

---

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

---

УДК 621.313.333

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_04

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ  
ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВУХФАЗНЫМ  
АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ****В.Н. Мещеряков**

ORCID: 0000-0003-0984-5133 e-mail: mesherek@yandex.ru

Липецкий государственный технический университет

*Липецк, Россия***А.С. Белоусов**

ORCID: 0000-0002-9464-2260 e-mail: 011bas962@gmail.com

Липецкий государственный технический университет

*Липецк, Россия***В.Е. Гладышев**

ORCID: 0009-0009-1090-0620 e-mail: vlad.gladyshev.95@mail.ru

Липецкий государственный технический университет

*Липецк, Россия*

Приведены результаты сравнительных экспериментальных исследований работы преобразователя частоты совместно с двухфазным асинхронным двигателем с различными алгоритмами управления. Актуальность исследования определяется тем, что в современной электроприводной технике необходимо повышение регулировочной способности электроприводов переменного тока, в том числе, малой мощности. Число небольших электрических машин, используемых на вспомогательных механизмах, непрерывно увеличивается. Несмотря на малые размеры, их установленная суммарная мощность в бытовых устройствах (сверлильные станки, дрели, шуруповерты и др.) составляет существенную часть мощности всех бытовых электроприемников. Повышение их энергоэффективности за счет регулирования скорости скажется на снижении потерь и улучшении качества энергии сети. Но зачастую маломощные электроприводы являются нерегулируемыми, поскольку выполнены в основном на базе однофазных конденсаторных двигателей, а там, где регулирование является основной задачей, используются двигатели постоянного тока. Электроприводы с маломощным трехфазным асинхронным двигателем и преобразователем частоты, питающимся от однофазной сети, в настоящее время применяются редко. Альтернативным решением данной проблемы является подключение имеющихся

однофазных двигателей к питающей сети через преобразователь. Поскольку управление осуществляется отдельно главной и вспомогательной обмотками статора, такие двигатели называют двухфазными. Преобразователи частоты для двухфазных двигателей исследованы недостаточно полно. Известны некоторые алгоритмы работы их систем управления, основанных на широтно-импульсной модуляции или релейных регуляторах тока, однако требуется сравнение их технико-экономических показателей. Определение оптимального алгоритма работы преобразователя имеет большое практическое значение при разработке регулируемого электропривода на базе двухфазного двигателя.

**Ключевые слова:** двухфазный асинхронный двигатель, однофазный конденсаторный двигатель, преобразователь частоты, регулируемый электропривод, релейный регулятор тока, синусоидальная модуляция.

**Для цитирования:** Мещеряков В.Н., Белоусов А.С., Гладышев В.Е. Сравнительный анализ методов частотного управления двухфазным асинхронным двигателем // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 3. С. 4-22.

DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_04

## COMPARATIVE ANALYSIS OF FREQUENCY CONTROL METHODS FOR TWO-PHASE ASYNCHRONOUS MOTOR

**V.N. Meshcheryakov**

ORCID: 0000-0003-0984-5133 e-mail: mesherek@yandex.ru

Lipetsk State Technical University

*Lipetsk, Russia*

**A.S. Belousov**

ORCID: 0000-0002-9464-2260 e-mail: 011bas962@gmail.com

Lipetsk State Technical University

*Lipetsk, Russia*

**V.E. Gladyshev**

ORCID: 0009-0009-1090-0620 e-mail: vlad.gladyshev.95@mail.ru

Lipetsk State Technical University

*Lipetsk, Russia*

**Abstract.** One of the urgent tasks in modern electric drive technology is the need to increase the adjusting ability of alternating current electric drives, including low power ones. The number of small electric machines used on auxiliary mechanisms is constantly increasing. Despite their small size, their installed total power in household appliances, such as drilling machines, drills, screwdrivers and other devices, is a significant. Increasing their energy efficiency through speed control will reduce losses and improve the power quality. But often low-power electric drives are unregulated, since they are made mainly

on the basis of single-phase capacitor motors, and where regulation is the main task, DC motors are used. Electric drives with a low-power three-phase asynchronous motor and a frequency converter powered by a single-phase network are rarely used today. An alternative solution to this problem is to connect existing single-phase motors to the mains through a converter. Since the control is carried out separately by the main and auxiliary stator windings, such motors are called two-phase. Frequency converters for two-phase motors have not been fully studied, although several algorithms for the operation of their control systems are known, based on various types of pulse-width modulation or relay current controllers, so a comparison of their technical and economic indicators is required. Determining the converter operation optimal algorithm is of great practical importance in the development of an adjustable electric drive based on a two-phase motor. The article presents the results of comparative experimental studies of the operation of a frequency converter together with a two-phase asynchronous motor with various control algorithms.

**Keywords:** adjustable electric drive, relay current controller, single-phase capacitor motor, sinusoidal modulation, two-phase asynchronous motor, frequency converter.

**For citation:** V.N. Meshcheryakov, A.S. Belousov and V.E. Gladyshev, “Comparative analysis of frequency control methods for two-phase asynchronous motor”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 4-22, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_04

## I. Введение

Сверление – одна из самых распространенных технологических операций в машиностроении, а также при выполнении ремонтных работ в домашнем хозяйстве. Основной тип двигателя в дрелях – двигатели постоянного тока и коллекторные двигатели переменного тока [1], но сложность обслуживания коллектора и замены щеток обуславливает использование в современных дрелях и шуруповертах синхронных двигателей с постоянными магнитами, регулируемых от преобразователей частоты (ПЧ) [2], цена бесщеточного инструмента при этом выше. В стационарных сверлильных станках малой мощности в основном применяются нерегулируемые приводы с однофазными конденсаторными двигателями [3].

Примером такого устройства является вертикально-сверлильный станок «Корвет-48», электропривод которого выполнен на базе конденсаторного двигателя К-48 (мощность 550 Вт, скорость вращения 1340 об/мин) [4], который подключался напрямую к бытовой однофазной сети. В зависимости от вида обрабатываемого материала у станка предусмотрено 6 скоростей вращения шпинделя, переключение которых осуществляется вручную переустановкой ремня на шкивы разного диаметра. Для этого необходимо отключать станок от сети, вскрывать верхний кожух, переставлять ремень, натягивать его [4]. Эта операция небезопасна и занимает значительное время, при изготовлении сложных изделий она многократно повторяется. Применение регулируемого электропривода с ПЧ существенно упростило

бы работу на данном станке, скорость вращения шпинделя было бы возможно задавать на панели управления и регулировать непосредственно во время сверления, без дополнительных остановок. Один ПЧ можно использовать для нескольких инструментов, что компенсирует стоимость его установки [3]. Во избежание удорожания установки предпочтительно подключать ПЧ к существующему двигателю, а не приобретать новый трехфазный.

Разработки преобразователя частоты и системы управления для двухфазного электропривода, исследования особенностей работы двухфазных двигателей переменного тока, анализ сферы применения регулируемых двухфазных приводов в тяговых механизмах на электротранспорте представлены в трудах Е.В. Качалиной, В.Я. Беспалова, М.И. Стальной. В публикациях зарубежных авторов [5-7] исследованы улучшенные алгоритмы управления широтно-импульсной модуляции для минимизации коммутаций ключами двух инверторов, питающих обмотки двухфазного двигателя. В этих работах не рассматривалась возможность применения стандартного трехфазного преобразователя частоты для управления двухфазным двигателем, что требует разработки нестандартных алгоритмов управления инвертором. Системы управления двухфазным двигателем на основе релейных регуляторов тока ранее не рассматривались, что определяет актуальность данного исследования.

## II. Материалы и методы

Однофазный двигатель имеет основную и вспомогательную обмотки [8] (рис. 1), при подключении к ПЧ фазосдвигающий конденсатор исключается из цепи, а фазовый сдвиг должен обеспечиваться специальным алгоритмом системы управления (СУ) [6, 7].

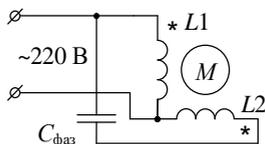


Рис. 1. Подключение однофазного коллекторного двигателя к сети

Fig. 1. Connection of a single-phase asynchronous motor to the power grid

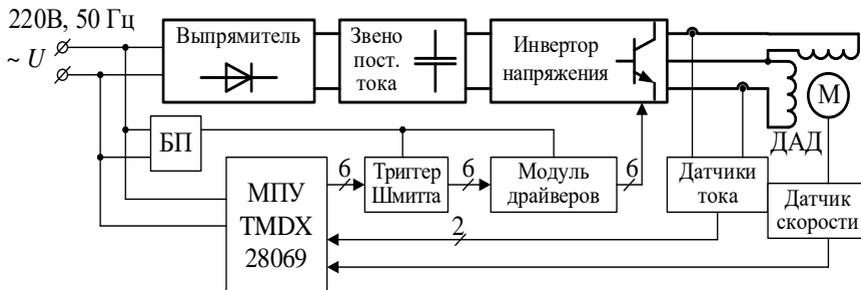
При подобном отдельном управлении от ПЧ основной и вспомогательной обмотками двигатель считается двухфазным асинхронным двигателем (ДАД). ДАД может подключаться к ПЧ с двух-, трех- или четырехстоечным инвертором напряжения. ПЧ с трехстоечным инвертором является обычным трехфазным ПЧ со специальным алгоритмом управления, он предпочтителен за счет меньшего числа полупроводников, чем у четырехстоечного инвертора, и подачи на ДАД большей полезной мощности, чем у двухстоечного [8, 9].

Самым простым и распространенным алгоритмом управления ДАД является синусоидальная широтно-импульсная модуляция (СШИМ). Она основана на сравнении высокочастотного опорного сигнала с синусоидальными сигналами задания токов и генерации управляющих сигналов для ключей инвертора на его основе [10, 11]. Другой популярный алгоритм управления ДАД – пространственно-векторная ШИМ (ПВШИМ). Ее принцип действия основан на определении действующих в данный момент времени пространственных векторов напряжений и расчете на их основе времени нахождения ключей инвертора в закрытом состоянии. СУ формирует управляющие сигналы по заранее определенным шаблонам коммутации. Данный способ управления позволяет достичь максимального напряжения обмоток двигателя с малыми гармоническими искажениями токов статора [7, 12, 13].

Еще один способ управления ДАД – применение релейных регуляторов тока (РРТ). В данной СУ сигналы задания токов сравниваются с обратной связью, а их разности поступают на релейные регуляторы, представленные гистерезисными блоками [14], мгновенные значения токов статора колеблются в пределах заданной зоны гистерезиса. При расширении пределов этих зон частота коммутации снижается, что весьма важно для мало-мощных устройств, поскольку высокая частота требует применения более мощных радиаторов охлаждения, что приводит к увеличению габаритов силовой части ПЧ и удорожанию изделий [15].

Экспериментальные исследования работы ДАД от трехфазного ПЧ с релейным алгоритмом управлением на основе РРТ, результаты теоретических исследований которого изложены авторами в [16-18], сравнивались с результатами работы того же электропривода, но с системой управления на основе СШИМ. Эксперименты проводились при работе двигателя на холостом ходу и при приложении переменной нагрузки на различных частотах в диапазоне от 10 до 100 % номинальной скорости.

Структурная схема электропривода на базе двухфазного двигателя и трехфазного ПЧ показана на рис. 2. Силовая часть состоит из мостового диодного выпрямителя; звена постоянного тока с конденсатором емкостью 2,2 мФ; инвертора напряжения, представленного шестью *IGBT*-транзисторами с обратными диодами; однофазного двигателя К-48 без фазосмещающего конденсатора. Рассчитанные номинальные токи двух фаз статора составили 1,8 А. После отключения конденсатора общая точка двух обмоток двигателя, ранее подключаемая к нейтрали сети, подключается к средней стойке инвертора, а начала обмоток подключаются к фазным стойкам: основная обмотка – к первой стойке, вспомогательная – к третьей.



**Рис. 2. Структурная схема электропривода на базе двухфазного двигателя и трехфазного ПЧ**

**Fig. 2. Structural diagram of an electric drive based on a two-phase motor and a three-phase frequency converter**

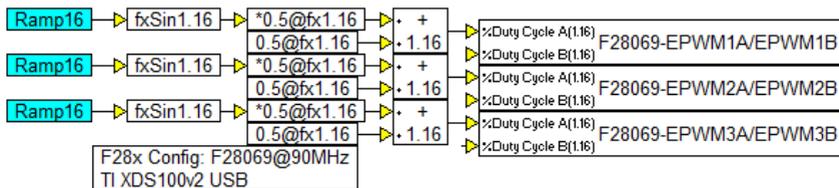
СУ включает в себя микропроцессорное устройство (МПУ) TMDX28069, которое выполняет типовую роль контроллера ПЧ. Данное устройство предназначено для обработки сигналов с датчиков токов двух фаз и служит для передачи управляющих сигналов на модуль драйверов ДР7120-П-А. Для согласования уровней напряжения между ними был включен триггер Шмитта. Для питания электроники применялся блок питания, выдающий напряжение 5 В и 15 В. На валу двигателя был установлен датчик скорости, представленный тахогенератором Д-4. Внешний вид основной части экспериментальной установки показан на рис. 3. Для нагрузки двигателя использовался механический тормоз.



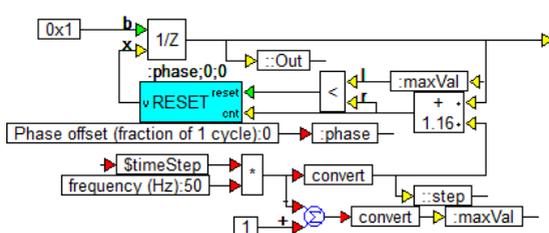
**Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки**

**Fig. 3. Appearance of the test bench**

Управляющая программа для МПУ представляет собой код, сгенерированный на основе компьютерной модели СШИМ, разработанной в программном продукте *EMBED SolidThinking* (рис. 4). Настройка блока ШИМ в системе управления с СШИМ представлена на рис. 5.



Модель СШИМ для трехфазного инвертора



Блок Ramp16 задания синусоиды тока одной фазы

**Рис. 4. Управляющая программа для системы управления двухфазным двигателем на основе синусоидальной ШИМ**

**Fig. 4. Control program for a two-phase motor control system based on sinusoidal PWM**

Компьютерная модель СШИМ состоит из блока настройки подключения к используемому МПУ и трех ветвей формирования ШИМ для ключей трех стоек инвертора. На блоки ШИМ поступают синусоидальные функции сигналов напряжения, формируемых в блоках *Ramp16*. Эти сигналы представляют собой интегралы по времени от требуемой частоты сети (50 Гц) с фазовыми смещениями и ограничением нарастания. В этой функции нет перевода в радианы, поэтому смещение сигналов задается как доля полного периода: 0, 0,25 и 0,5 для трех синусоид. После масштабирования синусоиды заданных напряжений подаются на входы блоков ШИМ, настройка которых позволяет формировать синусоидальную ШИМ с опорной частотой 4 кГц для ключей верхней группы и работой нижних ключей в протифазе с верхними.

PWM Unit: 1  Use High Res Timer

Time Base  
 Rate Scaling: None Count Mode: Up  
 Timer Period: 22000 4.09091kHz  Change Period Dynamically  
 TBCTR=TBPHS on SYNC1 pulse TBPHS (phase): 0  
 Change Phase Dynamically EPWMSYNCO pin: GPIO0  
 EPWMSYNCO: EPWMSYNCO pin: Unused  
 CMPA Load On: CTR = Zero CMPB Load On: CTR = Zero

Action Qualifier:

	CMPA		CMPB		P	GPIO Pin
	Z	up down	up down			
EPWMA:	1	0 X	X X	X	X	GPIO0
EPWMB:	0	1 X	X X	X	X	GPIO1

Deadband:  
 Delay Mode: Disabled  
 Polarity: No Inversion  
 Input Select: DbA in = PWMA, DbB in = PWMA  
 Rising Edge Delay (0-1023): 0 Falling Edge Delay (0-1023): 0

Рис. 5. Настройка блока ШИМ в системе управления с СШИМ

Fig. 5. Settings of the PWM block in the control system of a two-phase asynchronous motor with sinusoidal PWM

Алгоритм управления ДАД на основе PPT был реализован на основе патента [16] и подробно описывался в [17, 18]. Он основан на принципе разделения одного периода синусоид на четыре равных участка в зависимости от знака мгновенных значений токов в обмотках двух фаз. На каждом из них определяется наиболее предпочтительный путь протекания токов через ключи инвертора и обмотки двигателя таким образом, чтобы поддерживать действующие знаки мгновенных токов максимально большое время. При обеспечении протекания токов по этому пути будет поддерживаться минимально возможная частота коммутаций. Наряду с основным контуром токов, для каждого из участков определяются еще три дополнительных контура, возникающих при переключении двух гистерезисных регуляторов тока. Отличие состоит в том, что в отдельных состояниях оба ключа одной стойки могут быть разомкнуты для минимизации частоты коммутаций. Всего возможно 16 контуров протекания токов, которые реализуются за счет 16 состояний ключей инвертора (табл. 1). Значения выходов гистерезисных блоков определяются как:

$$\begin{cases} I_{1a}^* - I_{1a} \geq h/2, & \Delta h_a = 1 \\ I_{1b}^* - I_{1b} \geq h/2, & \Delta h_b = 1 \end{cases}, \quad (1)$$

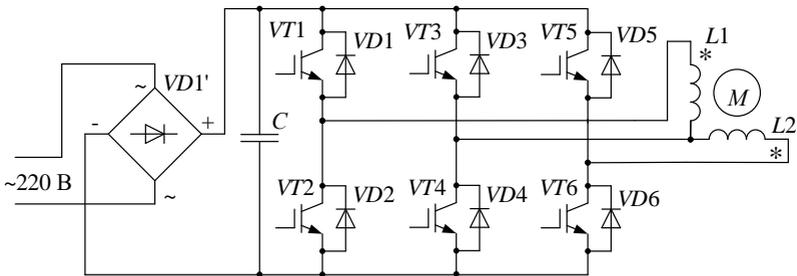
где  $h$  – устанавливаемая ширина зоны гистерезиса;  $\Delta h_a$ ,  $\Delta h_b$  – значения на выходах релейных регуляторов токов фаз  $a$  и  $b$  соответственно.

**Таблица 1.**  
Состояние ключей инвертора при РРТ

**Table 1.**  
Status of inverter switches for a control system with relay current controller

Участок синусоид токов	Состояния выходов гистерезисных блоков																											
	$\Delta h_a=1,$ $\Delta h_b=1$	$\Delta h_a=1,$ $\Delta h_b=0$	$\Delta h_a=0,$ $\Delta h_b=0$	$\Delta h_a=0,$ $\Delta h_b=1$																								
$I_a < 0,$ $I_b \geq 0$	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	0	0	1	0	1	0	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	0	0	0	0	1	1	<table border="1"><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	0	1	0	1	0	1	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	0	0	1	1	0	0
0	0	1																										
0	1	0																										
0	0	0																										
0	1	1																										
0	1	0																										
1	0	1																										
0	0	1																										
1	0	0																										
$I_a \geq 0,$ $I_b \geq 0$	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	0	0	0	0	1	0	<table border="1"><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	1	0	0	0	1	1	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	0	0	0	1	0	1	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	0	0	1	1	1	0
0	0	0																										
0	1	0																										
1	0	0																										
0	1	1																										
0	0	0																										
1	0	1																										
0	0	1																										
1	1	0																										
$I_a \geq 0,$ $I_b < 0$	<table border="1"><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	1	0	1	0	1	0	<table border="1"><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	1	1	0	0	0	1	<table border="1"><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	0	1	0	0	0	0	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	0	0	0	1	1	0
1	0	1																										
0	1	0																										
1	1	0																										
0	0	1																										
0	1	0																										
0	0	0																										
0	0	0																										
1	1	0																										
$I_a < 0,$ $I_b < 0$	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	0	0	0	0	1	0	<table border="1"><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	0	1	0	0	0	1	<table border="1"><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	0	1	0	1	0	1	<table border="1"><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	0	1	1	0	0	0
0	0	0																										
0	1	0																										
0	1	0																										
0	0	1																										
0	1	0																										
1	0	1																										
0	1	1																										
0	0	0																										

Значения в таблицах, расположенных в ячейках табл. 1, соответствуют состояниям ключей трехплечего инвертора, расположенным в локациях, соответствующих рис. 6. Состояния каждого из 6 ключей инвертора можно выразить через гистерезисные функции разницы мгновенных значений токов статора и их заданий (табл. 2). Реализация переключения этих функций и будет являться алгоритмом управления ДАД по принципам РРТ.



**Рис. 6.** Подключение двухфазного двигателя к трехфазному ПЧ

**Fig. 6.** Connection of a two-phase motor to a three-phase inverter

Таблица 2.  
Функции состояния ключей инвертора при PPT

Table 2.  
Inverter switches state functions for a control system with relay current controller

Номер ключа	Номер участка синусоид			
	1	2	3	4
VT1	$\Delta h_a \wedge \overline{\Delta h_b}$	$\Delta h_a$	0	0
VT2	$\Delta h_a$	$\overline{\Delta h_a} \wedge \Delta h_b$	$\overline{\Delta h_a}$	$\overline{\Delta h_a}$
VT3	0	$\overline{\Delta h_b}$	$\overline{\Delta h_a} \wedge \overline{\Delta h_b}$	$\overline{\Delta h_a} \wedge \overline{\Delta h_b}$
VT4	$\overline{\overline{\Delta h_a} \wedge \overline{\Delta h_b}}$	$\Delta h_b$	$\Delta h_a \wedge \Delta h_b$	$\overline{\overline{\Delta h_a} \wedge \overline{\Delta h_b}}$
VT5	$\Delta h_b$	$\Delta h_a \wedge \Delta h_b$	$\overline{\Delta h_a} \wedge \Delta h_b$	$\Delta h_b$
VT6	$\overline{\Delta h_b}$	$\overline{\Delta h_b}$	$\overline{\Delta h_b}$	$\overline{\Delta h_b}$

Управляющая программа в *EMBED SolidThinking* показана на рис. 7.

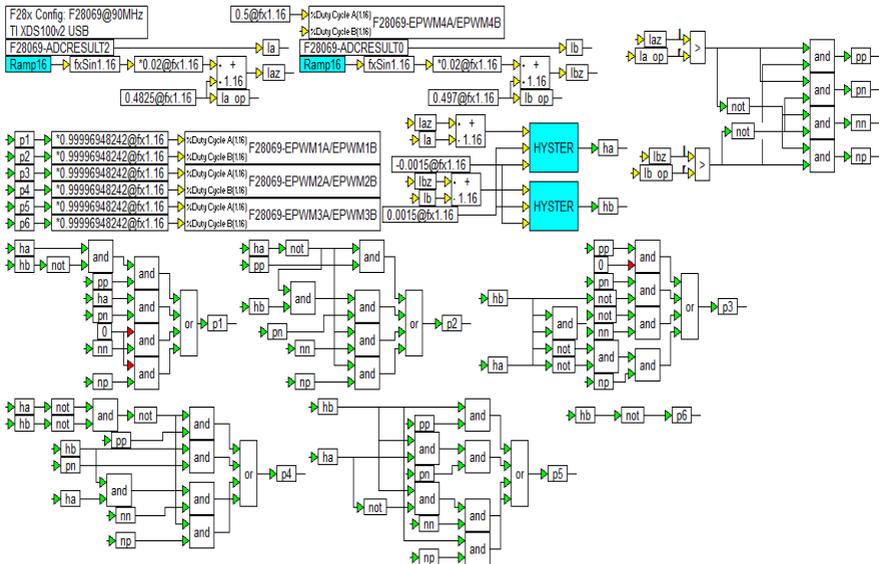


Рис. 7. Управляющая программа для системы управления двухфазным двигателем на основе релейных регуляторов тока

Fig. 7. Control program for a two-phase motor control system based on relay current controller

Настройка блока ШИМ для реализации РРТ показана на рис. 8. В этой программе заданные токи  $I_{az}$ ,  $I_{bz}$  сравниваются с опорными значениями с датчиков тока  $I_{a\_op}$ ,  $I_{b\_op}$ , которые считаются нулевыми. По знакам токов задания в этой системе координат определяется текущий участок синусоид из набора  $pp$ ,  $pn$ ,  $nt$ ,  $np$ . После включения ПЧ на аналоговые входы начинают поступать мгновенные значения токов двух фаз  $I_a$ ,  $I_b$ . Разницы заданных и фактических токов подаются на разработанные блоки гистерезисных регуляторов, выходами которых являются дискретные сигналы  $ha$ ,  $hb$ . Зона гистерезиса определена равной 5 % от амплитуды заданных синусоид. На основе рассчитываемых в МПУ значений  $pp$ ,  $pn$ ,  $nt$ ,  $np$  и  $ha$ ,  $hb$  по разработанному алгоритму РРТ формируются управляющие импульсы  $p_1$ , ...,  $p_6$  для ключей инвертора. Эти импульсы, пройдя через блоки конвертации, попарно поступают в блоки ШИМ цифровых выходов МПУ.

280x ePWM Properties

PWM Unit: 1  Use High Res Timer

Time Base  
Rate Scaling: None Count Mode: Up

Timer Period: 3000 30kHz  Change Period Dynamically

TBCTR=TBPHS on SYNC1 pulse TBPHS (phase): 0

Change Phase Dynamically EPWMSYNC1 pin: GPIO0

EPWMSYNC0: EPWMSYNC1 EPWMSYNC0 pin: Unused

CMPA Load On: CTR = Zero CMPB Load On: CTR = Zero

Action Qualifier:

	CMPA		CMPB		P	GPIO Pin
	Z	up	down	up	down	
EPWMA:	1	0	X	X	X	GPIO0
EPWMB:	1	X	X	0	X	GPIO1

Deadband:  
Delay Mode: Disabled

Polarity: No Inversion

Input Select: DbA in = PWMB, DbB in = PWMA

Rising Edge Delay (0-1023): 100 Falling Edge Delay (0-1023): 100

Рис. 8. Настройка блока ШИМ в системе управления ДАД с РРТ

Fig. 8. Settings of the PWM block in the control system of a two-phase asynchronous motor with relay current controller

### III. Результаты исследования

Сгенерированный компьютерный код для СШИМ и РРТ поочередно записывался в МПУ, после чего проводилась серия экспериментов регулирования скорости ДАД путем изменения частоты напряжения на выходе ПЧ при приложении к валу двигателя переменной нагрузки, изменяющейся от нуля до номинального значения. Были получены наборы характеристик для 50 Гц, 40 Гц, 30 Гц, 20 Гц, 10 Гц и 5 Гц, т.е. регулирование проводилось в

диапазоне от 10 до 100 % номинальной скорости. Графики токов двух фаз статора для СУ с ШИМ и с PPT представлены на рис. 9 и 10 соответственно, а на рис. 11 показано семейство электрохимических характеристик ДАД, выведенных в ходе регрессионного анализа снятых точек [19].

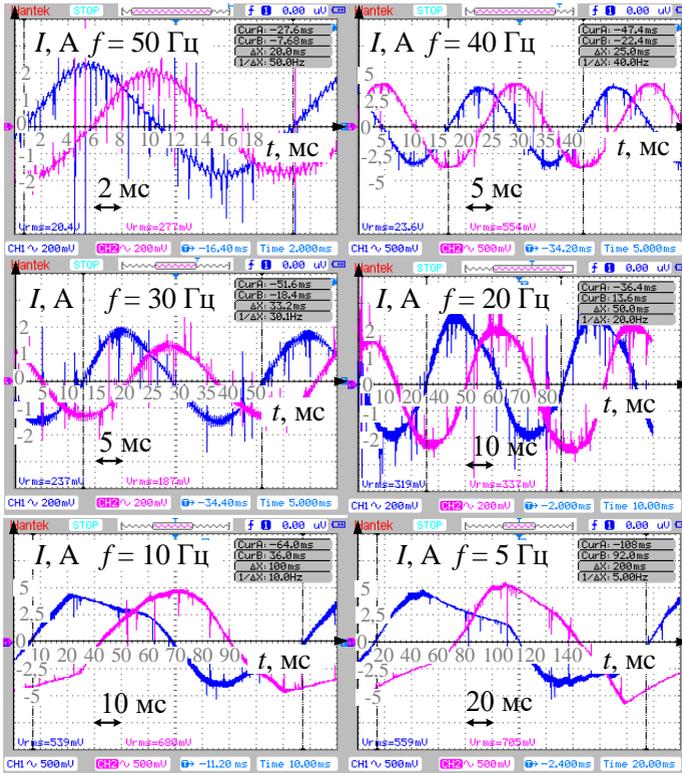


Рис. 9. Токи статора ДАД при управлении ШИМ

Fig. 9. Two-phase asynchronous motor stator currents for controlling with sinusoidal PWM

Поведение электрохимических характеристик у двухфазного двигателя, типовое для двигателей переменного тока при частотном регулировании, следующее: со снижением заданных частоты и напряжения, связанных по закону  $u/f = \text{const}$ , снижаются скорость идеального холостого хода и максимальный ток статора, характеристики опускаются вниз по оси ординат. На низких частотах значения пускового и максимального тока крайне малы, для обеспечения стабильной работы двигателя под нагрузкой в этой зоне требуется учет  $IR$ -компенсации в СУ.

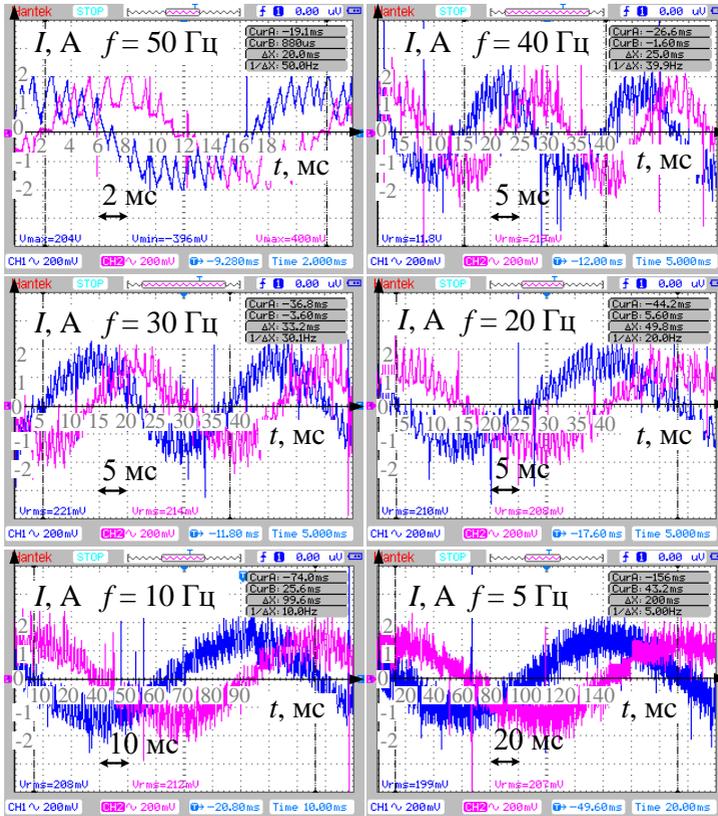


Рис. 10. Токи статора ДАД при управлении PPT

Fig. 10. Two-phase asynchronous motor stator currents for controlling with relay current controller

Графики переходных процессов показывают, что разработанный ПЧ обеспечивает регулирование ДАД с соблюдением заданной выходной частоты инвертора. При управлении по алгоритму ШИМ на частотах ниже 30 Гц начинаются гармонические искажения токов, на еще более низких частотах синусоиды сильно искривляются. Видно, что в этом случае коэффициент гармонического искажения превышает 10 %, что считается пределом нормального режима работы двигателя в сети [20]. При коэффициенте гармонического искажения больше 50 % работа с таким алгоритмом без фильтрокомпенсирующих устройств в зоне низких частот недопустима [21]. В алгоритме с PPT этого не происходит. При снижении частоты общая

форма токов статора остается синусоидальной, но увеличиваются мгновенные колебания внутри зоны гистерезиса. На частотах, близких к номинальным, частота коммутации ключей инвертора при алгоритме с PPT заметно ниже, поскольку мгновенные значения токов колеблются в достаточно широкой гистерезисной зоне.

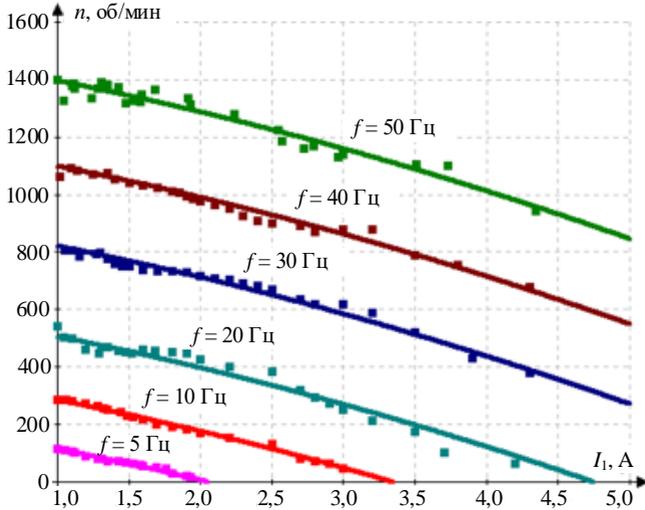


Рис. 11. Электромеханические характеристики двухфазного двигателя при регулировании частоты

Fig. 11. Electromechanical characteristics of a two-phase motor with frequency control

#### IV. Выводы

Обеспечение станков и маломощных устройств регулируемым двигателем ранее чаще всего рассматривалось как комплексная работа модернизации устройства с установкой трехфазного двигателя и преобразователя частоты. Однако такой подход не учитывал возможности регулирования скорости ранее установленных однофазных конденсаторных двигателей при подключении их к преобразователю частоты. Выполненные исследования показали, что альтернативным вариантом, использующим имеющийся двигатель, является применение преобразователя частоты с разработанным нестандартным алгоритмом управления.

*Поступила в редакцию 21.03.2023*

*Принята к публикации 06.04.2023*

*Received 21.03.2023*

*Accepted 06.04.2023*

### **Библиографический список**

- [1] Белов В.М., Бренцис Э.А., Лейманис У.Я., Силиневич И.Я., Узарс В.Я., Феоктистов В.П. Электропривод ручного электроинструмента, патент SU 1771055 A1, заявл. 31.01.91; опубл. 23.10.92. – Бюл. № 39.
- [2] Новокшенов В.С., Цукублин Ф.Б. Синхронный бесщеточный преобразователь частоты // Известия Томского Ордена Трудового Красного Знамени Политехнического Института имени С.М. Кирова. 1965. Т. 132. С. 43-51.
- [3] Присмотров Н.И., Ларионов В.Н. Электропривод ручного электроинструмента по системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель // Вестник Чувашского Университета. 2005. № 2. С. 181-189.
- [4] Лопухина Е.М. Асинхронные исполнительные микродвигатели для систем автоматики. М.: Высшая школа, 1988. – 328 с.
- [5] Ziaeiinejad S., Sangsefidi Y., Shoulaie A. Performance analysis of DTC methods of two-phase induction motors with different inverter topologies // proc. 2012 3rd Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC), Feb. 15-16, 2012, Tehran, Iran: IEEE, 2012. P. 121-126. DOI: 10.1109/PEDSTC.2012.6183310
- [6] Jang D.H. Problems incurred in a vector-controlled single-phase induction motor, and a proposal for a vector-controlled two-phase induction motor as a replacement // IEEE Transactions on Power Electronics. 2013. Vol. 28. No. 1. P. 526-536. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2199772
- [7] Umredkar S., Junghare A. and Renge M. Operation of symmetrical and asymmetrical two-phase induction motor by using 3-leg voltage source inverter // Trends in Renewable Energy. 2018. Vol. 4. No. 3. P. 64-76. DOI: 10.17737/tre.2018.4.3.0057
- [8] Корвет 48. Станок вертикально-сверлильный. Руководство по эксплуатации. Артикул 90480 // ООО «ЭНКОР-Инструмент-Воронеж». [Электронный ресурс]. URL: <https://user-manuals.ru/manual/126429/enkor-korvet-48?ysclid=lgkra6adpb49571952> (дата обращения 15.02.2023).
- [9] Hayakwong E., Kinnares V. PV powered three-leg VSI fed asymmetrical parameter type two-phase induction motor // proc. 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Oct. 22-25, 2014, Hangzhou, China: IEEE, 2014. P. 3220-3225. DOI: 10.1109/ICEMS.2014.7014047
- [10] Томасов В.С., Усольцев А.А., Вертегел Д.А., Денисов К.М. Исследование пульсаций электромагнитного момента в прецизионном сервоприводе при синусоидальной широтно-импульсной модуляции // Научно-технический Вестник Информационных Технологий, Механики и Оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 359-368. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-359-368
- [11] Тяпин А.А., Кинев Е.С. IGBT-инвертор с биполярной синусоидальной ШИМ для двухфазной линейной МГД-машины // Сборник научных трудов III Международ. науч.-практ. конф. «САПР и моделирование в современной электронике», Октябрь 24-25, 2019, Брянск, Россия: БГТУ, 2019. С. 96-102. DOI: 10.30987/conferencearticle\_5e028210dbc298.14572422

- [12] Ramesh V., Anjappa P., Swathi K.R., Reddy R.L., Sambasivarao B. Space vector pulse width modulation (SVPWM) using two leg inverter for split-phase induction motor // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2014. Vol. 5. No. 5. P. 660-664.
- [13] Lin H., Zhao F., Kwon B. Space-vector PWM techniques for a two-phase permanent magnet synchronous motor considering a reduction in switching losses // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2015. Vol. 10. No. 3. P. 905-915. DOI: 10.5370/JEET.2015.10.3.905
- [14] Мешеряков В.Н., Воеков В.Н. Векторная система управления вентильным электроприводом на базе автономного инвертора напряжения с релейным регулированием входного тока инвертора и фазных токов статора // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 2. С. 48-57. DOI: 10.14529/power170207
- [15] Dobrucki B., Laskody T., Konarik R. Two-phase inverters with minimum switching devices // Recent Developments on Power Inverters, Saghafinia A. Zagreb: IntechOpen, 2017. DOI: 10.5772/67743
- [16] Мешеряков В.Н., Белоусов А.С. Способ управления двухфазным электроприводом переменного тока с помощью трехфазного мостового инвертора. Пат. RU 2682242, заявл. 19.03.18; опубл. 18.03.19. – Бюл. № 8.
- [17] Мешеряков В.Н., Белоусов А.С. Разработка алгоритма управления трехфазным инвертором двухфазного электропривода для снижения числа коммутаций ключевых элементов // Вестник ИГЭУ. 2019. № 3. С. 49-61. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.3.049-061
- [18] Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Valtchev S., Kryukov O.V. Development of a control algorithm for three-phase inverter in two-phase electric drives reducing the number of commutations // proc. 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Nov. 20-22, 2019, Lipetsk, Russia: IEEE, 2019. P. 444-449. DOI: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947487
- [19] Дрейпер Н.Р., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1986. – 351 с.
- [20] Meshcheryakov V.N., Evseev A.M., Boikov A.L. Active energy filter for compensation of harmonic distortion in motor soft starter // proc. 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED), Mar. 26-30, 2018, Ekaterinburg, Russia: IEEE, 2018. P. 1-5. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341701
- [21] Valtchev S., Kryukov O.V., Meshcheryakov V.N., Belousov A.S. Comparative analysis of electric drives control systems applied to two-phase induction motors // proc. 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Nov. 11-13, 2020, Lipetsk, Russia: IEEE, 2020. P. 918-922. DOI: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280637

## References

- [1] V.M. Belov, E.A. Brentsis, U.Ya. Leimanis, I.Ya. Silinevich, V.Ya. Uzars and V.P. Feoktistov, “*Elektroprivod ruchnogo elektroinstrumenta [The electric drive of a hand-held power tool]*”, Patent SU 1771055 A1, Oct. 23, 1992 (in Russian).

- [2] V.S. Novokshenov and A.B. Tsukublin, “Sinhronnyj besshchetochnyj preobrazovatel' chastoty [Synchronous brushless frequency converter]”, *Izvestiya Tomskogo ordena trudovogo krasnogo znamenii politekhnicheskogo instituta imeni S.M. Kirova [Bulletin of the Tomsk Order of the Red Banner of Labor of the Polytechnic Institute named after S.M. Kirov]*, vol. 132, pp. 43-51, 1965 (in Russian).
- [3] N.I. Prysmotrov and V.N. Larionov, “Elektroprivod ruchnogo elektroinstrumenta po sisteme preobrazovatel' chastoty – asinhronnyj dvigatel' [The electric drive of a hand-held power tool according to the system frequency converter – asynchronous motor]”, *Vestnik Chuvashskogo Universiteta*, no. 2, pp. 181-189, 2005 (in Russian).
- [4] E.M. Lopukhina, *Asinhronnye ispolnitel'nye mikrodvigateli dlya sistem avtomatiki [Asynchronous executive micromotors for automation systems]*. Moscow: Higher school, 1988 (in Russian).
- [5] S. Ziaeinejad, Y. Sangsefidi and A. Shoulaie, “Performance analysis of DTC methods of two-phase induction motors with different inverter topologies,” in proc. *2012 3rd Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC)*, Feb. 15-16, 2012, Tehran, Iran, pp. 121-126. DOI: 10.1109/PEDSTC.2012.6183310
- [6] D.H. Jang, “Problems incurred in a vector-controlled single-phase induction motor, and a proposal for a vector-controlled two-phase induction motor as a replacement”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 1, pp. 526-536, May 2013. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2199772
- [7] S. Umredkar, A. Junghare and M. Renge, “Operation of symmetrical and asymmetrical two-phase induction motor by using 3-leg voltage source inverter”, *Trends in Renewable Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 64-76, 2018. DOI: 10.17737/tre.2018.4.3.0057
- [8] Korvet 48. Stanok vertikal'no-sverlil'nyj. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Artikel 90480 [Korvet 48. Vertical drilling machine. Manual. Vendor code 90480]. [Online]. Available at: <https://user-manuals.ru/manual/126429/enkor-korvet-48?ysclid=lgkpa6adpb49571952> [Accessed: Feb. 15, 2023] (in Russian).
- [9] E. Hayakwong and V. Kinnares, “PV powered three-leg VSI fed asymmetrical parameter type two-phase induction motor”, in proc. *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Oct. 22-25, 2014, Hangzhou, China, pp. 3220-3225. DOI: 10.1109/ICEMS.2014.7014047
- [10] V.S. Tomasov, A.A. Usoltsev, D.A. Vertegel and K.M. Denisov, “Study of electromagnetic torque pulsations in precision servo drives with sinusoidal pulse-width modulation”, *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, vol. 19, no. 2, pp. 359-368, 2019. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-359-368
- [11] A.A. Tyapin and E.S. Kinev, “IGBT inverter with bipolar sinusoidal PWM for two phase linear MHD machine”, in proc. *III Int. scientific and practical conf. “CAD/EDA, Modeling and Simulation in Modern Electronics”*, Oct. 24-25, 2019, Bryansk, Russia, pp. 96-102 (in Russian). DOI: 10.30987/conferencearticle\_5e028210dbc298.14572422
- [12] V. Ramesh, P. Anjappa, K.R. Swathi, R.L. Reddy and B. Sambasivarao, “Space vector pulse width modulation (SVPWM) using two leg inverter for split-phase induction motor,” *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 5, no. 5, pp. 660-664, May 2014.

- [13] H. Lin, F. Zhao and B. Kwon, "Space-vector PWM techniques for a two-phase permanent magnet synchronous motor considering a reduction in switching losses", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 905-915, May 2015. DOI: 10.5370/JEET.2015.10.3.905
- [14] V.N. Meshcheryakov and V.N. Voekov, "Rectifier drive vector control system based on self-commutated voltage inverter with relay regulator of input inverter current and current on stator phases", *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 48-57, 2017. DOI: 10.14529/power170207
- [15] B. Dobrucku, T. Laskody and R. Konarik, "Two-phase inverters with minimum switching devices", in *Recent Developments on Power Inverters*, A. Saghafinia, Zagreb: Intech Open, 2017. DOI: 10.5772/67743
- [16] V.N. Meshcheryakov and A.S. Belousov, "Two-phase AC drive controlling method using the three-phase bridge inverter", Patent RU 2682242 C1, Mar. 18, 2019.
- [17] V.N. Meshcheryakov and A.S. Belousov, "Development of a control algorithm for the three-phase inverter of the two-phase electric drive for reducing the number of switching elements", *Vestnik IGEU*, no. 3, pp. 49-61, 2019. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.3.049-061
- [18] A.S. Belousov, V.N. Meshcheryakov, S. Valtchev and O.V. Kryukov, "Development of a control algorithm for three-phase inverter in two-phase electric drives reducing the number of commutations", in proc. *2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, Nov. 20-22, 2019, Lipetsk, Russia, pp. 444-449. DOI: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947487
- [19] N.R. Draper and G. Smith, *Applied Regression Analysis*. Moscow: Finance and statistics, 1986.
- [20] V.N. Meshcheryakov, A.M. Evseev and A.I. Boikov, "Active energy filter for compensation of harmonic distortion in motor soft starter", in proc. *2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)*, Mar. 26-30, 2018, Ekaterinburg, Russia, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341701
- [21] S. Valtchev, O.V. Kryukov, V.N. Meshcheryakov and A.S. Belousov, "Comparative analysis of electric drives control systems applied to two-phase induction motors", in proc. *2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, Nov. 11-13, 2020, Lipetsk, Russia, pp. 918-922. DOI: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280637

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**  
**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Мещеряков Виктор Николаевич**, доктор технических наук, профессор Липецкого государственного университета, г. Липецк, Российская Федерация

**Viktor N. Meshcheryakov**, D. Sci. (End.), head of the chair of the Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

**Белоусов Алексей Сергеевич**, кандидат технических наук, ассистент Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, Российская Федерация

**Aleksey S. Belousov**, Cand. Sci. (End.), assistant of the Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

**Гладышев Владислав Евгеньевич**, аспирант Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, Российская Федерация

**Vladislav E. Gladyshev**, postgraduate student of the Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation