающая повторяет кривую сетевого напряжения. Напряжение на ключах S2, S3, S4 полностью повторяет напряжение на соответствующих фазах двигателя, так как они включены параллельно фазам. Сетевой ток имеет аналогичные напряжению на фазе двигателя форму и спектр.

В таблице приведены значения коэффициентов гармоник выходного напряжения, входного и выходного тока преобразователя, изображённых на рис. 9–11. Расчёт выполнялся с учётом гармоник до  $k=1000$ . Результаты показывают, что коэффициент искажения выходного тока для этой скваж-

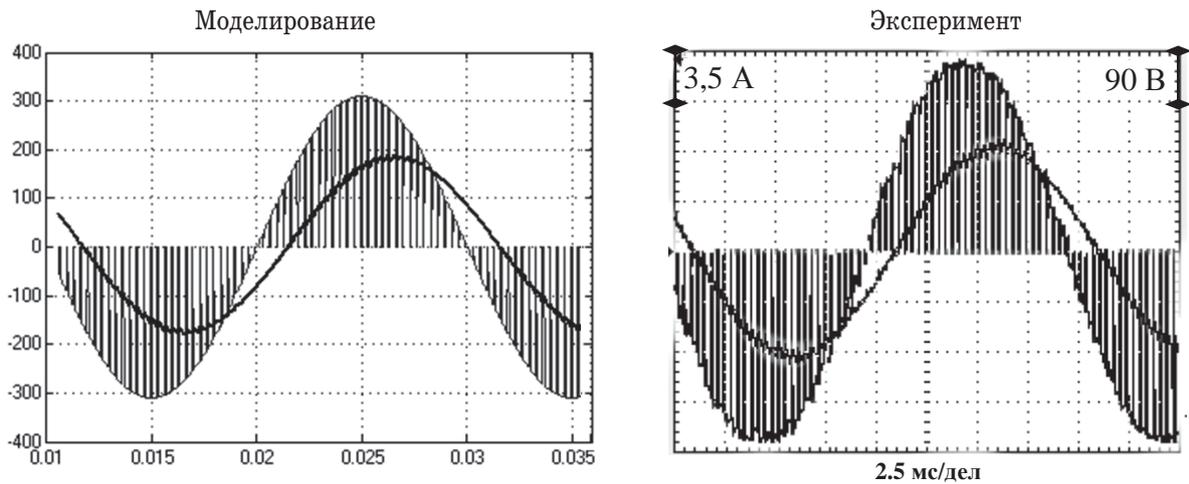


Рис. 9. Диаграммы напряжения и тока на выходе преобразователя

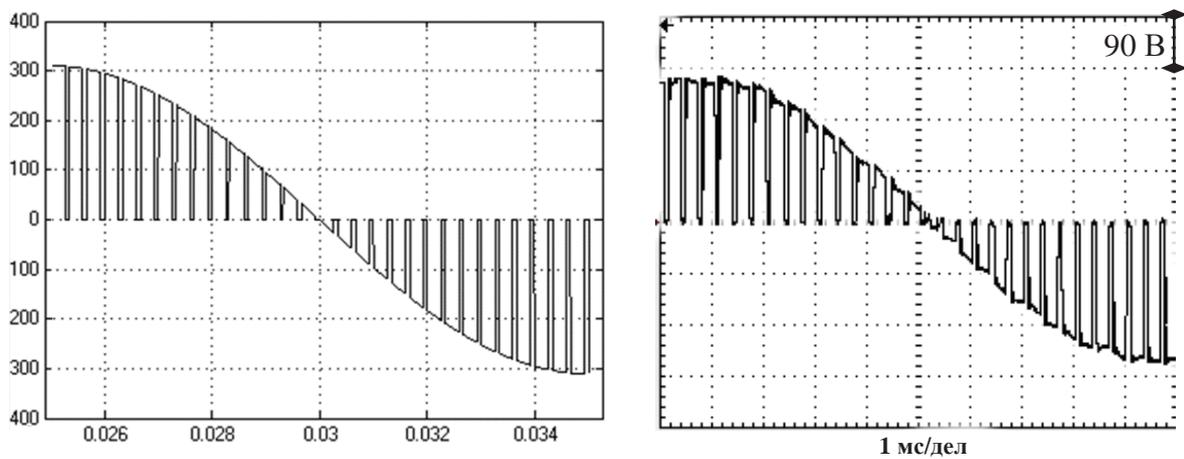


Рис. 10. Диаграммы напряжения на выходе преобразователя

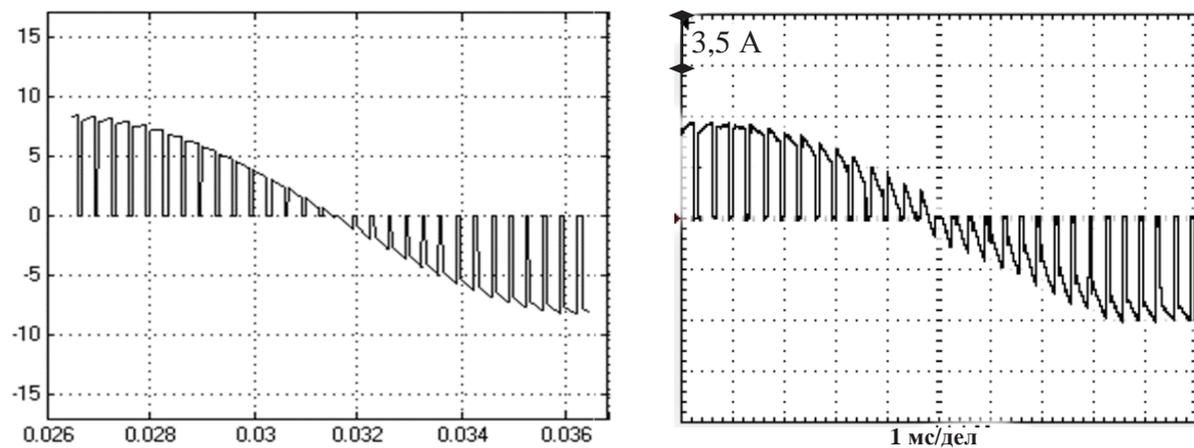


Рис. 11. Диаграммы потребляемого из сети тока

Таблица. Значения коэффициента гармоник

	Коэффициент гармоник, %		
	$u_1$	$i_1$	$i_c$
Моделирование	54,8	2,2	55,6
Эксперимент	58,3	6,5	59,9

ности составляет единицы процентов. Степень искажения входного тока и выходного напряжения практически одинакова.

#### Выводы

Полученные экспериментальным путём диаграммы токов и напряжений соответствуют вре-

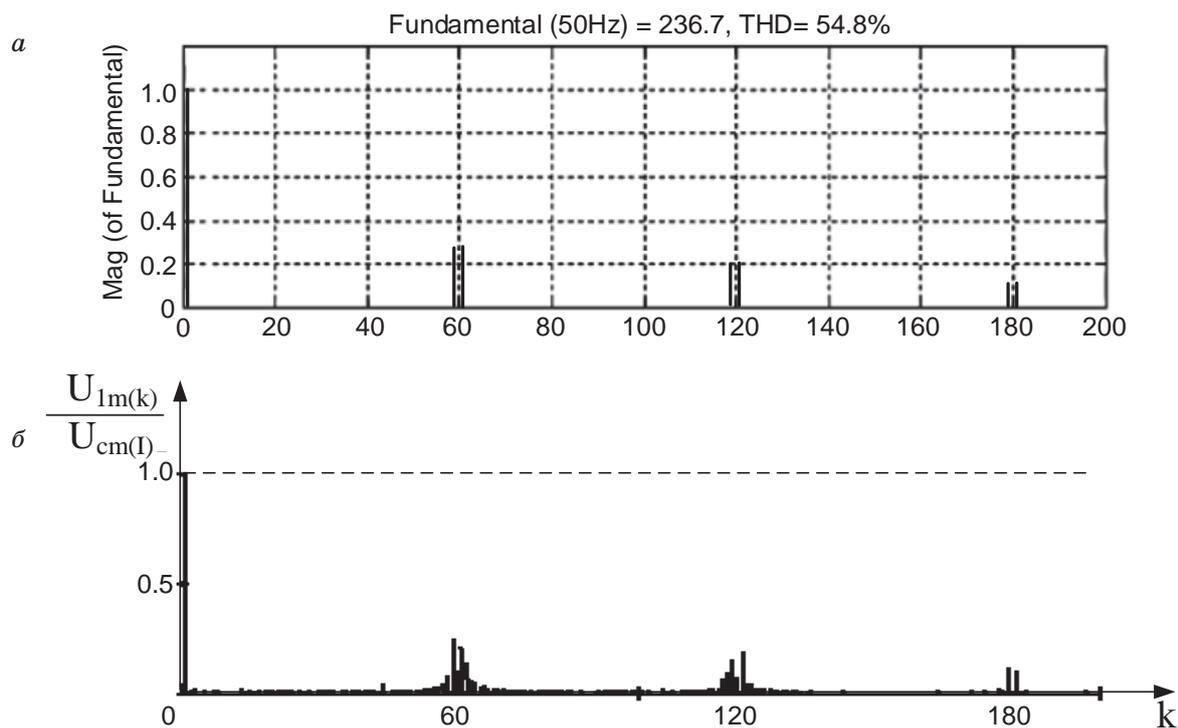


Рис. 12. АЧХ выходного напряжения преобразователя: а) моделирование, б) эксперимент

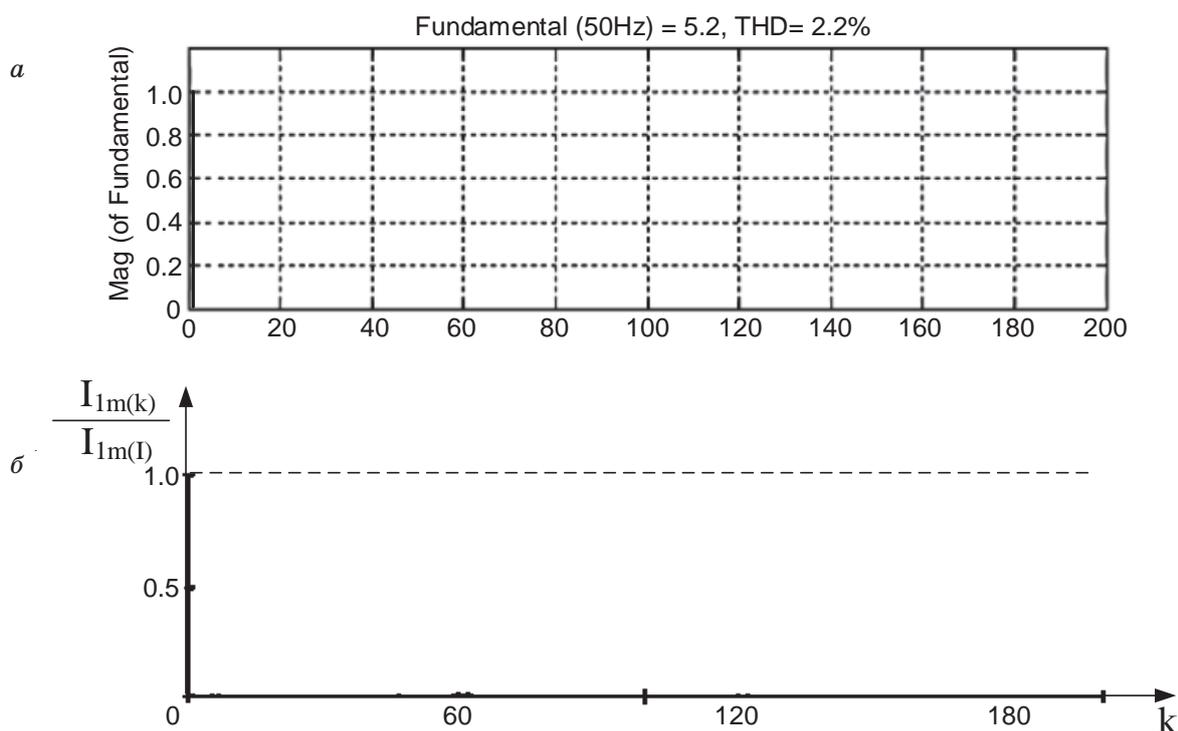


Рис. 13. АЧХ выходного тока преобразователя: а) моделирование, б) эксперимент

менным диаграммам, полученным при анализе работы преобразователя и при компьютерном моделировании. Эксперименты показали, что преобразователь выполняет заложенные функции с требуемыми показателями, а также подтвердили право-

мерность принятых при анализе допущений и правильность составленной математической модели.

Несмотря на то, что потребляемый из сети ток не является синусоидальным, высокочастотные составляющие могут быть легко отфильтрованы с

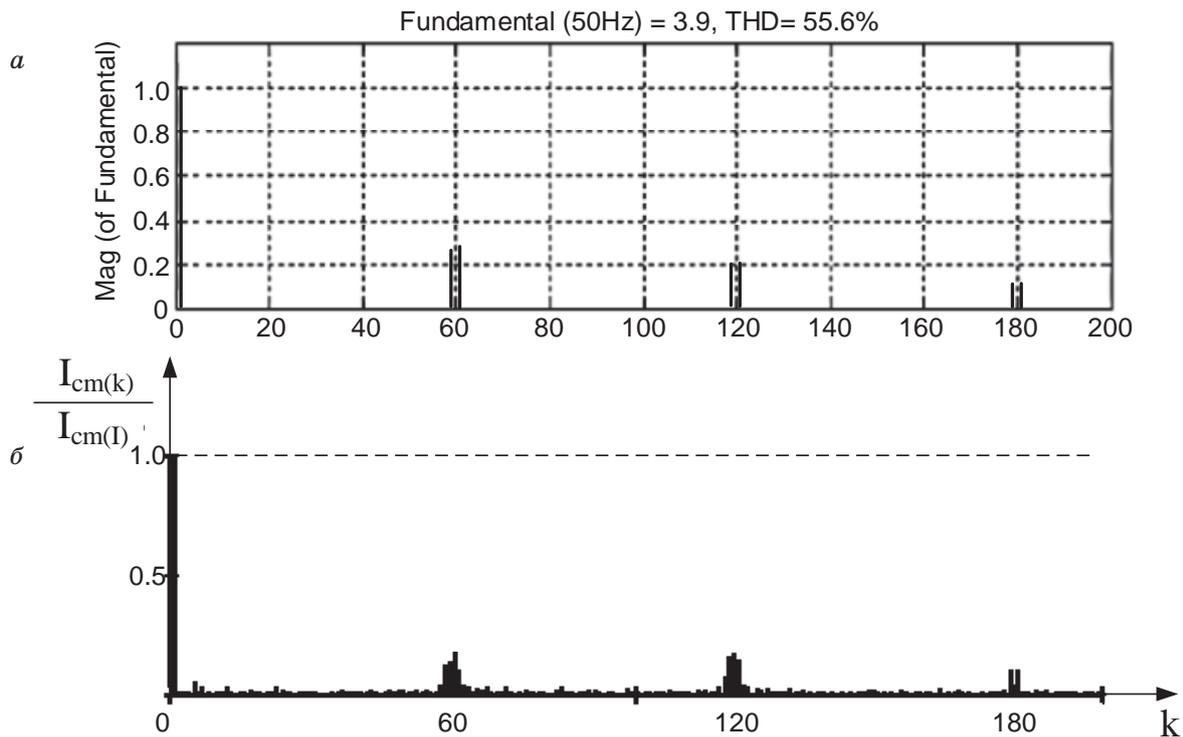


Рис. 14. АЧХ потребляемого из сети тока: а) моделирование, б) эксперимент

помощью малогабаритных и относительно простых сетевых фильтров, что позволяет повысить коэффициент мощности устройства и улучшить электромагнитную совместимость системы «широотно-импульсный преобразователь – асинхронный двигатель» с питающей сетью.

Таким образом, предложенный ШИП переменного напряжения может использоваться

для регулирования напряжения на асинхронном двигателе, обеспечивая высокую энергоэффективность двигателя и всей системы в целом. Устройство обладает высокими энергетическими показателями, хорошей электромагнитной совместимостью с сетью и двигателем, не требуя при этом сложной и дорогой системы управления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ABB Drives and Motors for Improving Energy Efficiency. – ABB brochure, 2012. – 16 p.
- Радина Е.В. Алгоритмы регулирования напряжения асинхронных двигателей // Электротехника. – 1983. – № 5. – С. 32–34.
- Ильинский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства. Кн. 2. Энергосбережение в электроприводе. – М.: Высш. шк., 1989. – 127 с.
- Цитович Л.И., Шкаликов С.И., Дудкин М.М. Тиристорный преобразователь с интегрирующим фазосдвигающим устройством для мягкого пуска асинхронных электродвигателей // Проблемы энергетики. – 2005. – № 7–8. – С. 57–65.
- Bose V.K. Modern Power Electronics and AC Drives. – Prentice Hall PTR, 2002. – 711 p.
- Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – Ч. 2. – 197 с.
- Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
- Зиновьев Г.С., Удовиченко А.В. Энергосберегающие устройства плавного пуска двигателей переменного напряжения // Электротехника. – 2009. – № 12. – С. 52–55.
- Устройство для плавного пуска асинхронного двигателя: пат. RU 2294592 C1 Россия, МПК H02P1/16; заявл. 02.12.2005; опубл. 27.02.2007. – 3 с.
- Vasilyev D., Firago B. Soft starter with pulse voltage regulation and quasi-frequency control of induction motor // Institute of Electrical Machines, Drives and Measurements Wroclaw University of Technology: Scientific Papers № 63, Studies and Research № 29. – Wroclaw, 2009. – P. 294–302.
- Control for PWM AC Chopper Feeding Nonlinear Loads / L. Rahmani, F. Krim, M. Khanniche, A. Bouafia // IJE. – 2004. – V. 91. – Iss. 3. – P. 149–163.
- A Novel Technique for AC Supply Voltage and Frequency Modulation of Induction Motor Drives / G. El-Saady, A.M. Sharaf, A. Makky, M.K. El-Sherbiny, G. Mohamed // Industry Applications Conference. – Orlando, FL, 1995. – V. 1. – P. 530–537.
- Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе / А.Я. Бернштейн, Ю.М. Гусяцкий, А.В. Кудрявцев, П.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.
- Sadr S.M., Mashhadi H.R. Application of PSO for Selective Harmonic Elimination in a PWM AC/AC Voltage Regulator // 2<sup>nd</sup> IC-SKE. – Mashhad, 2012. – P. 62–65.
- Voltage Quality Enhancement of PWM AC Voltage Controller Using Particle Swarm Optimization / A. Kouzou, S. Saadi, M. Mahmoudi, M. Boucherit // International Conference on

- Power Engineering, Energy and Electrical Drives. – Lisbon, 2009. – P. 309–314.
16. Random Pulse Width Modulation Techniques for Converter-Fed Drive Systems – A Review / A.M. Trzynadlowski, F. Blandjerg, J.K. Pedersen, R.L. Kirlin, S. Legowski // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1994. – V. 30. – Iss. 5. – P. 1166–1175.
  17. Georgakas K., Safacas A. Modified Sinusoidal Pulse-Width Modulation Operation Technique of an AC-AC Single-Phase Converter to Optimise the Power Factor // IET Power Electronics. – 2010. – V. 3. – Iss. 3. – P. 454–464.
  18. Arvindan A.N., Prashanthi S. Investigation for Power Quality in a PWM AC Controller Feeding a Three-Phase Three-Wire WYE Connected Load // IPEC-2010. – Singapore, 2010. – P. 648–653.
  19. Hajimoradi M.R., Yazdian A., Mokhtari H. Double Stage Switch Mode AC Voltage Regulator // 2<sup>nd</sup> Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference. – Tehra, 2011. – P. 187–192.
  20. Давыдкин М.Н. Разработка системы векторно-импульсного управления пуском синхронного электродвигателя: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2010. – 16 с.
  21. Research on AC Chopper Power Module with Module Parallel Control / Z. Jie, Z. Yunping, Y. Weifu, L. Lin // APEC. – Austin, TX, 2008. – P. 1324–1327.
  22. Ahmed N.A., Amei K., Sakui M. A New Configuration of Single-Phase Symmetrical PWM AC Chopper Voltage Controller // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1999. – V. 46. – Iss. 5. – P. 942–952.
  23. Short Through Avoidance in AC-AC Choppers / M.M. Khan, Y. Han, M.A. Rizvi, Q.R. Butt // Electric Power Components and Systems. – 2013. – V. 41. – Iss. 11. – P. 1023–1040.
  24. Горбунов Р.Л., Посконный Г.И. Микропроцессорная система управления с широтно-импульсным регулированием фазных напряжений асинхронного электропривода // Автоматизация и прогрессивные технологии в атомной отрасли: Труды VI Междунар. научно-техн. конф. – Новоуральск, 2012. – С. 78–79.

Поступила 04.12.2013 г.

UDC 621.316.722.3

## INVESTIGATION OF THREE-PHASE AC VOLTAGE CONVERTER, USED FOR INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF INDUCTION MOTORS

Roman L. Gorbunov,

Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30.

E-mail: romangorbunov91@gmail.com

Gennadiy I. Poskonny,

Cand. Sc., Novouralsk Technological Institute,

Russia, Novouralsk, Lenin street, 85. E-mail: pgi\_ngti@mail.ru

*The urgency of the research is caused by the need to introduce three-phase power electronic converters, which have high efficiency, improved electromagnetic compatibility with supply network and motor, simple and reliable control system and relatively low price.*

**The main aim of the study:** to investigate the proposed three-phase AC voltage converter, intended to control the voltage applied to stator windings of a squirrel cage induction motor.

**The methods used in the study:** methods of the Theory of Signals and Systems, Power Electronics, numerical circuit modeling; experimental research was conducted by use of the implemented prototype of the proposed AC voltage converter.

**The results:** The authors describe output voltage control properties and output voltage THD expression, compare the results of computer modeling and experimental research of the proposed converter.

### Key words:

AC voltage converter, voltage regulation, modulation, AC switch, induction motor.

### REFERENCES

1. ABB Drives and Motors for Improving Energy Efficiency. *ABB brochure*, 2012. 16 p.
2. Radina E.V. Algoritmy regulirovaniya napryazheniya asinkhronnykh dvigateley [Algorithms of induction motors voltage regulation]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 1983, vol. 5, pp. 32–34.
3. Ilinskiy N.F., Rozhankovskiy Y.V., Gornov A.O. *Energoberegayushchaya tekhnologiya elektrosnabzheniya narodnogo khozyaystva. Energoberezhenie v elektroprivode* [Energy saving technology of national economy energy supply. Energy saving in electric drive]. Moscow, Vysshaya shkola, 1989. B. 2, 127 p.
4. Tsitovich L.I., Shkalikov S.I., Dudkin M.M. Tiristornyye preobrazovateli s integriruyushchimi fazosdvigayushchimi ustroystvom dlya myagkogo puskas asinkhronnykh elektrodvigateley [A thyristorised converter with integrating phase-shift device for soft start of induction motors]. *Problemy energetiki – Problems of Energetics*, 2005, no. 7–8, pp. 57–65.
5. Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR, 2002. 711 p.
6. Zinovev G.S. *Osnovy silovoy elektroniki* [Fundamentals of power electronics]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2000. P. 2, 197 p.
7. Braslavskiy I.Ya. *Asinkhronnyy poluprovodnikovyy elektroprivod s parametricheskim upravleniem* [An induction motor electric drive with parametric control]. Moscow, Energoatomizdat, 1988. 224 p.
8. Zinovev G.S., Udovichenko A.V. Energoberegayushchie ustroystva plavnogo puskas dvigateley peremennogo napryazheniya [Energy saving soft starters for AC motors]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2009, no. 12, pp. 52–55.

9. Sidorov D.S., Sidorov S.N. *Ustroystvo dlya pлавного pushka asinhronnogo dvigatelya* [An induction motor soft starter]. Patent RF, no. 2294592 C1, 2005.
10. Vasilyev D., Firago B. *Soft starter with pulse voltage regulation and quasi-frequency control of induction motor*. Institute of Electrical Machines, Drives and Measurements Wrocław University of Technology: Scientific Papers № 63, Studies and Research № 29. Wrocław, 2009. pp. 294–302.
11. Rahmani L., Krim F., Khanniche M., Bouafia A. Control for PWM AC Chopper Feeding Nonlinear Loads. *IJE*, 2004, vol. 91, Iss. 3, pp. 149–163.
12. El-Saady G., Sharaf A.M., Makky A., El-Sherbiny M.K., Mohamed G. A Novel Technique for AC Supply Voltage and Frequency Modulation of Induction Motor Drives. *Industry Applications Conference*. Orlando, FL, 1995. Vol. 1, pp. 530–537.
13. Bernshteyn A.Ya., Gusyatskiy Yu.M., Kudryavtsev A.V., Sarbatov R.S. *Tiristornye preobrazovateli chastoty v elektroprivode* [Thyristorised frequency converters in an electric drive]. Moscow, Energiya, 1980. 328 p.
14. Sadr S.M., Mashhadi H.R. Application of PSO for Selective Harmonic Elimination in a PWM AC/AC Voltage Regulator. *2<sup>nd</sup> IC-CKE*. Mashhad, 2012. pp. 62–65.
15. Kouzou A., Saadi S., Mahmoudi M. Boucherit M. Voltage Quality Enhancement of PWM AC Voltage Controller Using Particle Swarm Optimization. *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. Lisbon, 2009. pp. 309–314.
16. Trzynadlowski A.M., Blandjerg F., Pedersen J.K., Kirilin R.L., Legowski S. Random Pulse Width Modulation Techniques for Converter-Fed Drive Systems – A Review. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1994, vol. 30, Iss. 5, pp. 1166–1175.
17. Georgakas K., Safacas A. Modified Sinusoidal Pulse-Width Modulation Operation Technique of an AC-AC Single-Phase Converter to Optimise the Power Factor. *IET Power Electronics*, 2010, vol. 3, Iss. 3, pp. 454–464.
18. Arvindan A.N., Prashanthi S. Investigation for Power Quality in a PWM AC Controller Feeding a Three-Phase Three-Wire WYE Connected Load. *IPEC-2010*. Singapore, 2010. pp. 648–653.
19. Hajmoradi M.R., Yazdian A., Mokhtari H. Double Stage Switch Mode AC Voltage Regulator. *2<sup>nd</sup> Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference*. Tehra, 2011. pp. 187–192.
20. Davydkin M.N. *Razrabotka sistemy vektorno-impulsnogo upravleniya pushkom sinkhronnogo elektrodvigatelya*. Kand. Diss. [Design of the vector-pulse start control system for an induction motor. Cand. Diss.]. Magnitogorsk, 2010. 16 p.
21. Jie Z., Yunping Z., Weifu Y., Lin L. Research on AC Chopper Power Module with Module Parallel Control. *APEC*. Austin, TX, 2008. pp. 1324–1327.
22. Ahmed N.A., Amei K., Sakui M. A New Configuration of Single-Phase Symmetrical PWM AC Chopper Voltage Controller. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1999, vol. 46, Iss. 5, pp. 942–952.
23. Khan M.M., Han Y., Rizvi M.A., Butt Q.R. Short Through Avoidance in AC-AC Choppers. *Electric Power Components and Systems*, 2013, vol. 41, Iss. 11, pp. 1023–1040.
24. Gorbunov R.L., Poskonny G.I. Mikroprotseornaya sistema upravleniya s shirotno-impulsnym regulirovaniem faznykh napryazheniy asinhronnogo elektroprivoda [Microprocessor based control system of pulse-width control of induction drive phase voltages]. *Avtomatizatsiya i progressivnye tekhnologii v atomnoy otrasli: Trudy VI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proc. 6<sup>th</sup> Int. Scient. Technol. Conference. Automation and Progressive Technologies in Nuclear Field]. Novouralsk, 2012, pp. 78–79.