



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Научная статья

УДК 621.314

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-125-133

EDN: <https://elibrary.ru/brymuc>



МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ КООРДИНАТ АКТИВНОГО КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОВОЗА

М. Ю. Пустоветов

Судостроительно-судоремонтный завод «РИФ»,
Ростов-на-Дону, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Объектом исследования является вспомогательный частотно-регулируемый электропривод электровоза переменного тока, а более точно — структура и параметры системы регулирования координат активного корректора коэффициента мощности, входящего в состав электропривода в качестве узла, обеспечивающего электромагнитную совместимость электропривода с другим оборудованием на борту электровоза и сетью и его энергетическую эффективность. Цель исследования — обоснование структуры системы регулирования координат активного корректора коэффициента мощности, выбор типов регуляторов и расчет их параметров.

Материалы и методы. В качестве метода исследования выбран расчет передаточных функций регуляторов системы подчиненного регулирования с последующим компьютерным моделированием процессов в электрических цепях с использованием системы автоматизированного проектирования OrCAD.

Результаты. Сделан вывод о целесообразности использования двухконтурной системы подчиненного регулирования координат, содержащей контур регулирования напряжения и контур регулирования тока. Приведены и аналитически сопоставлены результаты моделирования двухконтурной системы регулирования координат активного корректора коэффициента мощности при различных типах регуляторов. Лучшие результаты показало моделирование при использовании апериодического регулятора тока и пропорционально-интегрального регулятора напряжения.

Обсуждение и заключение. Полученные данные служат основой для дальнейшего улучшения работы активного корректора коэффициента мощности за счет совершенствования и оптимизации настроек, структуры и алгоритмов системы управления, которые при выбранной элементной базе силовой части позволят ему с высокой степенью надежности выполнять свои функции во всем диапазоне возмущающих и управляющих воздействий на борту электровоза.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: активный корректор коэффициента мощности, подчиненное регулирование координат, электровоз переменного тока, вспомогательный электропривод, контур регулирования тока, контур регулирования напряжения, энергосбережение, электромагнитная совместимость

Благодарности: автор выражает благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи.

Для цитирования: Пустоветов М. Ю. Моделирование двухконтурной системы подчиненного регулирования координат активного корректора коэффициента мощности вспомогательного электропривода электровоза // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 2. С. 125–133. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-125-133>.

✉ mgsn2006@rambler.ru (М. Ю. Пустоветов)

© Пустоветов М. Ю., 2022

Original article

UDK 621.314

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-125-133

EDN: <https://elibrary.ru/brymuc>



SIMULATION OF A DOUBLE-CIRCUIT SUBORDINATED COORDINATE REGULATION SYSTEM OF THE ACTIVE POWER FACTOR CORRECTOR FOR THE ELECTRIC LOCOMOTIVE AUXILIARY ELECTRIC DRIVE

Mikhail Yu. Pustovetov

Shipbuilding and ship repair yard RIF,
Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The object of this study is an auxiliary frequency-controlled electric drive of an AC locomotive, or more specifically, the structure and parameters of the system for regulating the coordinates of the active power factor corrector, which is a part of the electric drive and a unit that ensures the energy efficiency of the electric drive as well as its electro-magnetic compatibility with other equipment on board the electric locomotive and the power network. The purpose of the study is to substantiate the structure of the system for regulating the coordinates of an active power factor corrector, the choice of types of regulators and the calculation of their parameters.

Materials and methods. The author has chosen as the research method the calculation of transfer functions of regulators of the subordinated regulation system, followed by computer simulation of the processes in electrical circuits using the OrCAD computer-aided design system.

Results. The author made a conclusion about the expediency of using a two-circuit system of subordinated coordinate regulation containing a voltage control circuit and a current control circuit. The researcher presented and analytically compares the results of modelling of a two-circuit coordinate regulation system for the active power factor corrector for various types of regulators. The models with an aperiodic current regulator and a proportional-integral voltage regulator showed the best results.

Discussion and conclusion. The obtained data serve as the basis for further improvement of the active power factor corrector operation by improving and optimising the settings, structure and algorithms of the control system, which, with the selected hardware components of the power unit, will enable it to perform its functions with a high degree of reliability in the entire range of disturbing and controlling actions on board of an electric locomotive.

KEYWORDS: active power factor correction, substantiated coordinate regulation, AC locomotive, auxiliary electric drive, current control circuit, voltage control circuit, energy saving, electromagnetic compatibility

Acknowledgments: The author expresses his gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

For citation: Pustovetov M. Yu. Simulation of a double-circuit subordinated coordinate regulation system of the active power factor corrector for the electric locomotive auxiliary electric drive. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(2):125-133. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-125-133>.

Введение. Схемы и принцип действия активного корректора коэффициента мощности (АККМ) даны в [1, 2, 3, 4, 5]. АККМ является одним из важных элементов блока питания вспомогательных цепей перспективных электровозов, так как способствует энергосбережению за счет уменьшения потребления реактивной мощности и мощности искажений [1]. Примером отечественной разработки является использование АККМ на базе импульсного преобразователя постоянного напряжения повышающего типа [1] в составе преобразователя собственных нужд ПСН-169 на борту электровоза переменного тока типа ЭП200 [6]. Альтернативным техническим решением с аналогичными функциями является использование в составе вспомогательного электропривода четырехквadrантного преобразователя [7, 8]. На рис. 1 представлена электрическая принципиальная схема и функциональная схема системы регулирования координат АККМ электровоза.

Постановка задачи. Основные цели регулирования АККМ:

- 1) стабилизация выходного постоянного напряжения u_d на нагрузке;
- 2) стабилизация постоянного тока нагрузки i_d ;
- 3) формирование синусоидальной формы потребляемого (сетевого) тока i_c ;
- 4) обеспечение заданного фазового сдвига (как правило, требуется отсутствие сдвига фаз) сетевого тока i_c относительно сетевого напряжения u_c .

Цели регулирования 3 и 4 непосредственно служат коррекции (приближению к единице) коэффициента мощности электротехнической установки. Не пересказывая его дословно, можно отметить, что в общем случае подразумевается синусоидальное напряжение u_c и несинусоидальный ток i_c , потребляемый установкой. Коэффициент мощности будет тем ближе к единице, во-первых, чем меньше фазовый сдвиг первой гармоники тока от напряжения сети, во-вторых, чем менее искажена форма тока i_c (чем ближе она к синусоиде).

Цели регулирования 2 и 3 могут быть объединены в одну, которая формулируется следующим образом: формирование тока заданной величины (амплитуды) через входную индуктивность АККМ L_1 , имеющего форму выпрямленной синусоиды во времени.

Полагая, что сетевое напряжение АККМ $u_c = U_{cm} \sin(\omega t)$, в случае синфазности сетевых напряжения и тока для описания тока через входную индуктивность АККМ L_1 воспользуемся выражением из [1]:

$$i_{L_1} = \frac{U_{cm}}{R_e} |\sin(\omega t)|, \quad (1)$$

где R_e — эквивалентное входное сопротивление АККМ.

Ток i_{L_1} является переменной, зависимой от u_d , так как i_d , представляя составляющую i_{L_1} , является пере-

менной, зависимой от u_d . Напряжение u_d формируется в результате импульсного регулирования постоянного напряжения транзисторным преобразователем, а именно в результате коммутаций транзисторного ключа $VТ1$. Данная логическая цепочка позволяет определить количество и иерархию контуров регулирования координат, а также объекты регулирования.

Метод решения задачи. Требуется два контура регулирования. Внутренним (подчиненным) контуром регулирования является контур регулирования тока i_{L_1} . Внешним будет контур регулирования напряжения u_d . Объектом регулирования в контуре регулирования тока является индуктивность L_1 — именно через нее требуется обеспечить протекание тока заданной формы и величины. Передаточной функцией (ПФ) объекта регулирования в контуре тока является $W_{o.p.i}(p) = 1/L_1 p$. ПФ объекта регулирования в контуре регулирования напряжения является последовательное соединение ПФ замкнутого контура регулирования тока i_{L_1} , обозначим как $W_{зам.i}(p)$, и ПФ транзисторного преобразователя $W_{ch}(p)$.

Определим тип (ПФ) регулятора в контуре регулирования тока $W_{p.i}(p)$. Желаемая ПФ разомкнутого контура регулирования тока имеет вид выражения (2) [9] или выражения (3):

$$W_{раз.жел.i}(p) = \frac{1}{a_i T_\mu p (T_\mu p + 1)}, \quad (2)$$

где T_μ — малая некомпенсируемая постоянная времени контура тока; $a_i = T_{0i}/T_\mu$ — соотношение постоянных времени; T_{0i} — постоянная времени оптимизированного контура регулирования тока.

$$W_{раз.жел.i}(p) = k_{si} W_{o.p.i}(p) W_{p.i}(p) = k_{si} \frac{1}{L_1 p} W_{p.i}(p), \quad (3)$$

где k_{si} — ПФ датчика тока i_{L_1} .

$$k_{si} = \frac{U_{y.max}}{I_{L_1 max}}, \quad (4)$$

где $I_{L_1 max}$ — наибольшее значение тока через входную индуктивность АККМ L_1 .

Из (3) выразим ПФ регулятора тока:

$$\begin{aligned} W_{p.i}(p) &= \frac{W_{раз.жел.i}(p)}{k_{si} W_{o.p.i}(p)} = \frac{1}{\frac{a_i T_\mu p (T_\mu p + 1)}{k_{si} \frac{1}{L_1 p}}} = \\ &= \frac{L_1}{k_{si} a_i T_\mu} \left(\frac{1}{T_\mu p + 1} \right) = k_{p.i} \left(\frac{1}{T_{p.i} p + 1} \right), \quad (5) \end{aligned}$$

где $k_{p.i} = L_1/k_{si} a_i T_\mu$ — коэффициент усиления регулятора тока; $T_{p.i} = T_\mu$ — постоянная времени регулятора тока.

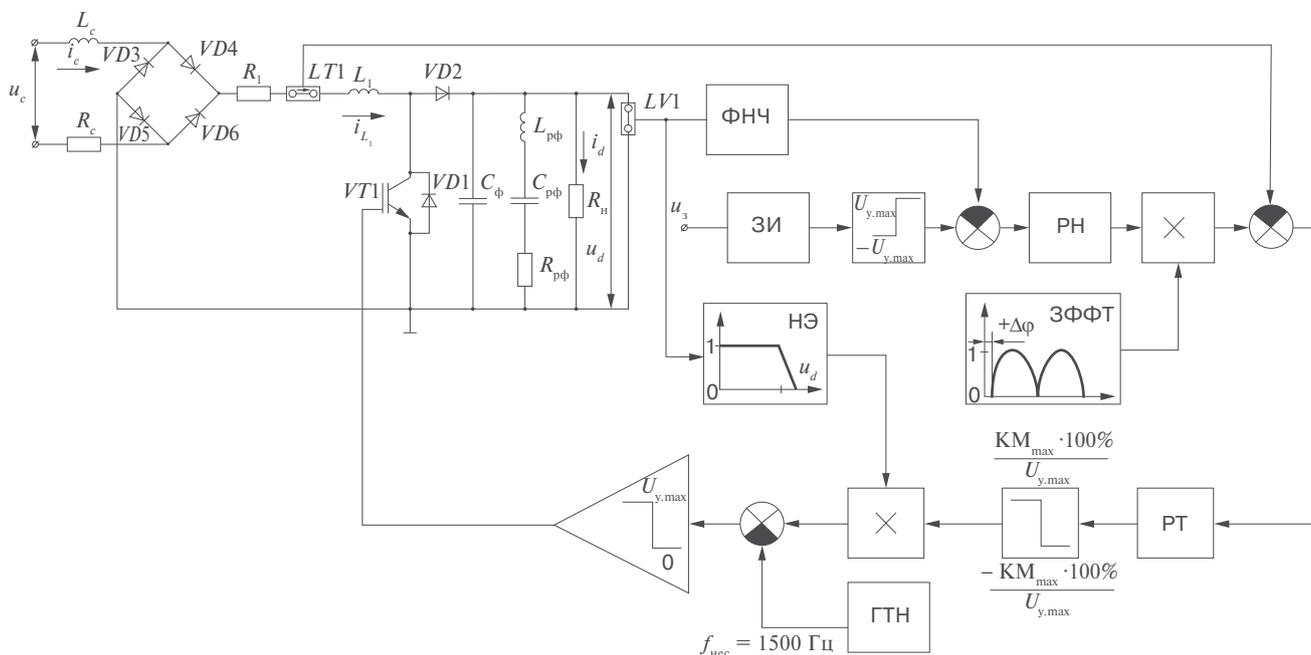


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема и функциональная схема системы регулирования координат АККМ электровоза: ФНЧ — фильтр нижних частот; ЗИ — датчик интенсивности; РН — регулятор напряжения; РТ — регулятор тока; ГТН — генератор треугольного напряжения; НЭ — нелинейный элемент; ЗФФТ — датчик формы (синусоида) и фазы сетевого тока (в реальном АККМ (не в математической модели, где априори известна фаза сетевого напряжения u_c) требуется синхронизация работы ЗФФТ с частотой и фазой сетевого напряжения); $LT1$ — датчик тока; $LV1$ — датчик напряжения; $U_{y,max}$ — наибольшее значение напряжения системы управления; $f_{нес} = 1500$ Гц — несущая частота широтно-импульсного регулирования напряжения; KM_{max} — наибольшее значение коэффициента модуляции; $L_{рф}, C_{рф}, R_{рф}$ — элементы резонансного фильтра, настроенного на частоту 100 Гц; u_3 — задающее напряжение системы управления; $\Delta\varphi$ — задаваемый фазовый сдвиг сетевого тока i_c относительно сетевого напряжения

Fig. 1. Electrical circuit diagram and functional diagram of the coordinate regulation system of the active power factor corrector of an electric locomotive:

ФНЧ — low-pass filter; ЗИ — intensity generator; РН — voltage regulator; РТ — current regulator; ГТН — triangular voltage generator; НЭ — non-linear element; ЗФФТ — generator of shape (sinusoid) and phase of the mains current (in a real power factor corrector (not in a mathematical model, where the phase of the mains voltage u_c is known a priori), synchronisation of the operation of the generator with the frequency and phase of the mains voltage is required); $LT1$ — current sensor; $LV1$ — voltage sensor; $U_{y,max}$ — the highest voltage value of the control system; $f_{нес} = 1500$ Hz — carrier frequency of pulse-width voltage regulation; KM_{max} — the highest value of the modulation coefficient; $L_{рф}, C_{рф}, R_{рф}$ — elements of a resonant filter tuned to a frequency of 100 Hz; u_3 — setting voltage of the control system; $\Delta\varphi$ — the specified phase shift of the mains current i_c relative to the mains voltage; i_d, u_d — constant load current and constant voltage on the load; i_{L1} — current control circuit

По виду результирующего выражения (5) можно сделать вывод, что получена ПФ аperiodического регулятора (А-регулятора), который может быть представлен как операционный усилитель (ОУ), охваченный обратной связью, содержащей параллельно соединенные R и C [10]. Стандартный подход к определению ПФ активных корректирующих звеньев на базе ОУ, изложенный в частности в [11], гласит, что ПФ активного корректирующего звена в случае неинвертирующего ОУ будет иметь вид

$$W_a(p) = \frac{Z_2(p)}{Z_1(p)}, \quad (6)$$

где Z_1 — сопротивление на входе корректирующего звена в продольной ветви; Z_2 — сопротивление обратной связи, охватывающей ОУ.

Применительно к А-регулятору получим в соответствии с обозначениями, принятыми в [10]: $Z_1 = R_1$;

$$\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_{oc}} + \frac{1}{1/pC_{oc}}, \text{ откуда } Z_2 = \frac{R_{oc}}{pC_{oc}R_{oc} + 1}.$$

ПФ А-регулятора получится в виде

$$W_{PA}(p) = \frac{R_{oc}}{R_1} \left(\frac{1}{C_{oc}R_{oc}p + 1} \right) = k_A \left(\frac{1}{T_A p + 1} \right). \quad (7)$$

Определим тип регулятора в контуре регулирования напряжения $W_{p,u}(p)$. Желаемая ПФ разомкнутого контура регулирования напряжения имеет вид выражения (8) [9] или (9):

$$W_{раз.жел.u}(p) = \frac{1}{a_u a_i T_u p (a_i T_u p + 1)}, \quad (8)$$

где $a_u = T_{0u}/T_{0i}$ — соотношение постоянных времени; T_{0u} — постоянная времени оптимизированного контура регулирования напряжения.

С другой стороны,

$$W_{\text{раз.жел.}u}(p) = k_{su} W_{\text{зам.}i}(p) W_{ch}(p) W_{p.u}(p), \quad (9)$$

где k_{su} — ПФ датчика напряжения u_d .

$$W_{\text{зам.}i}(p) = \frac{1}{a_i T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1) + 1} \frac{1}{k_{si}} \approx \frac{1/k_{si}}{a_i T_{\mu} p + 1}; \quad (10)$$

$$W_{ch}(p) = \frac{k_{ch}}{T_{ch} p + 1}, \quad (11)$$

где k_{ch} — коэффициент передачи транзисторного преобразователя; T_{ch} — постоянная времени для транзисторных преобразователей.

Согласно [12] T_{ch} определяется по формуле

$$T_{ch} = \frac{1}{f_{\kappa}}, \quad (12)$$

где f_{κ} — частота коммутации транзисторного ключа VT1.

Коэффициент передачи транзисторного преобразователя рассчитывается по формуле

$$k_{ch} = \frac{U_{d \text{ ном}}}{U_{y. \text{ max}}}, \quad (13)$$

где $U_{d \text{ ном}}$ — номинальное значение постоянного напряжения на нагрузке; $U_{y. \text{ max}}$ — наибольшее значение напряжения системы управления.

$$k_{su} = \frac{U_{y. \text{ max}}}{U_{d \text{ ном}}}. \quad (14)$$

Перепишем (9) с учетом (10) и (11):

$$W_{\text{раз.жел.}u}(p) = k_{su} \frac{1/k_{si}}{a_i T_{\mu} p + 1} \frac{k_{ch}}{T_{ch} p + 1} W_{p.u}(p). \quad (15)$$

Из (9) с учетом (15) выразим ПФ регулятора напряжения:

$$\begin{aligned} W_{p.u}(p) &= \frac{W_{\text{раз.жел.}u}(p)}{k_{su} W_{\text{зам.}i}(p) W_{ch}(p)} = \frac{1}{k_{su} \frac{1/k_{si}}{a_i T_{\mu} p + 1} \frac{k_{ch}}{T_{ch} p + 1}} = \\ &= \frac{k_{si}}{a_u a_i k_{ch} k_{su}} \left(\frac{T_{ch}}{T_{\mu}} + \frac{1}{T_{\mu} p} \right) = \frac{k_{si}}{a_u a_i k_{ch} k_{su}} \frac{T_{ch}}{T_{\mu}} \left(1 + \frac{1}{T_{ch} p} \right) = \\ &= k_{p.u} \left(1 + \frac{1}{T_{p.u} p} \right), \end{aligned} \quad (16)$$

где $k_{p.u} = \frac{k_{si}}{a_u a_i k_{ch} k_{su}} \frac{T_{ch}}{T_{\mu}}$ — коэффициент усиления регулятора напряжения; $T_{p.u} = T_{ch}$ — постоянная времени регулятора напряжения.

Из выражения (16) следует, что получена ПФ пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора). Настройка контуров регулирования сводится, таким образом, к выбору величин T_{μ} , a_i , a_u , а также $I_{L_1 \text{ max}}$.

Учтем, что дополнительными целями регулирования АККМ являются:

1) ограничение коэффициента заполнения напряжения (коэффициента модуляции) при широтно-импульсном регулировании транзисторного ключа VT1 (например, $KM_{\text{max}} = 0,85$);

2) ограничение максимального мгновенного напряжения $U_{d \text{ max}}$ (например, $U_{d \text{ max}} = 700$ В) — для этого предусматривается дополнительно канал прямого ограничения величины выходного напряжения (см. НЭ на рис. 1). Действие этого канала основано на том, что при достижении $U_{d \text{ max}} = 700$ В сигнал об этом, минуя регуляторы, блокирует отпирание транзисторного ключа до снижения выходного напряжения;

3) возможность сохранения формы сетевого тока близкой к синусоидальной при изменении нагрузки на выходе АККМ.

Анализ полученных результатов. Компьютерное моделирование в OrCAD показало, что вариантом настроек, позволяющим получить приемлемое качество регулирования, является следующее сочетание параметров:

$$a_i = a_u = 4; T_{\mu} = 0,1T_{ch}; I_{L_1 \text{ max}} = 650 \text{ A.}$$

При этом другие параметры схемы регулирования координат АККМ имеют следующие значения:

$$L_1 = 0,78 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}; k_{ch} = \frac{U_{d \text{ ном}}}{U_{y. \text{ max}}} = \frac{660}{10} = 66 \text{ В/В};$$

$$k_{si} = \frac{U_{y. \text{ max}}}{I_{L_1 \text{ max}}} = \frac{10}{650} = 0,0153 \text{ В/А};$$

$$k_{su} = \frac{U_{y. \text{ max}}}{U_{d \text{ ном}}} = \frac{10}{660} = 0,0152 \text{ В/В};$$

$$T_{p.i} = T_{\mu} = 0,1T_{ch} = 0,1 \cdot 0,00067 \approx 0,00007 \text{ с};$$

$$k_{p.i} = \frac{L_1}{k_{si} a_i T_{\mu}} = \frac{0,78 \cdot 10^{-3}}{0,0153 \cdot 4 \cdot 0,00007} = 182,1;$$

$$T_{p.u} = T_{ch} = \frac{1}{f_{\kappa}} = \frac{1}{1500} = 0,00067 \text{ с};$$

$$k_{p.u} = \frac{k_{si}}{a_u a_i k_{ch} k_{su}} \frac{T_{ch}}{T_{\mu}} = \frac{0,0153}{4 \cdot 4 \cdot 66 \cdot 0,0152} \cdot \frac{0,00067}{0,00007} = 0,0092.$$

Такие настройки предпочтительны, если сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$ может меняться в широких пределах. Результаты моделирования при $R_{\text{н ном}} = 3,94$ Ом (соответствует мощности преобразователя около 110 кВА) показаны на рис. 2, 3.

Результаты моделирования при $R_n = 5 \cdot 3,94 = 19,7 \text{ Ом}$ даны на рис. 4.

В качестве альтернативы вышеописанной структуре системы подчиненного регулирования координат АККМ может быть предложена аналогичная структура, где вместо А-регулятора тока используется ПИ-регулятор (пропорциональный). При этом в качестве предпосылок к синтезу системы принимаются:

$$W_{\text{раз.жел.}i}(p) = \frac{1}{a_i T_\mu p}; \quad (17)$$

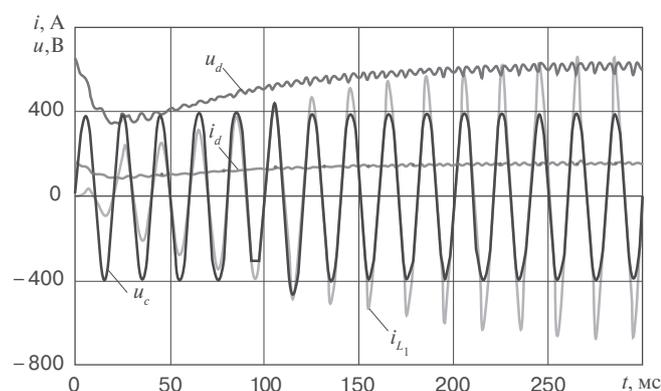


Рис. 2. Результаты моделирования АККМ при $R_{n\text{ном}} = 3,94 \text{ Ом}$, $a_i = a_u = 4$ (переходный процесс включения АККМ при предварительно заряженных до номинального $u_d = 660 \text{ В}$ конденсаторах C_Φ и $C_{рф}$) при использовании А-регулятора тока и ПИ-регулятора напряжения

Fig. 2. Results of the active power factor corrector simulation at $R_{n\text{ном}} = 3.94 \text{ Ohm}$, $a_i = a_u = 4$ (transient process of turning on the corrector with capacitors C_Φ and $C_{рф}$ pre-charged to nominal $u_d = 660 \text{ V}$) when using an aperiodic current regulator (A-regulator) and proportionally integral voltage regulator (PI-regulator)

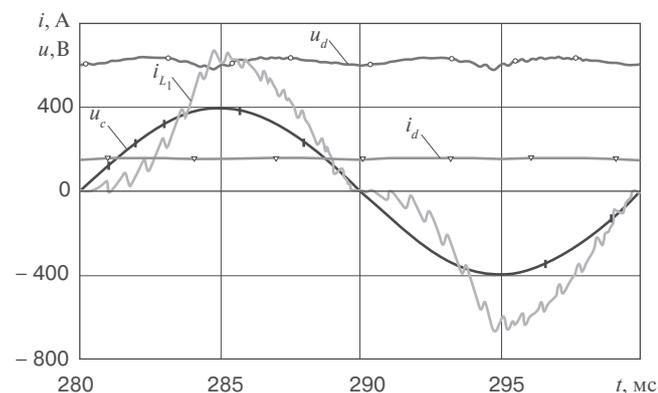


Рис. 3. Результаты моделирования АККМ при $R_{n\text{ном}} = 3,94 \text{ Ом}$ (установившийся режим) при использовании А-регулятора тока и ПИ-регулятора напряжения

Fig. 3. Results of the active power factor corrector simulation at $R_{n\text{ном}} = 3.94 \text{ Ohm}$ (steady state) by using an A-regulator of current and PI-regulator of voltage

$$W_{\text{раз.жел.}u}(p) = \frac{1}{a_u a_i T_\mu p}; \quad (18)$$

$$W_{ch}(p) = k_{ch}. \quad (19)$$

В результате преобразований получим ПФ регулятора тока в виде

$$W_{p.i}(p) = \frac{W_{\text{раз.жел.}i}(p)}{k_{si} W_{o.p.i}(p)} = \frac{\frac{1}{a_i T_\mu p}}{k_{si} \frac{1}{L_1 p}} = \frac{L_1}{k_{si} a_i T_\mu} = k_{p.i}, \quad (20)$$

а ПФ регулятора напряжения в виде

$$W_{p.u}(p) = \frac{W_{\text{раз.жел.}u}(p)}{k_{su} W_{зам.i}(p) W_{sh}(p)} = \frac{\frac{1}{a_u a_i T_\mu p}}{k_{su} \frac{1/k_{si}}{a_i T_\mu p} k_{ch}} = \frac{k_{si}}{a_u k_{ch} k_{su}} \left(1 + \frac{1}{a_i T_\mu p} \right) = k_{p.u} \left(1 + \frac{1}{T_{p.u} p} \right), \quad (21)$$

где $k_{p.u} = \frac{k_{si}}{a_u k_{ch} k_{su}}$; $T_{p.u} = a_i T_\mu$.

Моделирование альтернативной структуры системы регулирования координат АККМ показало, что при номинальной нагрузке она дает сходные с предыдущей схемой результаты (рис. 5, 6), но в режимах, близких к холостому ходу (рис. 7), по сравнению с рис. 4 значительно ухудшается форма сетевого тока, увеличивается его амплитуда, хуже стабилизация напряжения u_d . Сравнительные количественные характеристики АККМ при разных структурах регулирования, полученные при анализе результатов компьютерного моделирования, представлены в таблице, где базисной величиной для расчета размаха колебаний u_d (рис. 3, 4, 6, 7) и его низшего значения в переходном процессе (рис. 2, 5) выбраны 660 В.

На рис. 8 показаны результаты моделирования, аналогичные результатам на рис. 2, но предпринята успешная попытка увеличить быстродействие системы автоматического регулирования АККМ: длительность переходного процесса сократилась в 10 раз. Для этого в настройках задано $a_i = a_u = 1$.

Возможным компромиссом между повышением быстродействия системы регулирования и сохранением в установившемся режиме близкой к синусоиде формы сетевого тока при режимах, близких к холостому ходу, является использование настроек $a_i = 4, a_u = 3$.

Если при прочих равных условиях принять вместо рассмотренного выше соотношения $T_\mu = 0,1 T_{ch}$ соотношение $T_\mu = T_{ch}$, это приведет к замедлению быстродействия системы, приближению формы сетевого тока к треугольной, увеличению амплитуды сетевого тока на 25%.

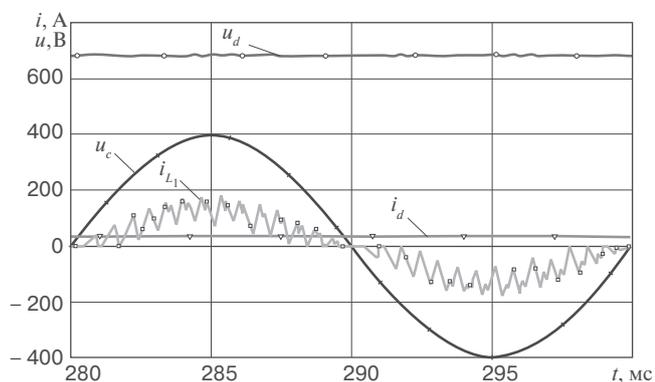


Рис. 4. Результаты моделирования АККМ при $R_n = 19,7$ Ом (установившийся режим) при использовании А-регулятора тока и ПИ-регулятора напряжения

Fig. 4. Results of the active power factor corrector simulation at $R_n = 19.7$ Ohm (steady state) by using an A-regulator of current and PI-regulator of voltage

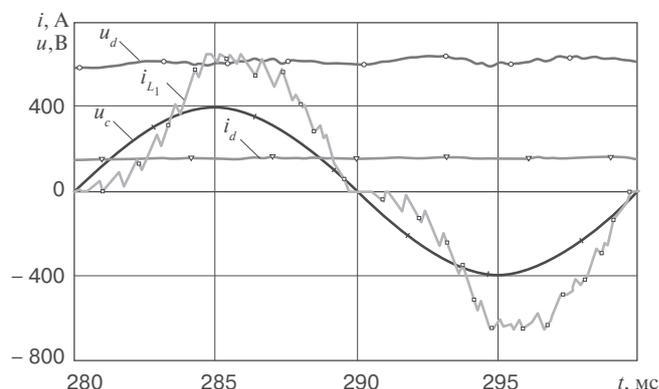


Рис. 6. Результаты моделирования АККМ при $R_{н\text{ ном}} = 3,94$ Ом (установившийся режим) при использовании П-регулятора тока и ПИ-регулятора напряжения

Fig. 6. Results of the active power factor corrector simulation at $R_{н\text{ ном}} = 3.94$ Ohm (steady state) by using a P-regulator of current and PI-regulator of voltage

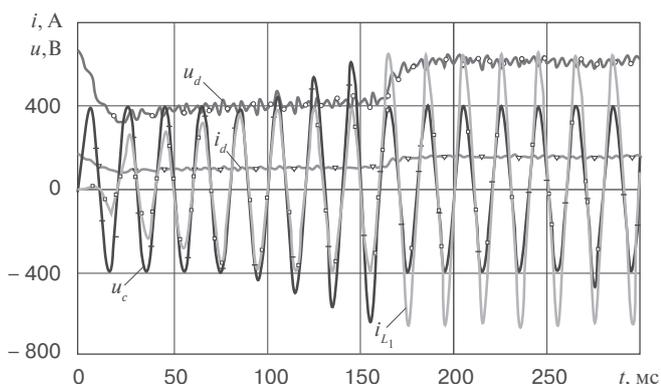


Рис. 5. Результаты моделирования АККМ при $R_{н\text{ ном}} = 3,94$ Ом, $a_i = a_u = 4$ (аналогично рис. 2) при использовании П-регулятора тока и ПИ-регулятора напряжения

Fig. 5. Results of the active power factor corrector simulation at $R_{н\text{ ном}} = 3.94$ Ohm, $a_i = a_u = 4$ (similar to fig. 2) by using a P-regulator (proportional regulator) of current and a PI-regulator of voltage

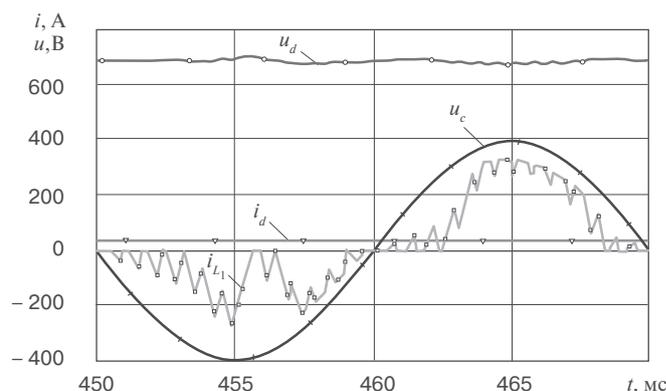


Рис. 7. Результаты моделирования АККМ при $R_n = 19,7$ Ом (установившийся режим) при использовании П-регулятора тока и ПИ-регулятора напряжения

Fig. 7. Results of the active power factor corrector simulation at $R_n = 19.7$ Ohm (steady state) by using a P-regulator of current and PI-regulator of voltage

Таблица

Сравнительные характеристики АККМ при разных структурах системы регулирования, полученные в результате компьютерного моделирования (рис. 2–7)

Table

Comparative characteristics of the active power factor correctors with different structures of the regulation system obtained as a result of computer simulation (fig. 2–7)

| Наименование характеристики, единицы измерения | Составляющие системы регулирования координат АККМ | |
|---|--|--|
| | А-регулятор тока, ПИ-регулятор напряжения (рис. 2–4) | П-регулятор тока, ПИ-регулятор напряжения (рис. 5–7) |
| Переходный режим | | |
| Длительность переходного процесса, мс | 240 | 180 |
| Низшее значение u_d в переходном процессе, % | 51,5 | 47,5 |
| Установившийся режим | | |
| Размах колебаний u_d при номинальной нагрузке, % | 9,5 | 12,5 |
| Размах колебаний u_d при холостом ходе, % | 2,2 | 5,9 |
| Максимальное значение i_i при номинальной нагрузке, А | 672,5 | 647,1 |
| Максимальное значение i_c при холостом ходе, А | 176,4 | 335,3 |

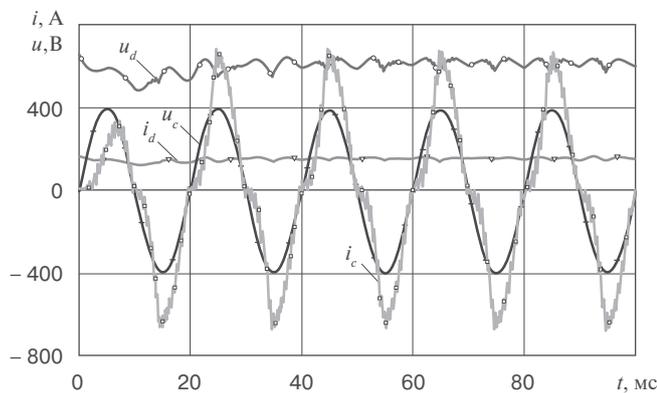


Рис. 8. Результаты моделирования АККМ при $R_{н\text{ном}} = 3,94 \text{ Ом}$, $a_i = a_u = 1$ (переходный процесс включения АККМ при предварительно заряженных до номинального $u_d = 660 \text{ В}$ конденсаторах C_ϕ и $C_{рф}$) при использовании А-регулятора тока и ПИ-регулятора напряжения

Fig. 8. Results of the active power factor corrector simulation at $R_{н\text{ном}} = 3.94 \text{ Ohm}$, $a_i = a_u = 1$ (transient process of turning on the corrector with capacitors C_ϕ and $C_{рф}$ pre-charged to nominal $u_d = 660 \text{ V}$) by using an A-regulator of current and PI-regulator of voltage

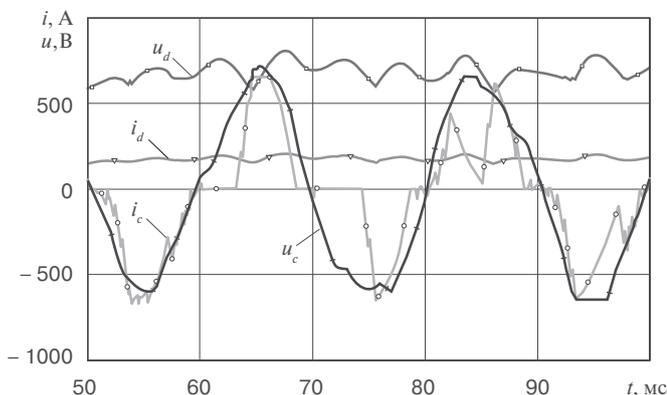


Рис. 9. Фрагмент результатов моделирования АККМ при $R_{н\text{ном}} = 3,94 \text{ Ом}$, $a_i = a_u = 1$ в условиях полигармонического напряжения сети, действующее значение первой гармоники которого изменяется от 270 до 470 В за 20 мс, при использовании А-регулятора тока и ПИ-регулятора напряжения

Fig. 9. A fragment of the results of the active power factor corrector simulation at $R_{н\text{ном}} = 3.94 \text{ Ohm}$, $a_i = a_u = 1$ under conditions of a polyharmonic mains voltage, the effective value of the first harmonic of which changes from 270 to 470 V in 20 ms, by using an A-regulator of current and PI-regulator of voltage

Как уже говорилось ранее, обычно подразумевается, что u_c синусоидальное. На самом деле его форма зачастую далека от идеальной ввиду влияния нелинейных нагрузок. В частности, при использовании электровозов с тяговыми выпрямительно-инверторными установками с зонно-фазовым регулированием значительная несинусоидальность u_c обусловлена процессами коммутации в тяговом преобразователе. Пример такого искаженного напряже-

ния на обмотке собственных нужд тягового трансформатора 2ЭС5К «Ермак» приведен в [13, 14].

Для прояснения влияния несинусоидальности и колебаний величины u_c на функционирование АККМ проведено компьютерное моделирование, когда u_c представлено полигармоническим сигналом. Дополнительно к этому действующее значение первой гармоники напряжения сети изменяется за 20 мс (от момента времени 50 мс) от 270 до 470 В. Результаты моделирования показаны на рис. 9. Видно, что несинусоидальность u_c сама по себе не ухудшает существенно форму i_c (первый полупериод на рис. 9). В большей мере форма i_c ухудшается и становится прерывистой при повышении u_c , когда для стабилизации u_d приходится допускать длительные паузы между проводящими состояниями транзистора $VT1$ при превышении $U_{d\text{max}} = 700 \text{ В}$, что снижает коэффициент мощности.

Обсуждение и заключение. На основании анализа результатов компьютерного моделирования следует признать пригодной для АККМ в составе вспомогательного электропривода электровозов двухконтурную систему подчиненного регулирования координат, содержащую апериодический регулятор тока и пропорционально-интегральный регулятор напряжения, поскольку такая структура обеспечивает меньшую динамическую просадку напряжения при подключении нагрузки, меньший размах колебаний напряжения на нагрузке, меньшую амплитуду тока при холостом ходе и лучшую его синусоидальность. Выбор настроек системы регулирования требует дополнительных исследований с точки зрения достижения наилучшего результата с учетом быстродействия системы, приближения формы сетевого тока к синусоидальной в широком диапазоне величины нагрузки, колебаний величины напряжения сети.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Попков О.З. Основы преобразовательной техники: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 200 с.
2. Мелешин В.И., Нечагин М.А. Проектирование однофазных выпрямителей с активной коррекцией коэффициента мощности // Электротехника. 1998. № 3. С. 42–48.
3. Дмитриков В.Ф., Сергеев В.В., Самылин И.Н. Повышение эффективности преобразовательных и радиотехнических устройств. М.: Радио и связь, 2005. 424 с.
4. Powniker S., Shelar S. Development of Active Power Factor Correction controller using boost converter // 2016 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), Pune, India, 19–21 December 2016. [S. l.], 2016. P. 8009120. <https://doi.org/10.1109/WIECON-ECE.2016.8009120>.
5. Nazarkar S., Shelar S. Design & Simulation of Active Power Factor Controller Using Boost Converter // Novateur Publications International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology (IJERT). 2016. Vol. 3. P. 1–8.
6. Хоменко Б.И., Колпахчян Г.И., Пехотский И.В. Вспомогательные транзисторные преобразователи для перспективного ЭПС // Электровозостроение. 2003. Т. 45. С. 184–191.

7. Энергосбережение в системах питания вспомогательных машин электровоза переменного тока серии «Ермак» за счет внедрения ШПВМ-250-У2 / А.А. Тишкин [и др.] // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения (Вестник ВЭЛНИИ). 2012. Т. 1, № 63. С. 63–74.

8. Тишкин А.А. Схемотехнические решения приводов вспомогательных машин электровозов переменного тока // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. Саранск, 2014. Т. 2. С. 425–427.

9. Ключев В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.

10. Кисаримов Р.А. Электропривод: справ. М.: РадиоСофт, 2008. 352 с.

11. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2001. 304 с.

12. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учеб. для вузов. М.: Изд-во РАСХН, 2003. 320 с.

13. Pustovetov M. Yu., Pustovetov K. M. The Electromagnetic Torque Ripple of Three-Phase Induction Electric Machine, Operating as a Part of the Auxiliary Electric Drive Onboard of AC Electric Locomotive — a Factor Contributing to the Failure of Bearings // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, Vladivostok, 3–4 October 2018. Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 8602672. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602672>.

14. Пустоветов М.Ю. Пульсации электромагнитного момента трехфазной асинхронной электрической машины, работающей в составе вспомогательного электропривода электровоза переменного тока — фактор, способствующий отказам подшипников // Механика XXI века. 2016. № 15. С. 331–337.

REFERENCES

1. Popkov O. Z. Osnovy preobrazovatel'noy tekhniki: ucheb. posobie dlya vuzov [Fundamentals of converting technology: textbook]. Moscow: MEI Publ.; 2005. 200 p. (In Russ.).

2. Meleshin V. I., Nechagin M. A. Proektirovanie odnofaznykh vypryamiteley s aktivnoy korrektsiyei koeffitsienta moshchnosti [Design of single-phase rectifiers with active power factor correction]. *Elektrotekhnika = Russian Electrical Engineering*. 1998;(3):42-48. (In Russ.).

3. Dmitrikov V. F., Sergeev V. V., Samylin I. N. Povyshenie effektivnosti preobrazovatel'nykh i radiotekhnicheskikh ustroystv [Improving the efficiency of converters and radio devices]. Moscow: Radio i svyaz' Publ.; 2005. 424 p. (In Russ.).

4. Powniker S., Shelar S. Development of Active Power Factor Correction controller using boost converter. 2016 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), Pune, India, December 19–21, 2016. [S. 1.]; 2016. P. 8009120. <https://doi.org/10.1109/WIECON-ECE.2016.8009120>.

5. Nazarkar S., Shelar S. Design & Simulation of Active Power Factor Controller Using Boost Converter. *Novateur Publications International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology (IJERT)*. 2016;(3):1-8.

6. Khomenko B. I., Kolpakhch'yan G. I., Pekhotskiy I. V. Vspomogatel'nye tranzistornye preobrazovateli dlya perspektivnogo EPS [Auxiliary transistor converters for advanced electric rolling stock]. *Elektrovostroyeniye = Electric locomotive engineering*. 2003;(45):184-191. (In Russ.).

7. Tishkin A. A., Kurganov A. A., Kalyuzhnyy A. A., Sinyavskiy I. V. Energoberezhniye v sistemakh pitaniya vspomogatel'nykh mashin elektrovozov peremennogo toka serii "Ermak" za schet vnedreniya ShPVM-250-U2 [Energy saving in the power supply systems of auxiliary machines of the Ermak series AC electric locomotive due to the introduction of ShPVM-250-U2]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i projektirovatskogo instituta elektrovostroyeniya (Vestnik VEINII) = Journal of the All-Russian Research and Development Institute of Electric Locomotives*. 2012;1(63):63-74. (In Russ.).

8. Tishkin A. A. Skhemotekhnicheskie resheniya privodov vspomogatel'nykh mashin elektrovozov peremennogo toka [Circuit solutions for drives of auxiliary machines of AC electric locomotives]. *Trudy VIII Mezhdunar. (XIX Vseros.) konf. po avtomatizirovannomu elektrovostroyeniyu AEP-2014 [Proceedings of the VIII Int. (XIX All-Russian) conf. on automated electric drive AEP-2014]*. Saransk: [S. 1.]; 2014. Vol. 2. P. 425–427. (In Russ.).

9. Klyuchev V. I. Teoriya elektrovostroyeniya: ucheb. dlya vuzov [Theory of electric drive: textbook]. 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 2001. 704 p. (In Russ.).

10. Kisarimov R. A. Elektroprivod: sprav. [Electric drive: handbook]. Moscow: RadioSoft Publ.; 2008. 352 p. (In Russ.).

11. Erofeev A. A. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control]. 2nd ed. St. Petersburg: Politekhnik Publ.; 2001. 304 p. (In Russ.).

12. Onishchenko G. B. Elektricheskiy privod: ucheb. dlya vuzov [Electric drive: textbook]. Moscow: RASKhN Publ.; 2003. 320 p. (In Russ.).

13. Pustovetov M. Yu., Pustovetov K. M. The Electromagnetic Torque Ripple of Three-Phase Induction Electric Machine, Operating as a Part of the Auxiliary Electric Drive Onboard of AC Electric Locomotive — a Factor Contributing to the Failure of Bearings. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, Vladivostok, October 3–4, 2018. Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2018. P. 8602672. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602672>.

14. Pustovetov M. Yu. Pul'satsii elektromagnitnogo momenta trekhfaznoy asinkhronnoy elektricheskoy mashiny, rabotayushchey v sostave vspomogatel'nogo elektrovostroyeniya elektrovozov peremennogo toka — faktor, sposobstvuyushchiy otkazam podshipnikov [The Electromagnetic Torque Ripple of Three-Phase Induction Electric Machine, Operating as a Part of the Auxiliary Electric Drive Onboard of AC Electric Locomotive — a Factor Contributing to the Failure of Bearings]. *Mekhanika XXI veku = Mechanical engineers to XXI century*. 2016;(15):331-337. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Михаил Юрьевич ПУСТОВЕТОВ,

канд. техн. наук, доцент по кафедре «Автоматизация и электропривод станочных систем», инженер-конструктор по электрической части, Судостроительно-судоремонтный завод «РИФ» (344019, г. Ростов-на-Дону, Россия, ул. 13-я линия, д. 93), Author ID: 416793, <https://orcid.org/0000-0001-7900-4407>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Mikhail Yu. PUSTOVETOV,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Automation and Electric Drives of Machine Tool Systems, Electrical Design Engineer, Shipbuilding and ship repair yard RIF (344019, Russia, Rostov-on-Don, 93, 13th line St.), Author ID: 416793, <https://orcid.org/0000-0001-7900-4407>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The author has read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 05.03.2022, первая рецензия получена 25.03.2022, вторая рецензия получена 11.04.2022, принята к публикации 26.05.2022.

The article was submitted 05.03.2022, first review received 25.03.2022, second review received 11.04.2022, accepted for publication 26.05.2022.