

## ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ В АВТОНОМНОМ ИНВЕРТОРЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В. Г. МАКАРОВ, Ю. А. ЯКОВЛЕВ, В. Н. ХАННАНОВА

Казанский национальный исследовательский технологический университет

*Показана целесообразность использования математического описания обобщенной электрической машины при идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя. Однако для реализации алгоритма широтно-импульсной модуляции в трехфазном автономном инверторе напряжения необходимо осуществлять переход от переменных в системе координат обобщенной электрической машины к переменным трехфазной системы. Проведены необходимые преобразования, получены законы изменения фазных напряжений инвертора. С помощью компьютерного моделирования и экспериментального исследования показано, что необходимые формы фазных напряжений могут быть реализованы в автономном инверторе напряжения с широтно-импульсной модуляцией.*

*Ключевые слова: идентификация параметров, обобщенная электрическая машина, преобразование координат, трехфазный автономный инвертор, трехфазный асинхронный двигатель, широтно-импульсная модуляция.*

### Введение

Для реализации законов частотного регулирования скорости асинхронного двигателя (АД) необходимо располагать информацией о текущих значениях параметров схемы замещения фазы и нагрузки. Параметрами схемы замещения являются значения активных сопротивлений и индуктивностей фаз обмоток статора и ротора, взаимная индуктивность; к параметрам нагрузки относятся статический момент и момент инерции подвижных частей. В большинстве случаев данная информация носит приближенный характер, поскольку параметры обмоток и нагрузки задаются или определяются при настройке электропривода и в процессе его работы, как правило, не отслеживаются. Однако нагрев и охлаждение обмоток приводит к изменению их активных сопротивлений, а изменение нагрузки – к изменению состояния магнитной цепи (изменению индуктивностей), статического момента и момента инерции. В связи с этим особую актуальность проблема идентификации параметров АД [1–7] имеет применительно к частотно-регулируемому асинхронному электроприводу [8, 9]. Наличие информации о параметрах АД и его нагрузки позволит реализовывать более точные алгоритмы частотного регулирования скорости, обеспечивающие эффективное энерго- и ресурсосбережение. Поэтому проблема идентификации параметров неразрывно связана с проблемой повышения энергетической эффективности технологического оборудования.

В работах [10–19] показана эффективность применения непрерывного градиентного метода поиска минимума определенно положительной функции для идентификации параметров трехфазного АД и его нагрузки. В работах [11, 13, 15]

идентификация осуществляется по пяти параметрам схемы замещения фазы АД, к которым относятся: активное сопротивление фазы обмотки статора  $R_1$ , индуктивность фазы обмотки статора  $L_1$ , взаимная индуктивность  $M_m$ , активное сопротивление фазы обмотки ротора  $R_2$ , индуктивность фазы обмотки ротора и статора  $L_2$ . Параметрами нагрузки являются статический момент  $M_c$  и суммарный момент инерции подвижных частей  $J_\Sigma$ . Общее количество идентифицируемых параметров – семь.

Алгоритмы частотного регулирования скорости в большинстве случаев строятся с использованием математического описания и параметров обобщенной электрической машины (ОЭМ) [8, 9, 20], поэтому при идентификации параметров целесообразно использовать систему уравнений ОЭМ на основе трехфазного АД [11, 13, 15, 21, 22]:

$$\begin{cases} u_{1d} = R_1 i_{1d} + L_1 \frac{di_{1d}}{dt} + M_m \frac{di_{2d}}{dt} - \omega_1 (L_1 i_{1q} + M_m i_{2q}), \\ u_{1q} = R_1 i_{1q} + L_1 \frac{di_{1q}}{dt} + M_m \frac{di_{2q}}{dt} + \omega_1 (L_1 i_{1d} + M_m i_{2d}), \\ 0 = R_2 i_{2d} + L_2 \frac{di_{2d}}{dt} + M_m \frac{di_{1d}}{dt} - \omega_2 (L_2 i_{2q} + M_m i_{1q}), \\ 0 = R_2 i_{2q} + L_2 \frac{di_{2q}}{dt} + M_m \frac{di_{1q}}{dt} + \omega_2 (L_2 i_{2d} + M_m i_{1d}), \\ J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} = p_\Pi (M_\varepsilon - M_c), \\ M_\varepsilon = p_\Pi M_m (i_{2d} i_{1q} - i_{2q} i_{1d}), \end{cases} \quad (1)$$

где  $u_{1d}$ ,  $u_{1q}$  – напряжения фаз обмотки статора;  $i_{1d}$ ,  $i_{1q}$ ,  $i_{2d}$ ,  $i_{2q}$  – токи фаз обмоток статора и ротора;  $\omega_1$  – угловая скорость вращения системы координат  $d, q$ ;  $\omega_2$  – угловая скорость скольжения ( $\omega_2 = \omega_1 - \omega$ );  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора, эл. рад/с;  $p_\Pi$  – число пар полюсов;  $M_\varepsilon$  – электромагнитный момент;  $M_c$  – статический момент.

Переход от параметров и величин трехфазного АД к параметрам и величинам ОЭМ и обратно рассматривается в работах [21, 22]. Преобразование напряжений фаз обмотки статора ОЭМ к напряжениям статора трехфазного АД имеет вид [21, 22]:

$$u_{1A} = u_{1d} \cos \alpha_1 - u_{1q} \sin \alpha_1; \quad (2)$$

$$u_{1B} = u_{1d} \cos \left( \alpha_1 - \frac{2\pi}{3} \right) - u_{1q} \sin \left( \alpha_1 - \frac{2\pi}{3} \right); \quad (3)$$

$$u_{1C} = u_{1d} \cos \left( \alpha_1 + \frac{2\pi}{3} \right) - u_{1q} \sin \left( \alpha_1 + \frac{2\pi}{3} \right), \quad (4)$$

где  $\alpha_1$  – угол поворота оси  $d$  системы координат  $d, q$  относительно оси  $A$  статора.

Угол  $\alpha_1$  определяют интегрированием:

$$\alpha_1 = \int_0^t \omega_1(t) dt. \quad (5)$$

Компьютерное моделирование процессов идентификации параметров асинхронного электропривода с двигателем АИР80А6У2 проводилось с использованием математической модели ОЭМ [11]. При этом напряжения  $u_{1d}(t)$ ,  $u_{1q}(t)$  и угловая скорость  $\omega_1(t)$  изменялись в соответствии с временными

диаграммами, показанными на рис. 1, и характеризовались параметрами, приведенными в таблице.

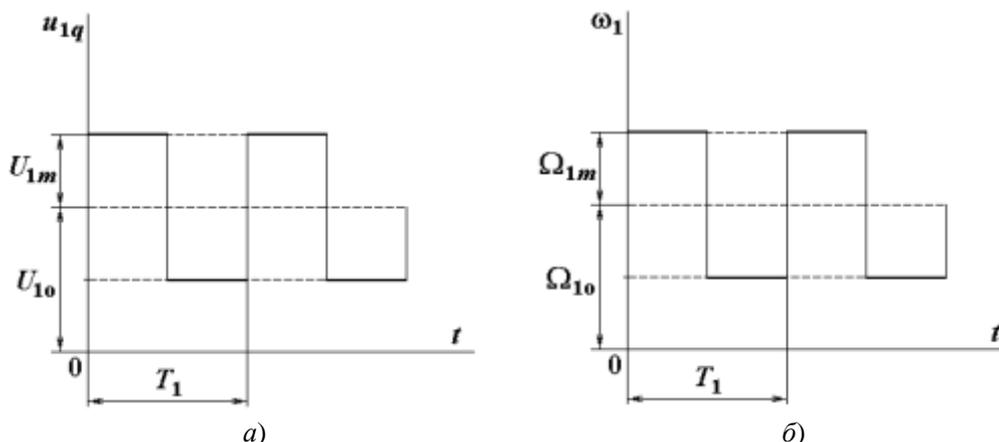


Рис. 1. Временные диаграммы: а – напряжения  $u_{1q}$ ; б – угловой скорости  $\omega_1$

Таблица

Наименование параметров		Функция	
		$u_{1q}(t)$	$\omega_1(t)$
Постоянная составляющая	обозначение	$U_{10}$	$\Omega_{10}$
	величина, единица измерения	50 В	300 рад/с
Амплитуда переменной составляющей	обозначение	$U_{1m}$	$\Omega_{1m}$
	величина, единица измерения	25 В	150 рад/с
Частота переменной составляющей	обозначение	$f_1$	
	величина, единица измерения	0,318 Гц	

Из рис. 1 видно, что функции  $u_{1q}(t)$  и  $\omega_1(t)$  являются периодическими (период их изменения обозначен  $T_1$ ). Здесь и далее условимся называть  $u_{1d}(t)$ ,  $u_{1q}(t)$  и  $\omega_1(t)$ , изменяющиеся по указанным законам, тестовыми сигналами. Компьютерное моделирование подтвердило [11] эффективность, работоспособность и высокую точность предлагаемого метода идентификации и разработанного на его основе алгоритма. Однако анализ законов изменения фазных напряжений  $u_{1A}(t)$ ,  $u_{1B}(t)$ ,  $u_{1C}(t)$  трехфазного АД и возможности их технической реализации с учетом специфики преобразователя частоты (ПЧ) при тестовых сигналах  $u_{1d}(t)$ ,  $u_{1q}(t)$  и  $\omega_1(t)$  в указанной работе [11] не проводился. Решению этого вопроса посвящена данная статья.

### Методика исследования

С целью анализа возможности технической реализации фазных напряжений обмотки статора  $u_{1A}(t)$ ,  $u_{1B}(t)$ ,  $u_{1C}(t)$  при заданных законах изменения напряжений  $u_{1d}(t)$ ,  $u_{1q}(t)$  и угловой скорости  $\omega_1(t)$  проведено компьютерное моделирование. Расчет угла  $\alpha_1$  производился по выражению (5). Переход от фазных напряжений обмотки статора ОЭМ к фазным напряжениям обмотки статора трехфазного АД осуществлялся с помощью выражений (2) – (5).

Результаты компьютерного моделирования в виде временных диаграмм угловой скорости  $\omega_1(t)$ , угла поворота  $\alpha_1(t)$  и напряжений  $u_{1q}(t)$ ,  $u_{1A}(t)$  приведены на рис. 2. Анализ кривой  $u_{1A}(t)$  показывает, что фазное напряжение представляет собой амплитудно-частотно-модулированные колебания, амплитуда которых изменяется в соответствии с изменениями амплитуды напряжения  $u_{1q}(t)$ , а частота – в соответствии с изменениями угловой скорости  $\omega_1(t)$ .

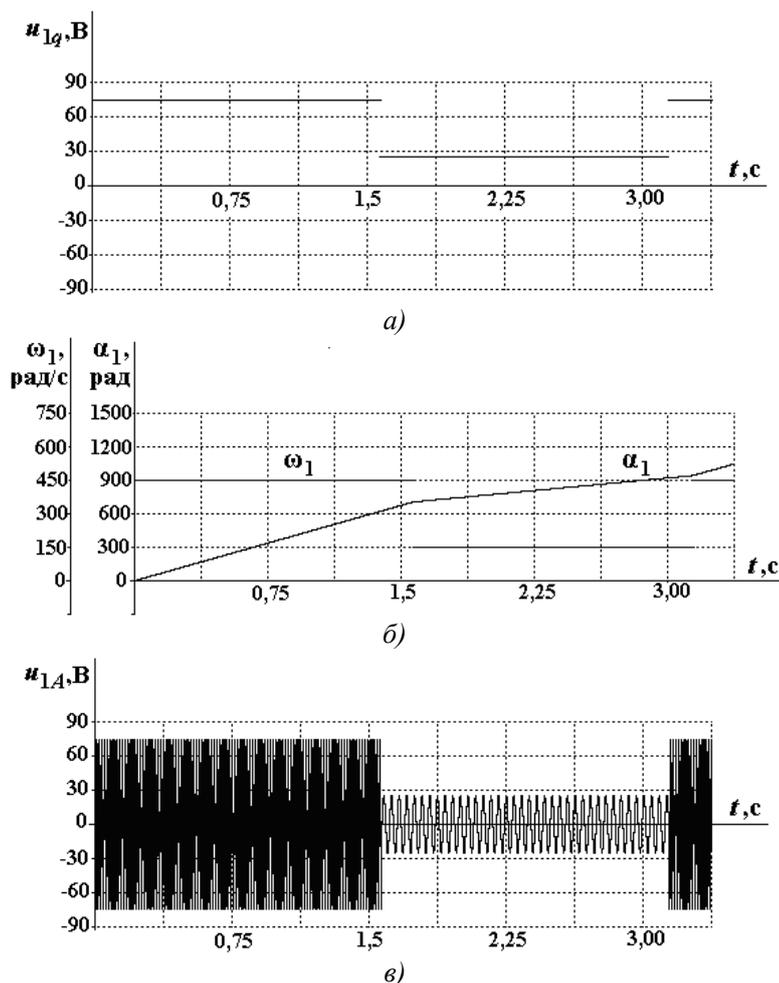


Рис. 2. Временные диаграммы: а – напряжения  $u_{1q}$ ; б – угловой скорости  $\omega_1$  и угла поворота  $\alpha_1$ ; в – амплитудно-частотно-модулированного напряжения  $u_{1A}$

В более крупном масштабе времени для первой половины периода  $T_1$  кривая  $u_{1A}(t)$  показана на рис. 3, а, а для второй половины периода  $T_1$  – на рис. 4, а. Видно, что в течение первой половины периода  $T_1$  напряжение  $u_{1A}(t)$  изменяется во времени по гармоническому закону с амплитудой 75 В и частотой 71,6 Гц, а в течение второй половины периода  $T_1$  – по гармоническому закону с амплитудой 25 В и частотой 23,8 Гц. Аналогичным образом со сдвигом на угол  $-2\pi/3$  и  $2\pi/3$  будут изменяться напряжения  $u_{1B}(t)$ ,  $u_{1C}(t)$  соответственно.

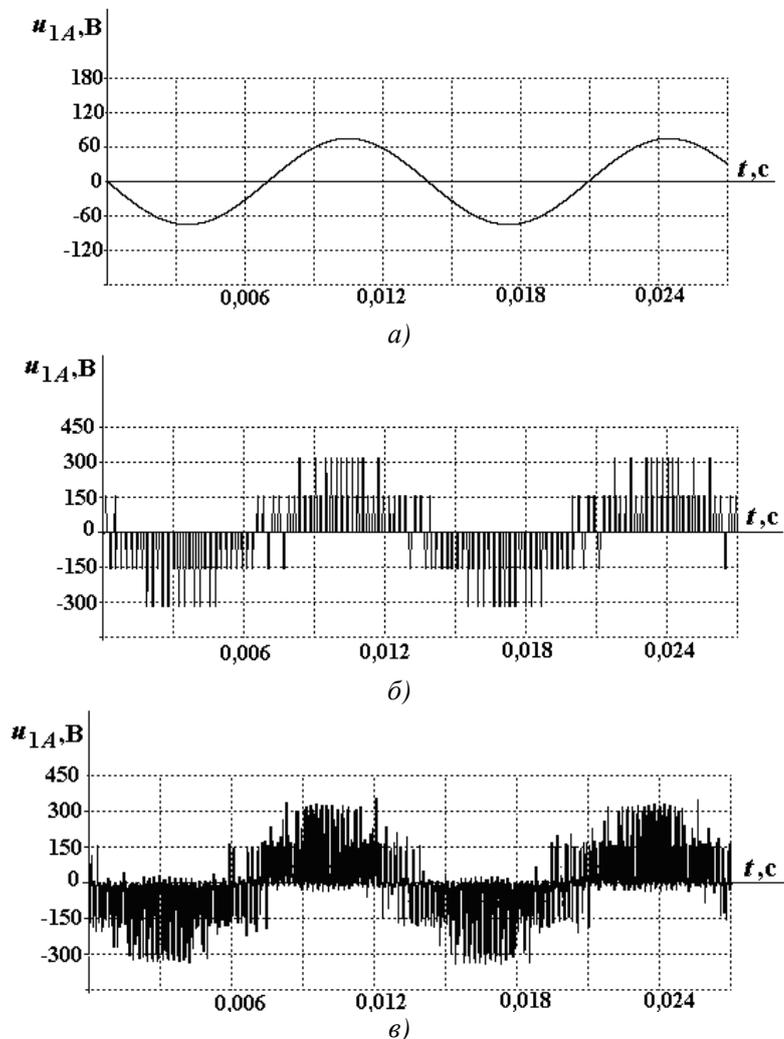


Рис. 3. Временные диаграммы напряжения  $u_{1A}$  для первой половины периода  $T_1$  :  
 а – амплитудно-частотно-модулированное напряжение; б – расчетная кривая при ШИМ;  
 в – экспериментальная кривая при ШИМ

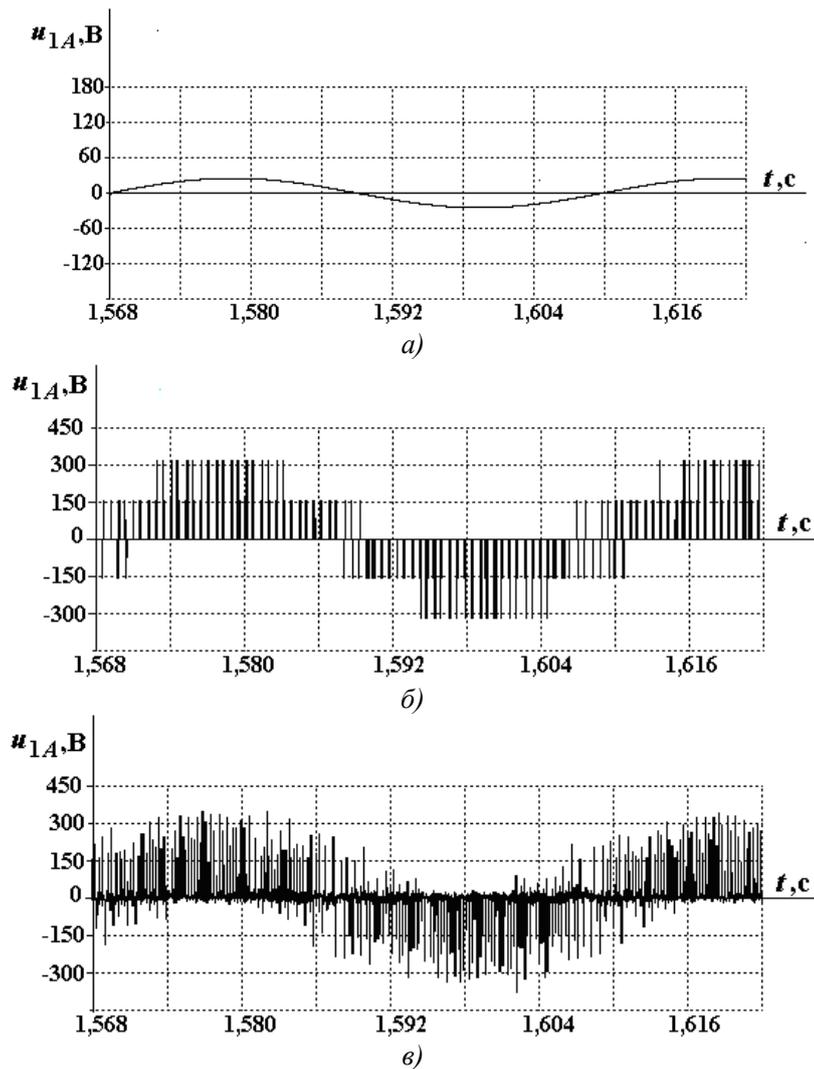


Рис. 4. Временные диаграммы напряжения  $u_{1A}$  для второй половины периода  $T_1$ :  
*a* – амплитудно-частотно-модулированное напряжение; *б* – расчетная кривая при ШИМ;  
*в* – экспериментальная кривая при ШИМ

Для реализации фазных напряжений  $u_{1A}(t)$ ,  $u_{1B}(t)$ ,  $u_{1C}(t)$ , изменяющихся по гармоническим законам в соответствии с временными диаграммами на рис. 2, в, 3, а, 4, а, необходимо одновременно изменять их действующие значения и частоту, что невозможно при питании от трехфазной сети частотой 50 Гц. Синусоидальные формы напряжений с регулируемым действующим значением и частотой могут быть получены при питании трехфазного АД от усилителя мощности (УМ). Силовые транзисторы УМ работают в линейном режиме, а в их цепи управления подаются синусоидальные сигналы. Синусоидальная форма выходных напряжений благоприятна для АД, однако, несмотря на простоту силовых схем, УМ имеют весьма низкий КПД. Поэтому УМ не нашли широкого применения в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе.

В большинстве современных асинхронных электроприводов применяются двухзвенные преобразователи частоты (ПЧ), представляющие собой совокупность неуправляемого выпрямителя (НВ) и автономного инвертора напряжения (АИН).

Наиболее распространенной является трехфазная мостовая схема АИН на IGBT-транзисторах, которые работают в ключевом режиме. Для управления транзисторами АИН используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) [8]. Принцип и алгоритм реализации ШИМ в трехфазном мостовом АИН рассмотрены в работах [8, 23]. Фазные напряжения АИН с ШИМ представляют собой последовательность импульсов, амплитуда и длительность которых изменяются пропорционально задающим напряжениям.

#### Основные результаты

Моделирование АИН с ШИМ производилось при условии питания двухзвенного ПЧ от трехфазной сети напряжением 380 В, частотой 50 Гц. В этом случае выпрямленное напряжение в звене постоянного тока [24]

$$U_d = 1,35 \cdot U_{1л}, \quad (6)$$

где  $U_{1л}$  – действующее значение линейного напряжения сети, В.

Без учета падения напряжения на диодах НВ в соответствии с (6) получим

$$U_d = 1,35 \cdot 380 = 513 \text{ В.}$$

При моделировании учитывалось падение напряжения на диодах НВ и открытых транзисторах АИН. При реализации алгоритма ШИМ в математической модели задающие напряжения АИН принимались пропорциональными напряжениям  $u_{1A}(t)$ ,  $u_{1B}(t)$ ,  $u_{1C}(t)$ .

Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 3, б, 4, б в виде временных диаграмм фазных напряжений  $u_{1A}(t)$  для первой и второй половины периода  $T_1$ . Анализ этих временных диаграмм показывает, что фазные напряжения АИН с ШИМ являются периодическими функциями времени и представляют собой последовательность импульсов амплитудой 165 В и 330 В, разделенных паузами на нулевом уровне. Длительность и амплитуда импульсов изменяются в соответствии с изменением амплитудно-частотно-модулированных задающих напряжений. Если пренебречь падениями напряжения на диодах НВ и открытых транзисторах АИН, то можно считать, что амплитуды импульсов равны  $\frac{1}{3}U_d$  и  $\frac{2}{3}U_d$ , что соответствует описанию алгоритма ШИМ, приведенному в работах [8, 23]. Результаты компьютерного моделирования не противоречат положениям теории и практики силовой преобразовательной техники и частотно-регулируемого электропривода.

Экспериментальное исследование проводилось в научно-исследовательской лаборатории ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» с использованием двухзвенного ПЧ. Цель эксперимента – качественный анализ кривых фазных напряжений АИН с ШИМ при заданных законах изменения напряжений  $u_{1d}(t)$ ,  $u_{1q}(t)$  и угловой скорости  $\omega_1(t)$ . Силовая часть АИН с ШИМ выполнена на основе интеллектуального силового модуля (IPM) PS22A73 фирмы *Mitsubishi Electric*, а система управления – на основе микроконтроллера *dsPIC30F3010*. Частота ШИМ принималась равной 16 кГц. Результаты эксперимента приведены на рис. 3, в и 4, в в виде временных диаграмм фазных напряжений  $u_{1A}(t)$  для первой и второй половины периода  $T_1$ . Сравнительный качественный анализ временных диаграмм свидетельствует о хорошем совпадении расчетных (рис. 3, б; 4, б) и экспериментальных (рис. 3, в; 4, в) кривых. Следует отметить, что характер изменения несинусоидальных фазных напряжений на рис. 3, б; 3, в и рис. 4, б; 4, в соответствует

изменению гармонических амплитудно-частотно-модулированных напряжений на рис. 3, а; 4, а.

### **Обсуждение результатов**

Таким образом, с помощью компьютерного моделирования и экспериментального исследования получены следующие результаты:

- 1) установлена возможность преобразования тестовых фазных напряжений статора ОЭМ, используемых в [11, 13] для идентификации параметров АД, в амплитудно-частотно-модулированные напряжения трехфазной системы;
- 2) показано, что на основе этих напряжений могут быть сформированы задающие напряжения АИН с ШИМ;
- 3) определены законы изменения фазных напряжений, подаваемых на обмотку статора трехфазного АД.

### **Выводы**

1. Использование математического описания обобщенной электрической машины для идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя и последующая техническая реализация систем идентификации требуют перехода от переменных в системе координат обобщенной электрической машины к переменным в трехфазной системе.

2. Установлено, что преобразование тестовых фазных напряжений статора обобщенной электрической машины, используемых для идентификации параметров АД, в переменные трехфазной системы позволяет получить амплитудно-частотно-модулированные напряжения, являющиеся гармоническими сигналами.

3. Для реализации алгоритма идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя целесообразно осуществлять питание обмотки статора от двухзвенного преобразователя частоты с несинусоидальной формой выходных напряжений.

4. Разработку алгоритма управления автономным инвертором напряжения с широтно-импульсной модуляцией необходимо осуществлять в два этапа. Задачей первого этапа является определение законов изменения задающих напряжений автономного инвертора. На втором этапе с помощью задающих напряжений на основании известного алгоритма широтно-импульсной модуляции формируются фазные напряжения, подаваемые на обмотку статора трехфазного асинхронного двигателя.

5. С помощью компьютерного моделирования определены законы изменения фазных напряжений трехфазного автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией, необходимых для идентификации параметров асинхронного двигателя.

6. Экспериментальное исследование подтвердило корректность теоретических преобразований, справедливость введенных при компьютерном моделировании допущений и позволило установить возможность технической реализации алгоритма управления автономным инвертором с широтно-импульсной модуляцией при идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя.

### **Summary**

*The expediency of using the mathematical description of the generalized electric machine in the identification of the parameters of three phase induction motor. However, the implementation of the algorithm pulse width modulation in three-phase autonomous voltage inverter necessary to make the transition from the variables in the coordinate system of the generalized electrical machines to the variables of the three-phase system.*

***The necessary transformations, the laws of change of the phase voltages of the inverter are carried out. With the help of computer simulation and experimental studies it was shown that the necessary shape of the phase voltages can be implemented in the autonomous voltage inverter with pulse width modulation.***

***Keywords: identification of parameters, Generalized Electric machine, coordinate transformation, Three-phase Autonomous Inverter, Asynchronous Three-Phase Motor, Pulse Width Modulation.***

#### Литература

1. Водовозов А. М., Елюков А. С. Идентификация параметров асинхронной машины в установившихся режимах // Вестник ИГЭУ. 2010. № 2. С. 69 – 71.
2. Изосимов Д. Б., Рывкин С. Е. Идентификация частоты вращения и составляющих потокосцепления ротора асинхронного двигателя по измерениям токов и напряжений обмоток статора // Электричество. 2005. № 4. С. 32 – 40.
3. Изосимов Д. Б., Аболемов Е. Н. Свойства уравнений обобщенного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором // Электричество. 2008. № 4. С. 35 – 39.
4. Виноградов А. Б., Сибирцев А. В., Колодин И. П. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового электропривода серии ЭПВ // Силовая электроника. 2008. № 3. С. 50 – 55.
5. Панкратов В. В., Маслов М. О. Синтез и исследование алгоритма идентификации частоты вращения асинхронного двигателя // Электричество. 2008. № 4. С. 27 – 34.
6. Каширских В. Г. Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей. Кемерово, Куз. ГТУ, 2005. 139 с.
7. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ИГЭУ им. В. И. Ленина, 2008. 320 с.
8. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 272 с.
9. Терехов В. М., Осипов О. И. Системы управления электроприводов. М.: Академия, 2006. 304 с.
10. Афанасьев А. Ю. Моментный электропривод. Казань: Казан. гос. техн. ун-т, 1997. 250 с.
11. Макаров В. Г. Идентификация параметров трехфазного асинхронного двигателя // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 3 – 4. С. 88 – 101.
12. Макаров В. Г. Идентификация параметров и токов ротора трехфазного асинхронного двигателя // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. №7 – 8. С. 101 – 116.
13. Пат. 2392731 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 7/06. Устройство оценивания параметров электродвигателя / В. Г. Макаров, А. Ю. Афанасьев, Ю. А. Яковлев; заявитель и патентообладатель Казанский государственный технологический университет. №2009118685/09; заявл. 18.05.2009; опубл. 20.06.2010. Бюл. № 17. 21 с.
14. Пат. 2426219 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 7/06. Устройство оценивания параметров асинхронного двигателя/ В. Г. Макаров, А. Ю. Афанасьев, Ю. А. Яковлев; заявитель и патентообладатель Казанский государственный технологический университет. № 2010112365/07; заявл. 30.03.2010; опубл. 10.08.2011. Бюл. № 22. 24 с.
15. Макаров В. Г., Яковлев Ю. А. Оценивание параметров трехфазного асинхронного двигателя // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 9. С. 418 – 425.
16. Макаров В. Г., Яковлев Ю. А. Анализ состояния и перспективы развития работ по идентификации параметров электрических машин // Вестник Казанского технологического университета. 2011. Т. 14, № 1. С. 134 – 144.
17. Макаров В. Г. Актуальные проблемы асинхронного электропривода и методы их решения // Вестник Казанского технологического университета. 2011. Т. 14, № 6. С. 79 – 93.
18. Макаров В. Г., Тамбов В. В. Анализ состояния и перспективы развития работ по бездатчиковому определению скорости электропривода // Вестник Казанского технологического университета, 2013. Т. 16, № 21. С. 245 – 248.
19. Макаров В. Г., Тамбов В. В. Идентификация параметров и скорости вращения трехфазного асинхронного двигателя // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 5 – 6. С. 56 – 64.
20. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. Л.: Энергия, 1964. 527 с.
21. Макаров В. Г. Применение теории обобщенной электрической машины к трехфазному асинхронному двигателю // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2009. № 11 – 12. С. 84 – 97.

22. Макаров В. Г. Гипотетическая физическая модель обобщенной электрической машины на основе трехфазного асинхронного двигателя // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 1 – 2. С. 94 – 108.

23. Макаров В. Г. Моделирование и исследование электроприводов. Ч. 1. Разомкнутые системы электропривода. Казань: Казан. гос. технол. ун-т, 2005. 260 с.

24. Елисеев В. А., Шинянский А. В. Справочник по автоматизированному электроприводу. М.: Энергоатомиздат, 1988. 456 с.

*Поступила в редакцию*

*09 апреля 2015 г.*

**Макаров Валерий Ганнадьевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и электротехника» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). Тел: 8(843)231-41-27. E-mail: electroprivod@list.ru.

**Яковлев Юрий Алексеевич** – аспирант кафедры «Электропривод и электротехника» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). Тел: 8(927)4025895.

**Ханнанова Вероника Николаевна** – аспирант кафедры «Электропривод и электротехника» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). Тел: 8(987)0674017.