

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА В БЕЗДАТЧИКОВОЙ СИСТЕМЕ ИМПУЛЬСНО-ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ*

Ю.С. Усынин, Т.А. Козина, А.В. Валов, С.П. Лохов
г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет

DETERMINATION OF INITIAL ANGULAR POSITION OF THE ROTOR IN THE SENSORLESS IMPULSE-VECTORIAL CONTROL OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH WOUND ROTOR

Y.S. Usynin, T.A. Kozina, A.V. Valov, S.P. Lokhov
Chelyabinsk, South Ural State University

Описывается метод косвенного определения начального углового положения ротора в системе импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором, основанный на использовании угловых зависимостей действующих значений напряжений на обмотках двигателя.

Ключевые слова: бездатчиковая система управления, вычислитель положения, начальное угловое положение ротора, импульсно-векторное управление.

The indirect detector method of initial angular position of the rotor in the impulse-vectorial control of asynchronous electric drive with wound rotor, based on the use of angular characteristics of motor windings voltages, is described.

Keywords: sensorless control system, position evaluator, initial angular position of the rotor, impulse-vectorial control.

Введение. Существует большая группа механизмов, у которых работа на низких скоростях вращения сопровождается малыми нагрузками, и при работе в этой зоне не требуется большой точности поддержания скорости. В первую очередь, речь идет о тех приводах, которые нецелесообразно отключать, а необходимо переводить на пониженную скорость. Это – вентиляторы в промышленных зданиях, эксгаустеры в кислородно-конвертерных цехах, ленточные транспортеры и др. Для таких механизмов хорошо подходит вариант импульсно-векторного электропривода, описанный в [1], поскольку он недорогой, не содержит избыточных регулировочных возможностей и обладает малым энергопотреблением в режимах пониженных скоростей.

Существенным недостатком импульсно-векторной системы управления асинхронным двигателем с фазным ротором [1] является наличие датчика положения ротора, обусловленное принципом работы системы. Бездатчиковая схема импульсно-векторного регулирования позволит использовать типовой асинхронный двигатель с фазным ротором, что упростит замену и эксплуатацию электропривода. Отдельной задачей реализа-

ции бездатчиковой системы управления является задача косвенного определения начального углового положения ротора α_0 .

Задача косвенного вычисления α_0

Косвенный вычислитель α_0 должен, используя доступные для прямого измерения электрические переменные, определять, в каком из шести секторов находится ротор в начальный момент времени и какие статорные обмотки необходимо подключить к ротору, чтобы создать максимальный двигательный момент, стремящийся повернуть двигатель в заданном направлении.

Функциональная диаграмма вычислителя, приведенная на рис. 1, поясняет задачу косвенного определения положения. Например, вектор МДС ротора F_r находится в шестом секторе и имеет начальное угловое положение $\alpha_0 = 240^\circ$. Чтобы создать максимальный электромагнитный момент двигателя, нужно включить обмотку статора AX «Вперед», BY – «Назад», а обмотку CZ оставить обесточенной, что соответствует шестой комбинации включения $6.AX-YB(CZ)$. Тогда векторы МДС статора F_c и ротора F_r будут ортогональны друг другу.

*Работа выполняется в рамках технического задания Министерства образования и науки РФ, регистрационный номер 735522011 от 23.11.2011.

Вычислитель начального углового положения должен быть прост в реализации, использовать минимальную элементную базу и несложные математические вычисления. Высокой точности определения начального положения для работы в системе импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором не требуется.

Варианты реализации вычислителя α_0

В рассматриваемой системе импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором доступными для прямого измерения электрическими величинами являются напряжения на обмотках статора, кольцах ротора и ток силовой цепи. Использовать мгновенные значения указанных переменных для определения α_0 не представляется возможным, так как существует ряд не подлежащих разрешению неоднозначностей, например, точки перехода напряжений через ноль. Напряжения и ток цепи зависят от приложенной нагрузки, поэтому использование количественных значений угловых зависимостей сопряжено с учетом влияния нагрузки и дополнительными вычислениями. Реализация алгоритма, учитывающая фазовый сдвиг мгновенных значений тока и напряжения потребует применения дополнительного элемента для вычисления фазового сдвига. Наиболее целесообразным и простым видится алгоритм вычисления α_0 , основной идеей которого является сравнение угловых зависимостей действующих напряжений на обмотках статора и ротора.

Асинхронный двигатель с фазным ротором позволяет получить шесть зависимостей напряжений на обмотках от угла поворота ротора. Допустим, что в начальный момент времени напряжение питания подается на статорные обмотки AX и BY , обмотка CZ обесточена. Тогда путь тока в цепи следующий: фаза A питающей сети – обмотка статора AX – тиристор $VD4$ – обмотки ротора ax – by –

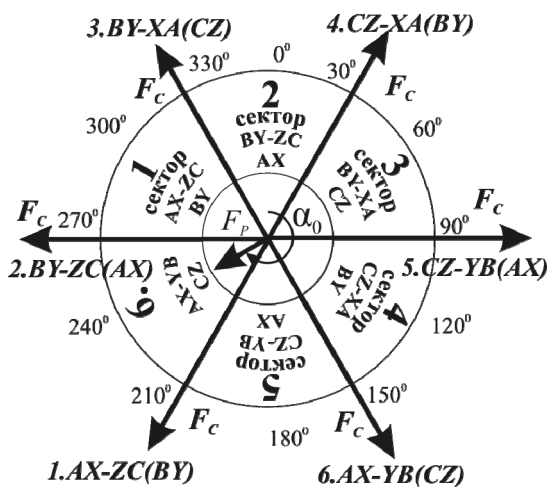


Рис. 1. Функциональная диаграмма задачи косвенного определения α_0

тиристор $VD3$ – обмотка YB – фаза B . Условимся обозначать: $i_{ц}$ – мгновенное значение тока цепи AB ; u – мгновенное напряжение обмотки; r – активное сопротивление обмотки; L – индуктивное сопротивление обмотки; $U, I_{ц}$ – действующие значения напряжений на участках цепи и тока цепи. Принадлежность величин к конкретной обмотке будем отмечать буквенными индексами, которые для различных обмоток следующие: для фазных обмоток статора – AX, BY, CZ ; для фазных обмоток ротора – $a0, b0, c0$; для эквивалентной обмотки ротора, заменяющей трехфазную обмотку, соединенную в звезду, – P ; для напряжений на кольцах ротора – ab, bc, ca . Взаимные индуктивности между обмотками будем обозначать двойным индексом принадлежности к первой и второй обмотке, например, взаимная индуктивность обмотки статора AX и эквивалентной обмотки ротора P обозначается L_{AXP} . С учетом принятых обозначений схема замещения цепи AB будет иметь вид, показанный на рис. 2.

Суммарное индуктивное сопротивление силовой цепи обозначим буквой L_{Σ} :

$$L_{\Sigma} = 2L_{1\sigma} + 2L_{2\sigma} + 2L_{AXBY} + \left(2 + \sqrt{3} \frac{E_{20}}{U_{1H}}\right) L_M + L_M \left(1 + \sqrt{3} \frac{E_{20}}{U_{1H}}\right) (\cos(\alpha) + \cos(\alpha + 60)).$$

Эквивалентная обмотка ротора P поворачивается на угол от 0 до 360 эл. градусов. За нулевое положение принято то, в котором вектор потокоцепления эквивалентной обмотки ротора и вектор потокоцепления обмотки статора фазы A совпадают по направлению. В начальный момент времени скорость вращения ротора равна нулю. С учетом известной идеализации электрической машины [2, 3] и на основании второго закона Кирхгофа и закона Фарадея для приведенной схемы замещения выражения мгновенных значений на-

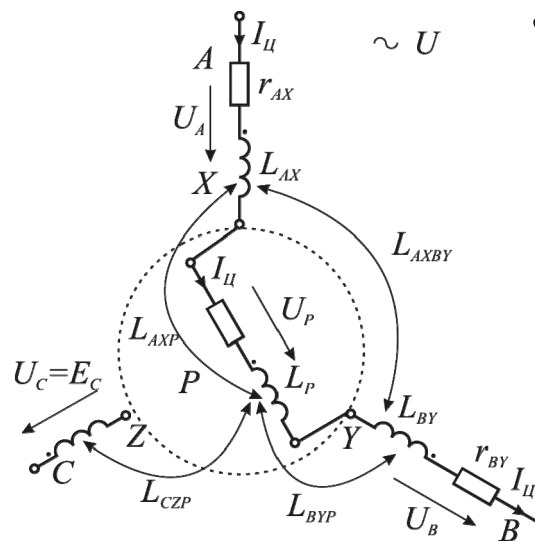


Рис. 2. Схема замещения цепи AB

пряжений на обмотках статора, кольцах ротора и производная тока цепи имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{di_{\Pi}}{dt} &= \frac{u_A - u_B - 2i_{\Pi} \cdot (r_1 + r_2)}{L_{\Sigma}} \\ u_{AX} &= r_1 i_{\Pi} + L_{1\sigma} \frac{di_{\Pi}}{dt} + L_{AXBY} \frac{di_{\Pi}}{dt} + \\ &+ L_M \left(1 + \sqrt{3} \frac{E_{20}}{U_{1H}} \cos(\alpha) \right) \frac{di_{\Pi}}{dt}; \\ u_{BY} &= r_1 i_{\Pi} + L_{1\sigma} \frac{di_{\Pi}}{dt} + L_{AXBY} \frac{di_{\Pi}}{dt} + \\ &+ L_M \left(1 + \sqrt{3} \frac{E_{20}}{U_{1H}} \cdot \cos(\alpha + 60^\circ) \right) \frac{di_{\Pi}}{dt}; \\ u_{CZ} &= \sqrt{3} \frac{E_{20}}{U_{1H}} L_M \cos(\alpha - 60^\circ) \frac{di_{\Pi}}{dt}; \\ u_{ab} &= \sqrt{3} r_2 i_{\Pi} + \sqrt{3} L_{2\sigma} \frac{di_{\Pi}}{dt} + \\ &+ L_M \left(\sqrt{3} \frac{E_{20}}{U_{1H}} + \cos(\alpha) + \cos(\alpha - 60^\circ) \right) \frac{di_{\Pi}}{dt}; \\ u_{bc} &= \frac{\sqrt{3}}{2} r_2 i_{\Pi} + \frac{\sqrt{3}}{2} L_{2\sigma} \frac{di_{\Pi}}{dt} + \\ &+ L_M \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{E_{20}}{U_{1H}} + \cos(\alpha - 60^\circ) + \cos(\alpha) \right) \frac{di_{\Pi}}{dt}; \\ u_{ca} &= \frac{\sqrt{3}}{2} r_2 i_{\Pi} + \frac{\sqrt{3}}{2} L_{2\sigma} \frac{di_{\Pi}}{dt} + \\ &+ L_M \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{E_{20}}{U_{1H}} + \cos(\alpha + 60^\circ) + \cos(\alpha + 120^\circ) \right) \frac{di_{\Pi}}{dt}. \end{aligned}$$

Здесь $L_{1\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассея-

ния статора, $L_{2\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния ротора, L_M – взаимная индуктивность, E_{20} – напряжение на кольцах ротора, U_{1H} – номинальное линейное напряжение на статоре.

Падения напряжений на обмотках двигателя равны сумме ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимной индукции. ЭДС взаимной индукции обмоток статора и эквивалентной обмотки ротора зависят от угла поворота ротора. В свободной обмотке статора CZ тока нет, и в ней наводится только ЭДС взаимной индукции от эквивалентной обмотки ротора ($U_C = E_C$). Действующие значения напряжений на обмотках двигателя и действующий ток цепи при изменении угла поворота α от 0 до 360 эл. град, полученные по приведенным уравнениям мгновенных значений, даны на рис. 3. Данные зависимости позволяют однозначно определить, в каком из шести секторов находится ротор в начальный момент времени.

Вычисление начального углового положения ротора по угловым зависимостям действующих напряжений на обмотках статора и ротора:

$$\begin{aligned} U_{AX} &= f(\alpha), U_{BY} = f(\alpha), U_{CZ} = f(\alpha), \\ U_{ab} &= f(\alpha), U_{bc} = f(\alpha), U_{ca} = f(\alpha). \end{aligned}$$

Вычисление начального углового положения ротора α_0 ведется по зависимостям действующих напряжений на обмотках двигателя и требует использования датчиков напряжения на трех обмотках статора и трех датчиков напряжений на кольцах ротора, позволяющих снимать мгновенные значения напряжений $u_{AX}, u_{BY}, u_{CZ}, u_{ab}, u_{bc}, u_{ca}$. В качестве примера на рис. 3 приведены зависимо-

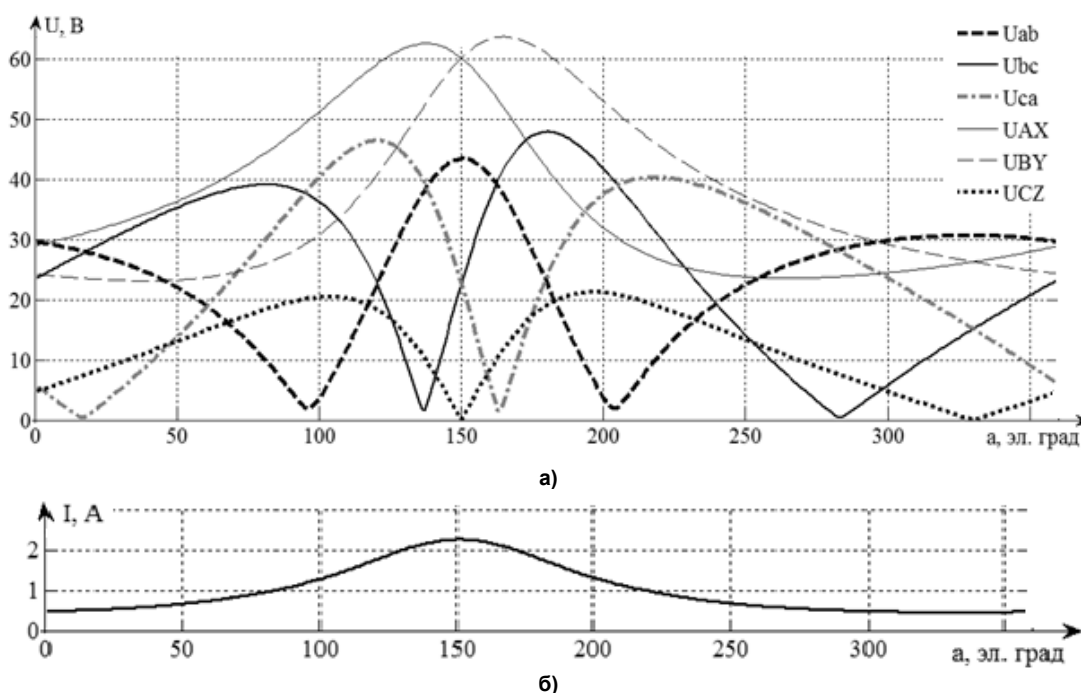


Рис. 3. Действующие значения при изменении α от 0 до 360 эл. град:
а) напряжений на обмотках статора и кольцах ротора; б) тока цепи

сти напряжений при работе шестой комбинации включения.

Однозначное определение начального углового положения ротора можно выполнить, воспользовавшись условиями, приведенными в таблице. Для этого необходимо:

- 1) сопоставить напряжения на обмотках статора AX и BY ;
- 2) сравнить напряжение на кольцах ротора ab с напряжением на обмотке статора AX или с напряжением на обмотке статора BY в зависимости от результата первого условия;
- 3) сопоставить напряжения на кольцах ротора ca и bc .

Например, проверка первого условия показала, что $U_{AX} < U_{BY}$, тогда согласно второму условию надо сравнить значения U_{ab} и U_{AX} . Если $U_{ab} < U_{AX}$, то проверяем третье условие, т. е. сравниваем напряжения U_{ca} и U_{bc} .

Пусть $U_{ca} < U_{bc}$, тогда α_0 лежит в диапазоне от 150 до 210 эл. градусов, что соответствует пятому сектору. Для создания максимального двигатель-

ного момента при пуске необходимо подключить к ротору обмотки статора CZ и YB , а обмотку AX оставить обесточенной (рис. 1). Определение других секторов происходит аналогично. На рис. 4 приведен алгоритм определения α_0 .

Структурная схема вычислителя начального углового положения представлена на рис. 5. Входными сигналами вычислителя являются мгновенные значения напряжений на обмотках двигателя, по которым вычислитель рассчитывает действующие значения и сравнивает их между собой. На выходе косвенного вычислителя формируется сигнал, соответствующий номеру сектора, в котором находится α_0 .

Возможен другой вариант реализации вычислителя начального углового положения ротора без использования датчиков напряжений на кольцах ротора, в котором напряжения U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} вычисляются на основании закона Кирхгофа по измеренным значениям напряжений на обмотках статора и питающего напряжения. Данный способ требует установки датчиков напряжений U_{AB} , U_{BC}

Логика определения начального углового положения ротора

№ сектора и диапазон α		1. 270°–330°	2. 330°–30°	3. 30°–90°	4. 90°–150°	5. 150°–210°	6. 210°–270°
Условие	1	$U_{AX} < U_{BY}$	$U_{AX} \geq U_{BY}$			$U_{AX} < U_{BY}$	
	2	$U_{ab} \geq U_{AX}$	$U_{ab} \geq U_{BY}$	$U_{ab} < U_{BY}$		$U_{ab} < U_{AX}$	
	3			$U_{ca} < U_{bc}$	$U_{ca} \geq U_{bc}$	$U_{ca} < U_{bc}$	$U_{ca} \geq U_{bc}$
Комб. вкл.		1. $AX-ZC$ (BY)	2. $BY-ZC$ (AX)	3. $BY-XA$ (CZ)	4. $CZ-XA$ (BY)	5. $CZ-YB$ (AX)	6. $AX-YB$ (CZ)

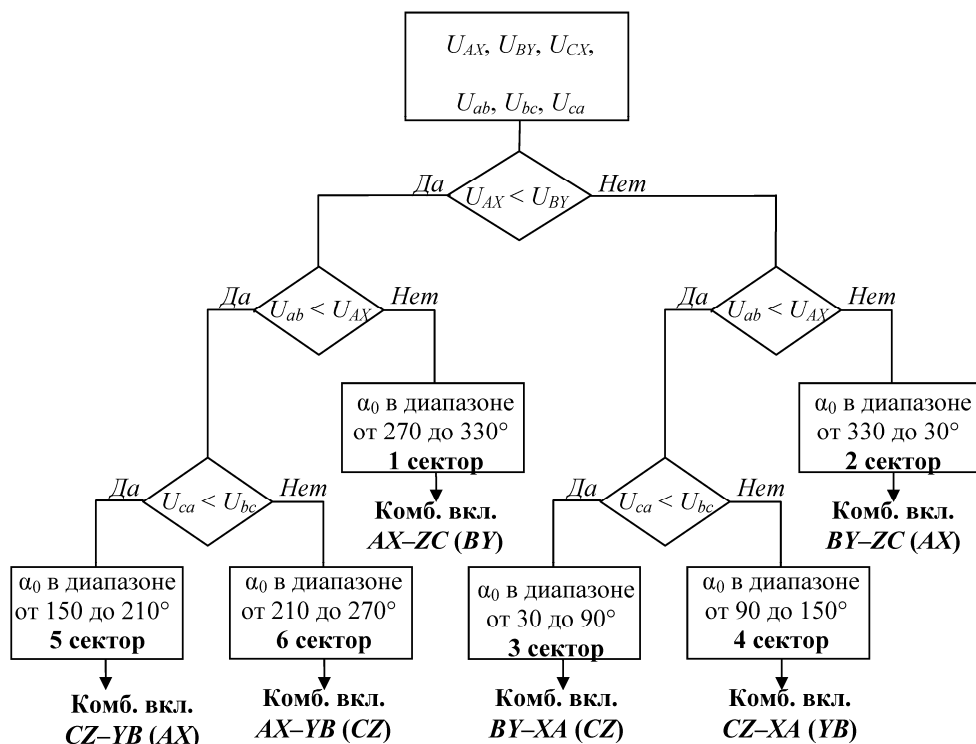


Рис. 4. Алгоритм определения сектора α_0

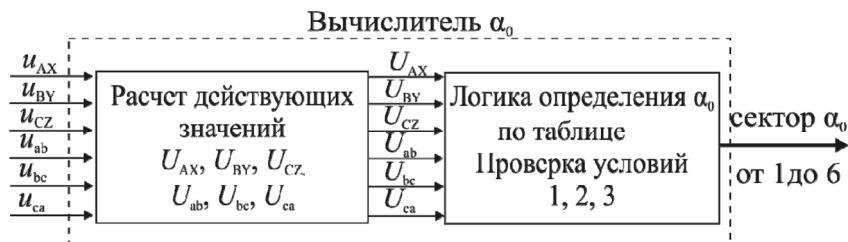


Рис. 5. Структурная схема вычислителя начального углового положения ротора

и U_{CZ} . Сектор, в котором находится α_0 , также будет определяться по таблице.

Логика вычисления α_0 (см. таблицу) сформирована по угловым зависимостям напряжений для шестой комбинации включения обмоток (рис. 1). Для других комбинаций включения угловые зависимости напряжений при каждом переключении смещаются на 60 эл. градусов. Для определения α_0 можно изменять логику, но удобнее сдвигать вычисленный по таблице номер сектора по кольцу в зависимости от того, на какие статорные обмотки подано напряжение. Учитывая, что после шестого сектора идет первый (рис. 1), при работе первой комбинации включения полученный по таблице номер сектора сдвигается на одно положение, для второй комбинации включения – на два положения, для третьей – на три, для четвертой – на четыре, для пятой – на пять, а для шестой комбинации смещения нет. Например, при работе первой комбинации включения вычислитель в соответствии с таблицей определил, что α_0 лежит в шестом секторе. Тогда, сдвинув номер сектора по кольцу на единицу, получим первый номер сектора,

что соответствует истинному положению α_0 .

Заключение. В бездатчиковой системе импульсно-векторного управления можно однозначно определять начальное угловое положение ротора асинхронного двигателя с фазным ротором с точностью до сектора, сравнивая действующие значения напряжений на обмотках статора и кольцах ротора согласно предложенному алгоритму для всех комбинаций включения обмоток. Вычислитель имеет простую структуру и для его реализации требуется шесть датчиков напряжений и программируемый контроллер, обладающий малыми вычислительными ресурсами.

Литература

1. Усынин, Ю.С. Асинхронный электропривод с импульсно-векторным управлением / Ю.С. Усынин, А.В. Валов, Т.А. Козина // *Электротехника*. – 2011. – № 3. – С. 15–19.
2. Важнов, А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А.И. Важнов. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1986. – 256 с.
3. Костенко, М.П. Электрические машины / М.П. Костенко, Л.М. Петровский. – Л.: Энергия, 1973.

Поступила в редакцию 14.03.2012 г.

Усынин Юрий Семёнович – доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8 (351) 267-93-21.

Usinin Yuriy Semenovitch is a Doctor of Science (Engineering), a Professor of Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Telephone: 8 (351) 267-93-21.

Козина Татьяна Андреевна – аспирантка кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8 (351) 267-93-21.

Kozina Tatiana Andreevna is a postgraduate student of Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Telephone: 8 (351) 267-93-21.

Валов Артем Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8 (351) 267-93-21.

Valov Artem Vladimirovich is a Candidate of Science (Engineering), an associate professor of Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Telephone: 8 (351) 267-93-21.

Лохов Сергей Прокопьевич – доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8 (351) 267-93-21.

Lokhov Sergey Prokopievich is a Doctor of Science (Engineering), a Professor of Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Telephone: 8 (351) 267-93-21.