

ФИЛЬТРАЦИЯ ФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

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

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Показана целесообразность применения активных фильтров Баттерворта третьего порядка для выделения основной гармоники фазных напряжений двухзвенного преобразователя частоты при идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя. Для реализации алгоритма идентификации необходимо осуществлять преобразование выходных напряжений фильтров в напряжения фаз обмотки статора обобщенной электрической машины. С помощью экспериментального исследования установлено, что наличие фильтров низкой частоты не вносит существенных искажений и позволяет получить необходимые формы фазных напряжений обобщенной электрической машины.

Ключевые слова: идентификация параметров, обобщенная электрическая машина, преобразование координат, преобразователь частоты, трехфазный асинхронный двигатель, фильтр Баттерворта, широтно-импульсная модуляция.

Введение

При разработке асинхронных частотно-регулируемых электроприводов весьма актуальной является задача идентификации параметров схемы замещения фазы и нагрузки трехфазного асинхронного двигателя (АД) [1, 2]. Довольно часто значения этих параметров являются приближенными, поскольку задаются или определяются при настройке электропривода и в процессе его работы, как правило, не отслеживаются. 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.

Анализ методов идентификации, проведенный в работе [3], показал, что для идентификации параметров электрических машин может быть применен непрерывный градиентный метод поиска минимума функции. Преимуществами этого метода является простота реализации и хорошая сходимость в окрестности экстремума. Эффективность применения непрерывного градиентного метода поиска минимума определено положительной функцией для идентификации параметров трехфазного АД и его нагрузки показана в работах [4 – 12]. В [5, 7, 9] 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 ротора L_2 . Параметрами нагрузки являются статический момент M_c и суммарный момент инерции подвижных частей J_Σ . Общее количество идентифицируемых параметров – семь.

© А.Ю. Афанасьева, В.Г. Макаров, Ю.А. Яковлев, В.Н. Ханнанова
Проблемы энергетики, 2015, № 9-10

Компьютерное моделирование процессов идентификации параметров трехфазного АД, которое осуществлялось в [5] на основе математического описания обобщенной электрической машины (ОЭМ), подтвердило эффективность, работоспособность и высокую точность предлагаемого метода идентификации и разработанного на его основе алгоритма. Отметим, что компьютерное моделирование в [5] проводилось без учета специфики работы преобразователя частоты (ПЧ). При этом напряжение фазы d обмотки статора ОЭМ $u_{1d}(t)$ принималось равным нулю, а напряжение $u_{1q}(t)$ фазы q обмотки статора ОЭМ и угловая скорость системы координат d, q $\omega_1(t)$ изменялись в соответствии с временными диаграммами (рис. 1) и характеризовались параметрами, приведенными в табл. 1.

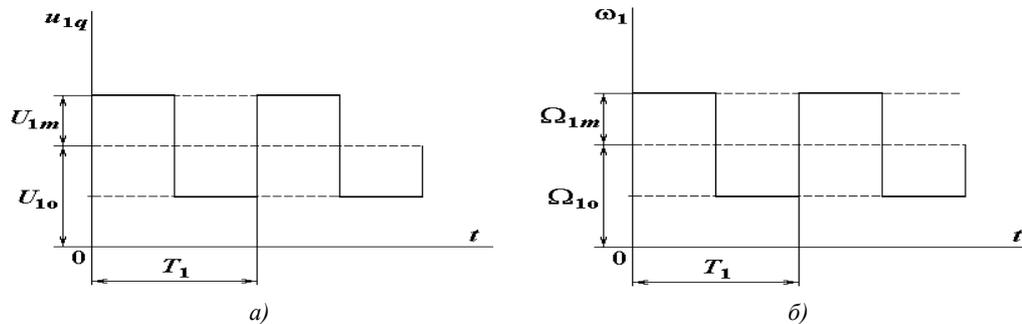


Рис. 1. Временные диаграммы:
 а – напряжения u_{1q} ; б – угловой скорости ω_1

Таблица 1

Наименование параметров		Функция	
		$u_{1q}(t)$	$\omega_1(t)$
Постоянная составляющая	Обозначение	U_{1o}	Ω_{1o}
	Величина, единица измерения	50 В	300 рад/с
Амплитуда переменной составляющей	Обозначение	U_{1m}	Ω_{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. Проведенный в работе [13] анализ показал, что при тестовых сигналах $u_{1d}(t)$, $u_{1q}(t)$ и $\omega_1(t)$ фазные напряжения трехфазного АД представляют 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 $\omega_1(t)$. В [13] показано, что для реализации подобной формы фазных

напряжений необходимо одновременно изменять их действующие значения и частоту, что невозможно при питании от трехфазной сети частотой 50 Гц. С помощью компьютерного моделирования и экспериментального исследования показана [13] целесообразность питания АД от двухзвенного преобразователя частоты (ПЧ). Специфика работы ПЧ связана с тем, что при широтно-импульсной модуляции (ШИМ) его выходные напряжения представляют собой последовательность импульсов, длительность которых изменяется пропорционально задающим напряжениям. Известно, что в спектре фазных напряжений ПЧ, помимо основной, содержатся высокочастотные составляющие, обусловленные влиянием ШИМ. Поэтому при идентификации параметров трехфазного АД необходимо осуществлять фильтрацию фазных напряжений ПЧ с целью их дальнейшего преобразования. Решению вопроса рационального выбора фильтров посвящена данная статья.

Методика исследования

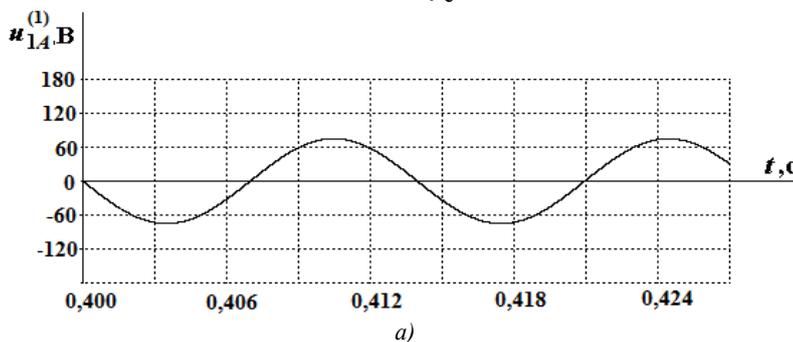
Целью компьютерного моделирования является анализ кривых выходных напряжений двухзвенного ПЧ при идентификации параметров трехфазного АД. При тестовых сигналах $u_{1d}(t)$, $u_{1q}(t)$ и $\omega_1(t)$ в [13] проведено моделирование двухзвенного ПЧ при питании от трехфазной сети напряжением 380 В, частотой 50 Гц. При этом учитывалось падение напряжения на силовых элементах ПЧ. С помощью компьютерного моделирования для первой и второй половины периода T_1 получены кривые амплитудно-частотно-модулированного напряжения $u_{1A}^{(1)}(t)$ и расчетные кривые $u_{1A}(t)$ при ШИМ, которые для установившегося режима работы показаны на рис. 2, а, б и 3, а, б соответственно. Видно, что в спектре фазных напряжений ПЧ содержатся высокочастотные составляющие, обусловленные влиянием ШИМ. Для подавления высокочастотных составляющих используются фильтры низкой частоты (ФНЧ). Анализ схемных решений и характеристик ФНЧ показал [14 – 16], что для фильтрации фазных напряжений ПЧ целесообразно использовать активный фильтр Баттерворта третьего порядка. Передаточная функция такого фильтра имеет вид [15]

$$W(p) = \frac{k_{\phi}}{T_{\phi}^3 p^3 + 2T_{\phi}^2 p^2 + 2T_{\phi} p + 1}, \quad (1)$$

где k_{ϕ} , T_{ϕ} – коэффициент передачи и постоянная времени фильтра.

Постоянная времени фильтра зависит от его частоты среза f_c :

$$T_{\phi} = \frac{1}{2\pi f_c}.$$



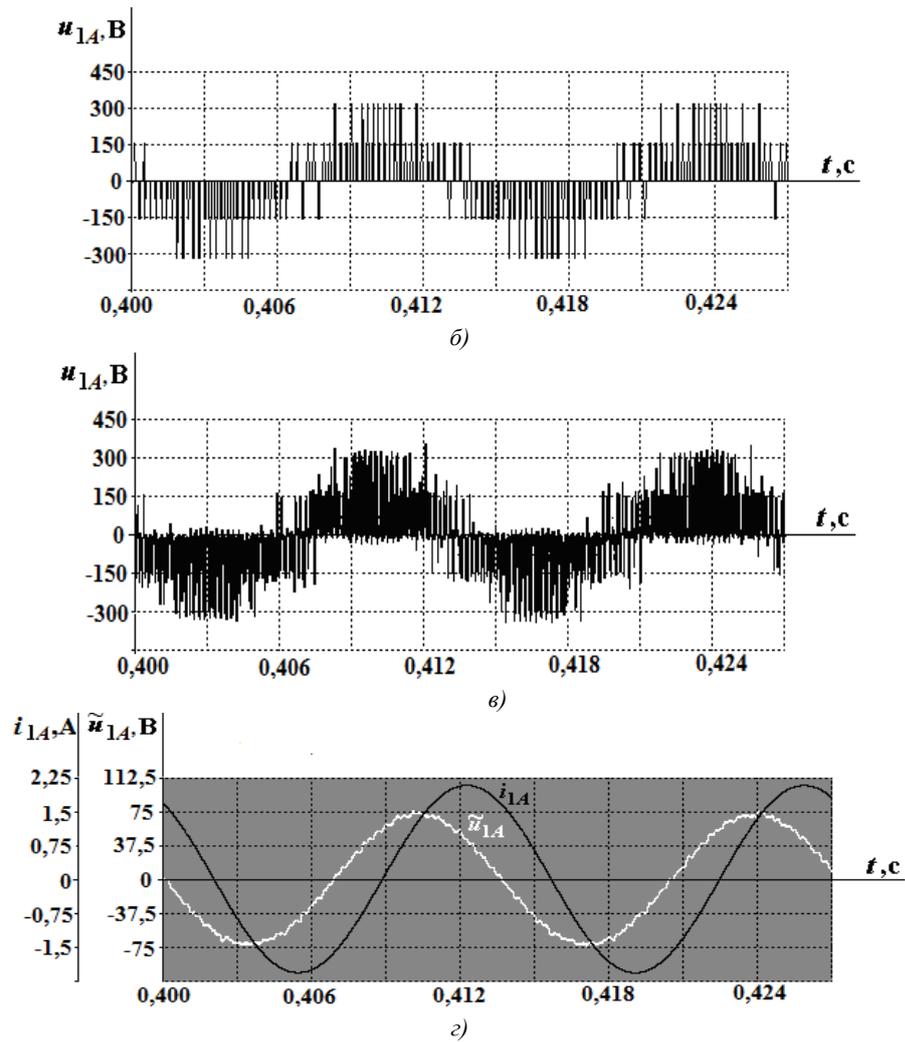
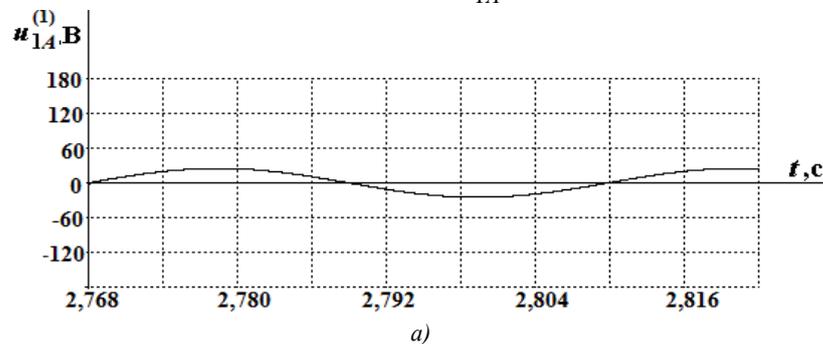


Рис. 2. Временные диаграммы для первой половины периода T_1 :
 а – основная (первая) гармоника $u_{1A}^{(1)}$; б – расчетная кривая u_{1A}
 при ШИМ; в – экспериментальная кривая u_{1A} при ШИМ;
 г – экспериментальные кривые напряжения \tilde{u}_{1A} на выходе
 ФНЧ и тока i_{1A}



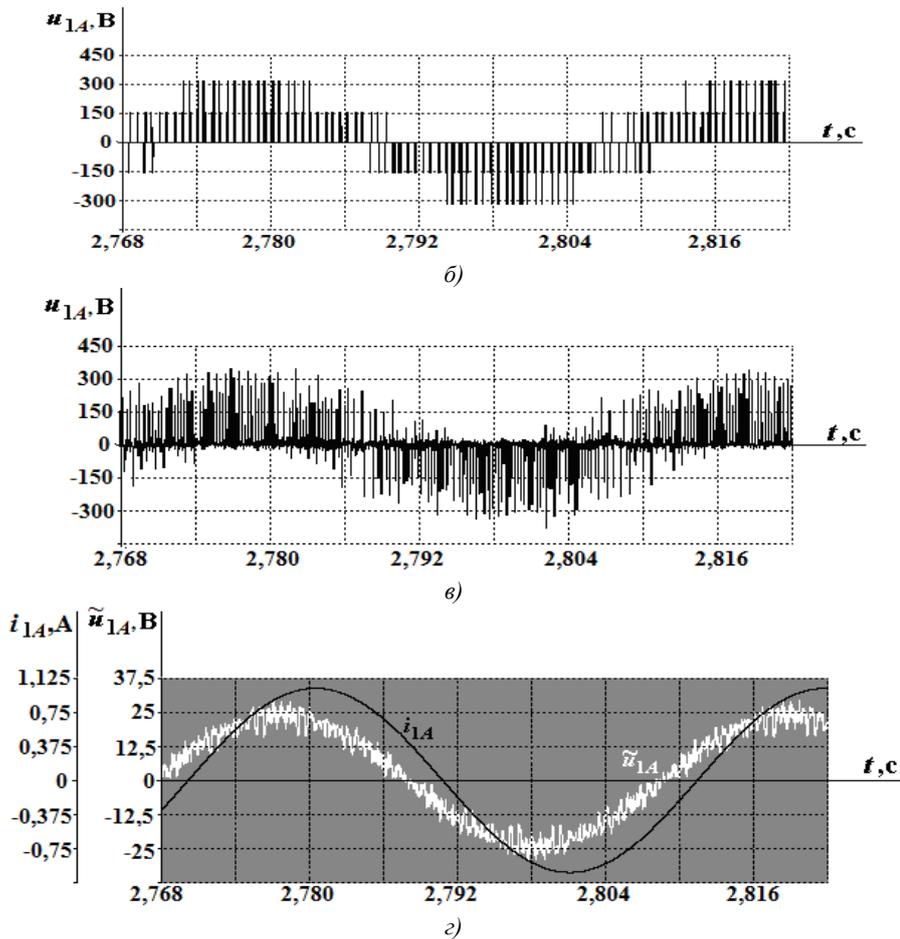


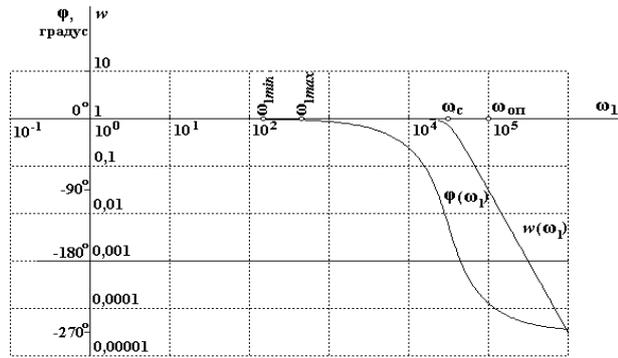
Рис. 3. Временные диаграммы для второй половины периода T_1 :

a – основная (первая) гармоника $u_{1A}^{(1)}$; b – расчетная кривая u_{1A} при ШИМ; c – экспериментальная кривая u_{1A} при ШИМ; z – экспериментальные кривые напряжения \tilde{u}_{1A} на выходе ФНЧ и тока i_{1A}

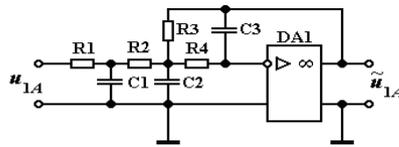
Частота среза ФНЧ принималась равной 5 кГц и выбиралась из следующих соображений:

- 1) минимальная $\omega_{1\min}$ и максимальная $\omega_{1\max}$ угловые частоты полезного сигнала на рис. 4, a определяются с учетом значений постоянной составляющей и амплитуды переменной составляющей функции $\omega_1(t)$, которые приводятся в табл. 1;
- 2) угловая частота опорного напряжения $\omega_{\text{оп}}$ определяется частотой ШИМ, которая при настройке ПЧ задавалась равной 16 кГц;
- 3) влияние ФНЧ на результаты преобразования напряжений должно быть минимальным.

На рис. 4 показаны частотные характеристики и схема активного фильтра Баттерворта третьего порядка с частотой среза 5 кГц.



а)



б)

Рис. 4. Активный фильтр Баттерворта третьего порядка:
а – частотные характеристики; б – схема электрическая
принципиальная

Частотные характеристики на рис. 4, а построены на основании передаточной функции (1) при условии, что k_{ϕ} равен единице. Анализ амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра Баттерворта третьего порядка на рис. 4, а показывает, что при угловых частотах ω_1 менее угловой частоты среза ω_c она проходит на уровне единицы, а при угловых частотах ω_1 более ω_c имеет наклон – 60 дБ/дек. В данном случае это является решающим преимуществом при выборе типа ФНЧ, выгодно отличающим его от фильтров других типов. Очевидно, что при такой АЧХ ФНЧ амплитудные искажения при угловых частотах полезного сигнала $\omega_{1\min}$ и $\omega_{1\max}$ будут минимальными. Анализ фазо-частотной характеристики (ФЧХ) фильтра Баттерворта третьего порядка на рис. 4, а показывает, что в области угловых частот полезного сигнала $\omega_{1\min}$ и $\omega_{1\max}$ фильтр не будет вносить существенного запаздывания. В соответствии с методикой проектирования, изложенной в [16], для схемы на рис. 4, б проведен расчет параметров элементов активного ФНЧ на основе операционного усилителя К553УД2. Расчетные значения параметров элементов схемы представлены в табл. 2.

Таблица 2

Резисторы	
R1	39 кОм
R2	39 кОм
R3	78 кОм
R4	39 кОм
Конденсаторы	
C1	2,003 пФ
C2	1,721 пФ
C3	0,158 пФ

Допустимый разброс значений параметров элементов фильтра от приведенных в табл. 2 составляет $\pm 1...2\%$. Отклонение от этого требования приводит к искажению АЧХ более чем на 3 дБ [16].

Экспериментальное исследование проводилось в научно-исследовательской лаборатории кафедры электропривода и электротехники ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет». Схема экспериментальной установки по исследованию процессов идентификации параметров трехфазного АД показана на рис. 5.

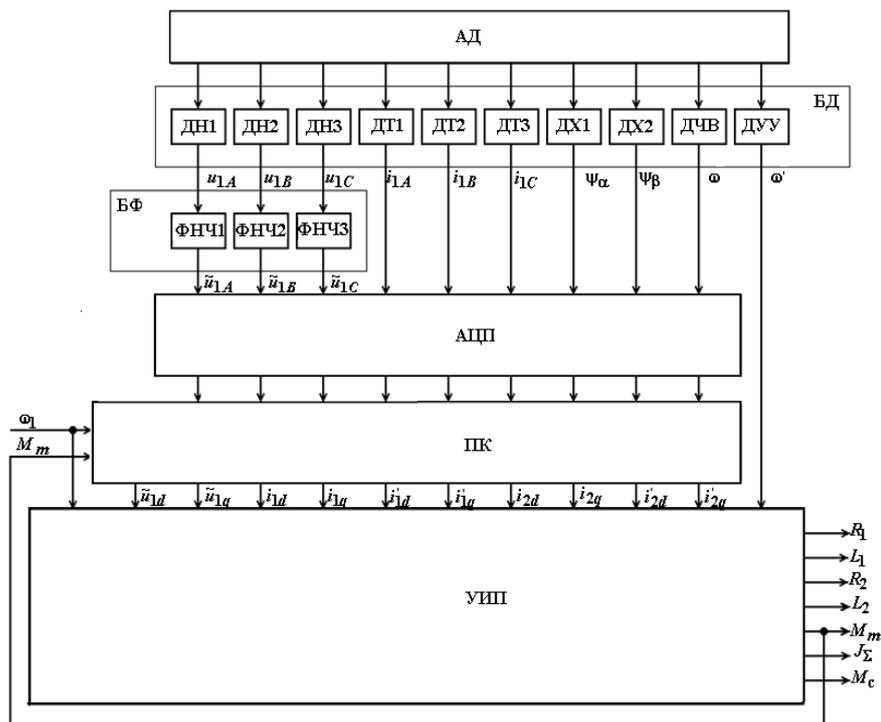


Рис. 5. Схема экспериментальной установки по исследованию процессов идентификации параметров трехфазного АД: АД – асинхронный двигатель; БД – блок датчиков; БФ – блок фильтров; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – преобразователь координат; УИП – устройство идентификации параметров

В состав блока датчиков (БД) на рис. 5 входят датчики фазных напряжений (ДН1 – ДН3) и токов (ДТ1 – ДТ3), Холла (ДХ1, ДХ2), частоты вращения (ДЧВ) и углового ускорения (ДУУ). Датчики Холла, установленные по расточке статора в ортогональных осях. Блок фильтров (БФ) содержит в себе три активных фильтра Баттерворта третьего порядка. ПЧ на рис. 5 не показан.

Целью эксперимента является анализ кривых выходных напряжений фильтров Баттерворта третьего порядка, а также анализ результатов преобразования выходных напряжений этих фильтров в напряжения системы координат d, q . Силовая часть двухзвенного ПЧ выполнена на основе интеллектуального силового модуля (IPM) PS22A73 фирмы *Mitsubishi Electric*, а система управления – на основе микроконтроллера dsPIC30F3010. Частота ШИМ принималась равной 16 кГц. Активные фильтры Баттерворта изготавливались на основе операционных усилителей K553УД2.

Основные результаты

Результаты эксперимента показаны на рис. 2, в, г и 3, в, г в виде временных диаграмм фазных напряжений ПЧ и выходных напряжений ФНЧ для первой и второй половины периода T_1 , а также на рис. 6, б в виде временных диаграмм напряжений $\tilde{u}_{1d}(t)$, $\tilde{u}_{1q}(t)$, формируемых на основании выходных напряжений ФНЧ. Экспериментальные временные диаграммы выходных напряжений ФНЧ на рис. 2, г, 3, г совмещены с временными диаграммами фазных токов $i_{1A}(t)$. Из рис. 2, г, 3, г видно, что кривые фазных токов АД представляют собой достаточно гладкие гармонические функции, которые не требуют фильтрации. Экспериментальные кривые получены с использованием пакета *Power Craph 3.3*.

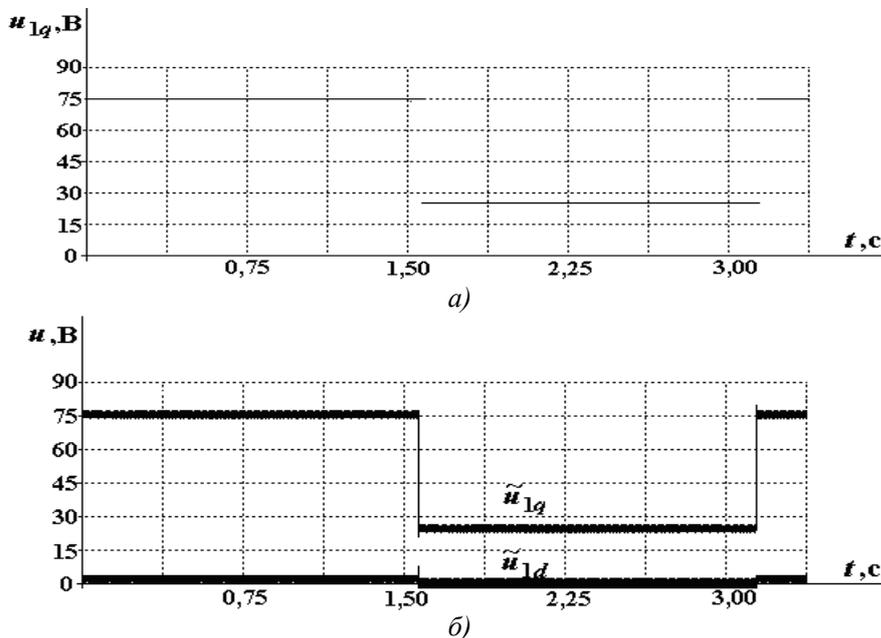


Рис. 6. Временные диаграммы фазных напряжений статора ОЭМ:
а – расчетные кривые; б – экспериментальные кривые

Переход от параметров и величин трехфазного АД к параметрам и величинам ОЭМ и обратно рассматривается в работах [17, 18]. В данном случае в ходе идентификации параметров осуществлялось преобразование выходных напряжений ФНЧ в напряжения фаз обмотки статора ОЭМ, которое имеет вид [17, 18]:

$$\tilde{u}_{1d} = \frac{2}{3} \left[\tilde{u}_{1A} \cos \alpha_1 + \tilde{u}_{1B} \cos \left(\alpha_1 - \frac{2\pi}{3} \right) + \tilde{u}_{1C} \cos \left(\alpha_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \right]; \quad (2)$$

$$\tilde{u}_{1q} = -\frac{2}{3} \left[\tilde{u}_{1A} \sin \alpha_1 + \tilde{u}_{1B} \sin \left(\alpha_1 - \frac{2\pi}{3} \right) + \tilde{u}_{1C} \sin \left(\alpha_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \right], \quad (3)$$

где α_1 – угол поворота оси d системы координат d, q относительно оси фазы A статора.

Угол α_1 определяют интегрированием:

$$\alpha_1 = \int_0^t \omega_1(t) dt. \quad (4)$$

Обсуждение результатов

Анализ кривых выходного напряжения ФНЧ на рис. 2, з, 3, з показывает, что получить идеально гладкие гармонические функции после фильтрации не удастся. Видно, что в спектре выходных напряжений ФНЧ содержатся высокочастотные пульсации, которые наиболее существенно проявляются во второй половине периода T_1 (рис. 3, з). Данное обстоятельство объясняется сравнительно малым амплитудным значением первой гармоники фазного напряжения $u_{1A}^{(1)}$, которое составляет 25 В. На основании выражений (2) – (4) получены кривые $u_{1d}(t)$, $u_{1q}(t)$, приведенные на рис. 6, б. Видно, что эти кривые содержат в своем составе высокочастотные пульсации, обусловленные влиянием ШИМ, амплитуда которых не превышает 3 В.

Для количественной оценки влияния фильтров Баттерворта третьего порядка проведен анализ частотных характеристик на рис. 4, а, результаты которого сведены в табл. 3.

Таблица 3

Частотные характеристики, единицы измерения	Угловые частоты		
	$\omega_{1\min}$	$\omega_{1\max}$	$\omega_{\text{оп}}$
$w(\omega_1)$	1	1	0,03
$A(\omega_1)$, дБ	0	0	-30,3
$\phi(\omega_1)$, градус	-1,59	-2,13	-233

В соответствии с данными табл. 3 при угловых частотах полезного сигнала $\omega_{1\min}$ и $\omega_{1\max}$ изменений амплитуды выходного напряжения ФНЧ не наблюдается, а запаздывание по фазе составляет $1,59^\circ$ и $2,13^\circ$ соответственно. При угловой частоте $\omega_{\text{оп}}$, которая в данном случае рассматривается как частота помехи, наблюдается ослабление амплитуды выходного напряжения ФНЧ на 30,3 дБ и запаздывание по фазе на 233° . Проведенный анализ позволил установить, что фильтры Баттерворта третьего порядка не оказывают существенного влияния на полезный сигнал и обеспечивают эффективное подавление высокочастотной помехи. С помощью экспериментального исследования установлено, что применение двухзвенного ПЧ с ШИМ и активных фильтров Баттерворта позволяет в последующем с высокой точностью осуществить переход к напряжениям фаз обмотки статора ОЭМ. При этом сохраняется устойчивость процессов идентификации, а относительная погрешность идентификации перечисленных ранее параметров трехфазного АД и его нагрузки при начальном отклонении их от истинных значений на 75% не превышает $\pm 7\%$.

Выводы

1. Идентификацию параметров трехфазного асинхронного двигателя и его нагрузки целесообразно осуществлять с использованием математического описания обобщенной электрической машины при тестовых напряжениях обмотки статора и угловой скорости системы координат d, q .

2. Анализ законов изменения тестовых напряжений обмотки статора обобщенной электрической машины и угловой скорости системы координат d, q показал, что при переходе к трехфазной системе получим амплитудно-частотно-модулированные напряжения гармонической формы, для реализации которых необходимо одновременно изменять амплитуду и частоту. Поэтому при идентификации параметров трехфазного

асинхронного двигателя целесообразно осуществлять питание обмотки статора от преобразователя частоты.

3. Специфика работы современных преобразователей частоты связана с тем, что при широтно-импульсной модуляции выходные напряжения представляют собой последовательность импульсов, длительность которых изменяется пропорционально задающим напряжениям. Для выделения основной гармоники из спектра таких напряжений необходимо использовать фильтры низкой частоты.

4. Анализ характеристик и схем фильтров низкой частоты позволил установить, что в данном случае наиболее целесообразно использовать активные фильтры Баттерворта третьего порядка.

5. С помощью экспериментального исследования установлено, что активные фильтры Баттерворта третьего порядка не оказывают существенного влияния на полезный сигнал и обеспечивают эффективное подавление высокочастотных помех, обусловленных влиянием широтно-импульсной модуляции. При этом сохраняется устойчивость процессов идентификации и высокая точность определения параметров трехфазного асинхронного двигателя.

Summary

The expediency of application of active filters Butterworth third order to highlight the basic harmonic of the phase voltages of a two-level frequency converter in the identification of the parameters of three-phase asynchronous motor is shown. For the implementation of the identification algorithm it is necessary to convert the output voltages of the filters in the voltage phases of the stator winding of the generalized electric machine. It is experimentally determined that the presence of filters low frequency does not introduce significant distortion and allows to obtain the necessary shape of the phase voltages of the generalized electric machine.

Keywords: *identification of parameters, Generalised Electric Machine, coordinate transformation, frequency converter, Asynchronous Three-Phase Motor, the Butterworth filter, pulse width modulation.*

Литература

1. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 272 с.
2. Терехов В. М., Осипов О. И. Системы управления электроприводов. М.: Академия, 2006. 304 с.
3. 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.
4. Афанасьев А. Ю. Моментный электропривод. Казань: Казан. гос. техн. ун-т, 1997. 250 с.
5. Макаров В. Г. Идентификация параметров трехфазного асинхронного двигателя // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 3 – 4. С. 88 – 101.
6. Макаров В. Г. Идентификация параметров и токов ротора трехфазного асинхронного двигателя // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 7 – 8. С. 101 – 116.
7. 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.
8. 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 Казан. гос. технол. ун-т. – № 2010112365/07; заявл. 30.03.2010; опубл. 10.08.2011. Бюл. № 22. 24 с.

9. Макаров В. Г., Яковлев Ю. А. Оценивание параметров трехфазного асинхронного двигателя // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 9. С. 418 – 425.

10. Макаров В. Г. Актуальные проблемы асинхронного электропривода и методы их решения // Вестник Казанского технологического университета. 2011. Т. 14, № 6. С. 79 – 93.

11. 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.

12. Макаров В. Г., Тамбов В. В. Идентификация параметров и скорости вращения трехфазного асинхронного двигателя // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 5 – 6. С. 56 – 64.

13. Макаров В. Г., Яковлев Ю. А. Алгоритм управления автономным инвертором напряжения при идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 22 С. 279 – 282.

14. Дьяконов В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. М.: Наука, 1987. 240 с.

15. Мошиц Г., Хорн П. Проектирование активных фильтров. М.: Мир, 1984. 320 с.

16. Circuits [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.hardwarebook.net/circuit/index.html> (дата обращения: 15.06.2015).

17. Макаров В. Г. Применение теории обобщенной электрической машины к трехфазному асинхронному двигателю // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2009. № 11 – 12. С. 84 – 97.

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

Поступила в редакцию

23 октября 2015 г.

Афанасьев Анатолий Юрьевич – д-р техн. наук, профессор Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева - КАИ (КНИТУ-КАИ). Тел: 8(843) 236-56-53, 8-927-423-54-80. E-mail: afanasiev@electro.kstu-kai.ru.

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.