



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Научная статья

УДК 621.313.333

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-23-30

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ПРИВОДОМ
ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА****Ю. М. Кулинич, С. А. Шухарев** ✉, **В. К. Духовников, А. В. Гуляев**Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
Хабаровск, Российская Федерация**АННОТАЦИЯ**

Введение. Развитие силовой полупроводниковой техники и технологии послужило основой для внедрения на подвижном составе электрифицированных железных дорог принципиально новых типов частотно-регулируемых электроприводов с тяговыми асинхронными двигателями. В этой связи приобретают актуальность задачи теоретического и экспериментального исследования режимов работы таких приводов. Данная публикация является продолжением темы управления асинхронными машинами электровоза переменного тока, затронутой в № 5 журнала «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» в 2021 г.

Материалы и методы. Для анализа работы преобразователей частоты широко применяются методы математического моделирования, позволяющие оценить работу двигателя в различных режимах, не прибегая к трудоемким натурным испытаниям. В последнее время разработаны пакеты программ для визуального программирования, предназначенные главным образом для отечественных пользователей, которые не уступают по своим возможностям ведущим зарубежным аналогам. К числу таких программных продуктов относится программное обеспечение для моделирования технических систем SimInTech, разработанное компанией «ЗВ Сервис». Программное обеспечение ориентировано на решение различных прикладных задач, в частности на моделирование системы векторного управления асинхронным приводом.

Результаты. С помощью пакета прикладных программ SimInTech разработана математическая модель асинхронного привода вспомогательных машин электровоза во вращающейся системе координат $d-q$ с учетом взаимного влияния каналов управления d и q , представлены результаты имитационного моделирования.

Обсуждение и заключение. Разработанный комплекс из асинхронного двигателя и системы векторного управления позволяет обрабатывать различные алгоритмы повышения энергоэффективности работы асинхронных вспомогательных машин электровоза путем применения предложенного алгоритма выбора оптимальной величины потокосцепления ротора. Представленная структура векторного управления позволяет реализовать ее на базе современных микроконтроллеров, способствуя сокращению времени программирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электровоз переменного тока, вспомогательный привод, асинхронный электродвигатель, векторное управление, SimInTech, имитационное моделирование

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Для цитирования: Кулинич Ю. М., Шухарев С. А., Духовников В. К., Гуляев А. В. Моделирование векторного управления асинхронным приводом вспомогательных машин электроподвижного состава // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 23–30. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-23-30>.

✉ shuharevsa@gmail.com (С. А. Шухарев)

© Кулинич Ю. М., Шухарев С. А., Духовников В. К.,
Гуляев А. В., 2022



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 621.313.333

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-23-30



MODELING VECTOR CONTROL OF THE ASYNCHRONOUS DRIVE OF ELECTRIC ROLLING STOCK AUXILIARY MACHINES

Yuriy M. Kulinich, Sergey A. Shukharev ✉,
Vyacheslav K. Dukhovnikov, Alexander V. Gulyaev

Far Eastern State University of Transport (DVGUPS),
Khabarovsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The development of power semiconductor devices and technology served the basis for fundamentally new types of frequency-controlled electric drives with traction asynchronous motors on the rolling stock of electrified railways. Therefore, problems of theoretical and experimental study of the operating modes of the mentioned drives become actual. This article is a theme continuation of the asynchronous machines control on the AC locomotive, which was presented in no. 5 of Russian Railway Scientific Journal in 2021.

Materials and methods. For analysing the frequency converter operation, the authors used mathematical modeling methods, which allowed evaluating the motor operation in various modes without resorting to time-consuming full-scale tests. Recently, software packages for visual programming have been developed, aimed mainly at domestic users, which are not inferior in their capabilities to leading foreign counterparts. Among such software products is SimInTech software for modeling technical systems, developed by 3V Service. The software focuses on solving various applied problems, particularly, on modeling a vector control system for an asynchronous drive.

Results. The authors developed a mathematical model of an asynchronous drive of auxiliary machines of an electric locomotive in a rotating coordinate system $d-q$ by the SimInTech application package and concerning the cross-impact influence of d and q control channels.

Discussion and conclusion. The developed complex of an asynchronous motor and a vector control system enable to work out various algorithms for improving the energy efficiency of the operation of asynchronous auxiliary machines of an electric locomotive by applying the proposed algorithm for choosing the optimal value of the rotor flux linkage. The presented vector control structure also enables to implement it on the basis of modern microcontrollers, helping to reduce programming time.

KEYWORDS: AC locomotive, auxiliary drive, asynchronous electric motor, vector control, SimInTech, simulation modeling

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

For citation: Kulinich Yu. M., Shukharev S. A., Dukhovnikov V. K., Gulyaev A. V. Modeling vector control of the asynchronous drive of electric rolling stock auxiliary machines. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):23–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-23-30>.

Введение. Вопросам внедрения систем управления асинхронными двигателями в промышленности и на транспорте посвящен ряд работ отечественных ученых [1–4]. Основные принципы частотного (скалярного) управления асинхронным двигателем изложены в работе М. П. Костенко [5]. Методы управления асинхронным двигателем, уравнения которых представлены в векторной форме, ориентированной по направлению потокосцепления ротора (FOC — field oriented control), впервые сформулированы в 1971 г. Ф. Блашке (F. Blaschke) [6]. Электромагнитные процессы в двигателе описываются в системе координат $d-q$, вращающейся синхронно с магнитным полем двигателя. При этом система координат $d-q$ является ортогональной, т. е. с помощью продольной составляющей тока статора I_{Sd} можно независимо управлять потокосцеплением ротора Ψ_R , а поперечная составляющая тока статора I_{Sq} однозначно определяет угловую скорость вращения ротора двигателя ω .

В [7] представлена имитационная модель асинхронного двигателя в системе координат $d-q$, на базе которой исследована возможность повышения энергетической эффективности векторного управления асинхронным двигателем вспомогательных машин за счет выбора оптимальной величины потокосцепления ротора. Новизна выбранного подхода к решению задачи энергосбережения подтверждена положительным решением о выдаче патента от 30.11.2021 по заявке № 2021121608.

Целью исследования является разработка структуры векторного управления асинхронным двигателем на базе отечественного программного продукта SimInTech [8]. Это позволит обрабатывать различные алгоритмы для повышения энергоэффективности работы вспомогательных машин электроподвижного состава.

Уравнения асинхронного двигателя во вращающейся системе координат $d-q$. Из уравнений электрического равновесия статора и ротора обобщенной электрической машины, принимая напряжение короткозамкнутого ротора $U_R = 0$, можно получить систему уравнений, описывающих работу асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

В системе координат $d-q$, вращающейся с угловой скоростью ω , уравнения для проекций напряжения статора на оси координат d и q принимают вид [7, 9, 10]:

$$\begin{aligned} U_{Sd} &= I_{Sd}R_S + L_{\text{эКВ}} \frac{dI_{Sd}}{dt} - I_{Sq}\omega L_{\text{эКВ}} + K_2 \frac{d\Psi_R}{dt}; \\ U_{Sq} &= I_{Sq}R_S + L_{\text{эКВ}} \frac{dI_{Sq}}{dt} + I_{Sd}\omega L_{\text{эКВ}} + \omega K_2 \Psi_R, \end{aligned} \quad (1)$$

где R_S — активное сопротивление обмотки статора; $L_{\text{эКВ}}$ — общая индуктивность рассеяния статора, $L_{\text{эКВ}} = L_S(1 - K_1K_2)$; K_1 и K_2 — коэффициенты электро-

магнитной связи статора и ротора соответственно, $K_1 = L_m / L_S$, $K_2 = L_m / L'_R$ (L_m — индуктивность намагничивания; L_S — индуктивность статора; L'_R — индуктивность ротора, приведенная к статору).

Потокосцеплению ротора соответствует выражение

$$\frac{d\Psi_R}{dt} = \frac{1}{T_R}(L_m I_{Sd} - \Psi_R), \quad (2)$$

где T_R — постоянная времени обмотки ротора, $T_R = L'_R / R'_R$ (R'_R — активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к статору).

Электромагнитный момент M_{em} , развиваемый двигателем, рассчитывается в соответствии с формулой

$$M_{em} = \frac{3}{2} z_p K_2 \Psi_R I_{Sq}, \quad (3)$$

где z_p — число пар полюсов двигателя.

Уравнение электромеханического равновесия двигателя имеет вид

$$M_{em} - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (4)$$

где M_c — момент сопротивления на валу двигателя; J — момент инерции, приведенный к валу двигателя.

Из анализа системы уравнений (1) следует, что эти уравнения с перекрестными связями по координатным осям d и q , т. е. управление по координате тока I_{Sd} зависит от тока I_{Sq} и наоборот. Из-за этого между каналами регулирования составляющих тока статора происходит взаимовлияние, ухудшающее процесс регулирования. Для построения ортогональной (независимой по осям) системы управления двигателем необходимо компенсировать взаимное влияние друг на друга составляющих токов и внутренних ЭДС по осям d и q . В этом случае изменение одной из проекций тока статора (I_{Sd} или I_{Sq}) не будет оказывать влияние на другую, и управление электромагнитным моментом M_{em} и потокосцеплением ротора Ψ_R будет производиться независимо по двум каналам управления. Для осуществления такого управления следует компенсировать в каждом из уравнений системы (1) два последних составляющих напряжения с противоположными индексами. Выражения для напряжений компенсации по осям d и q при этом принимают вид

$$\begin{aligned} \Delta U_{Sd} &= -I_{Sq}\omega L_{\text{эКВ}} + K_2 \frac{d\Psi_R}{dt}; \\ \Delta U_{Sq} &= I_{Sd}\omega L_{\text{эКВ}} + \omega K_2 \Psi_R. \end{aligned} \quad (5)$$

Имитационное моделирование. На рис. 1 представлена структурная схема системы векторного управления асинхронным двигателем, реализованная в среде динамического моделирования технических систем SimInTech.

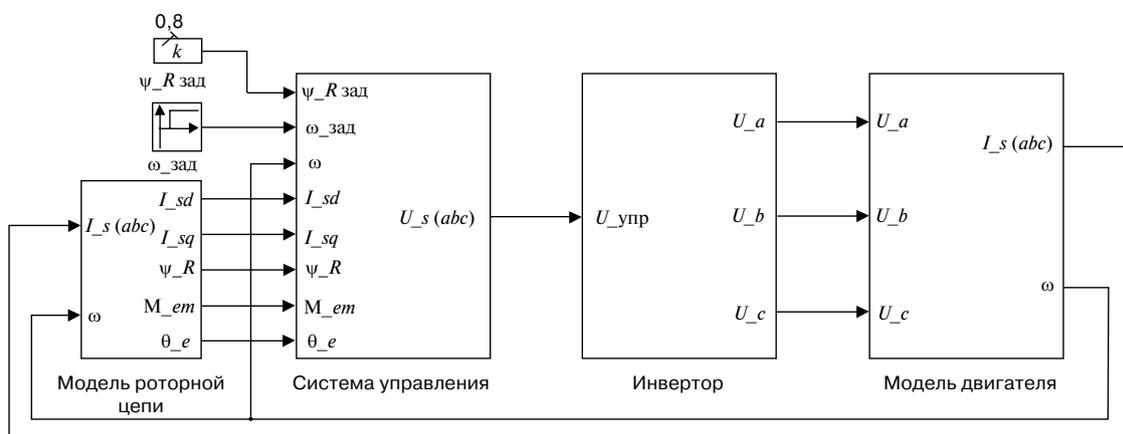


Рис. 1. Структурная схема системы векторного управления асинхронным двигателем в среде SimInTech: I_{sd} , I_{sq} — продольная и поперечная составляющие тока статора соответственно; M_{em} — электромагнитный момент; θ_e — фазный угол; Ψ_R — потокосцепление ротора; $\Psi_{R\text{зад}}$ — заданное потокосцепление ротора; ω — угловая скорость вращения ротора; $\omega_{\text{зад}}$ — заданная угловая скорость вращения ротора; $I_{S(abc)}$ — фазные токи статора; $U_{S(abc)}$ — выходное управляющее напряжение; $U_{\text{упр}}$ — входное управляющее напряжение

Fig. 1. Block diagram of a vector control system for an asynchronous motor in the SimInTech program: I_{sd} , I_{sq} — longitudinal and transverse components of the stator current, respectively; M_{em} — electromagnetic moment; θ_e — phase angle; Ψ_R — rotor flux linkage; $\Psi_{R\text{зад}}$ — selected rotor flux linkage; ω — angular speed of the rotor rotation; $\omega_{\text{зад}}$ — selected angular speed of the rotor rotation; $I_{S(abc)}$ — stator phase currents; $U_{S(abc)}$ — output control voltage; $U_{\text{упр}}$ — input control voltage

Структурная схема представлена блоками «Модель двигателя», «Инвертор», «Система управления» и «Модель роторной цепи». В основу блока «Модель двигателя» положена модель асинхронного двигателя НВА-55 мотор-вентилятора электровоза, имеющий следующие показатели [11] (см. таблицу).

Блок «Инвертор» представляет собой трехфазный автономный инвертор напряжения, выходные напряжения которого U_a , U_b и U_c сформированы методом широтно-импульсной модуляции [12] по синусоидальному закону с частотой модуляции 2 кГц.

Блок «Модель роторной цепи» предназначен для вычисления положения фазного угла θ_e потокосцепления ротора по величине угловой скорости вращения ротора ω в соответствии с выражением

$$\theta_e = z_p \theta_R + \frac{L_m}{\Psi_R T_R} \int I_{sq} dt, \quad (6)$$

где θ_R — угол поворота ротора.

Кроме этого, в блоке «Модель роторной цепи» происходит преобразование токов статора $I_{S(abc)}$ из неподвижной трехфазной системы координат $a-b-c$ во вращающуюся систему $d-q$. При этом преобразование происходит в два этапа: из неподвижной трехфазной системы координат $a-b-c$ в неподвижную декартову $\alpha-\beta$ с помощью преобразования [13]. Далее токи статора из неподвижной декартовой системы координат $\alpha-\beta$ преобразуются в токи вращающейся декартовой системы координат $d-q$ с помощью преобразо-

вания Парка [14]. Сигналы потокосцепления ротора Ψ_R и электромагнитного момента M_{em} на выходе блока формируются в соответствии с уравнениями (2) и (3).

Блок «Система управления» (рис. 2) представляет собой двухконтурную схему подчиненного регулирования по потокосцеплению ротора Ψ_R и угловой скорости вращения ротора ω . Внешние контуры регулирования по Ψ_R и ω формируют заданные значения токов $I_{sd\text{зад}}$ и $I_{sq\text{зад}}$ для внутренних контуров по соответствующим осям d и q . Внутренние контуры тока реализуют заданные значения этих токов.

Каждый из указанных контуров регулирования представляет собой регулятор по рассогласованию (ошибке). На его вход поступают сигналы заданного и фактического значения регулируемого параметра. Регулятор формирует управляющее воздействие, сводящее к нулю разность этих входных сигналов. В верхней части рис. 2 представлен регулятор потокосцепления РП, в нижней части рисунка — регулятор угловой скорости вращения РС. Исходными сигналами для этих каналов регулирования являются заданные значения потокосцепления ротора $\Psi_{R\text{зад}}$ и угловой скорости вращения ротора $\omega_{\text{зад}}$.

Во внешнем контуре регулятора потокосцепления с помощью элемента сравнения ЭС2 сравнивается заданное $\Psi_{R\text{зад}}$ и фактическое Ψ_R значение потокосцепления ротора. По сигналу рассогласования $\Delta\Psi_R = \Psi_{R\text{зад}} - \Psi_R$ регулятор потокосцепления формирует заданное значение сигнала тока статора $I_{sd\text{зад}}$ по оси d для внутреннего контура регулятора тока.

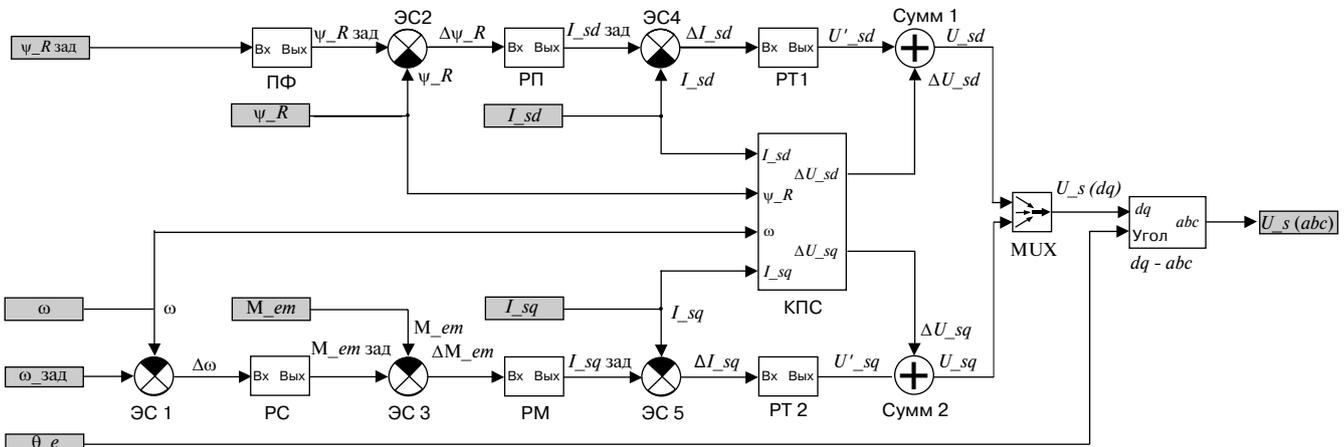


Рис. 2. Структурная схема блока «Система управления»:
 ЭС1–ЭС5 — элементы сравнения; Сумм1, Сумм2 — сумматоры; ПФ, РС, РП, РМ, РТ1, РТ2 — блоки передаточной функции;
 КПС — блок компенсатора перекрестных связей; MUX — мультиплексор; $dq-abc$ — координатный преобразователь
 Fig. 2. Block diagram of the “Control system” unit:
 ЭС1–ЭС5 — comparison elements; Сумм1, Сумм2 — adders; ПФ, РС, РП, РМ, РТ1, РТ2 — transfer function blocks;
 КПС — block of the cross connections compensator; MUX — multiplexer; $dq-abc$ — coordinate transducer

Во внутреннем контуре регулятора тока по оси d , состоящем из элемента сравнения ЭС4 и регулятора тока РТ1, формируется управляющее воздействие U'_{sd} . На входе ЭС4 сравнивается заданное $I_{sd\text{зад}}$ и фактическое значение I_{sd} тока статора по оси d . По сигналу рассогласования $\Delta I_{sd} = I_{sd\text{зад}} - I_{sd}$ регулятор тока РТ1 формирует управляющее воздействие U'_{sd} . Блок передаточной функции ПФ предназначен для плавного нарастания заданного значения потокоцепления ротора.

Аналогично работает канал регулирования угловой скорости вращения ротора. С помощью элемента сравнения ЭС1 происходит сравнение заданной $\omega_{\text{зад}}$ и фактической ω скорости вращения ротора. На выходе регулятора скорости РС по сигналу рассогласования $\Delta\omega$ формируется сигнал заданного значения электромагнитного момента $M_{em\text{зад}}$ для контура регулирования момента. На входе элемента сравнения ЭС3 сравнивается заданное $M_{em\text{зад}}$ и фактическое значение M_{em} электромагнитного момента. Регулятор момента РМ формирует заданное значение сигнала тока статора по оси q для внутреннего контура регулятора тока. Во внутреннем контуре регулятора тока по оси q , состоящем из элемента сравнения ЭС5 и регулятора тока РТ2, формируется управляющее воздействие U'_{sq} .

Блок компенсатора перекрестных связей КПС в соответствии с выражением (5) формирует компенсирующие напряжения ΔU_{sd} и ΔU_{sq} по осям d и q , которые с помощью соответствующих сумматоров Сумм1 и Сумм2 складываются с выходными сигналами управления по каналам потокоцепления U'_{sd} и угловой скорости ротора U'_{sq} . Эти сигналы через мультиплексор MUX поступают на вход координатного

преобразователя $dq-abc$, в котором по сигналу положения фазного угла θ_e происходит преобразование управляющих сигналов из вращающейся декартовой системы координат $d-q$ в неподвижную трехфазную $a-b-c$ с помощью обратных преобразований [13, 14]. В соответствии с выходными сигналами $U_{s(abc)}$ блока

Конструктивные показатели асинхронного двигателя НВА-55
Structural features of НВА-55 asynchronous motor

Наименование показателя, размерность	Обозначение	Значение
Номинальная мощность на валу двигателя, кВт	$P_{2н}$	55
Линейное напряжение статора, В	$U_{лн}$	380
Номинальное значение КПД, %	η_n	90,2
Номинальное значение $\cos\varphi$	$\cos\varphi_n$	0,82
Номинальное скольжение, %	s_n	4
Число пар полюсов	z_p	2
Номинальная частота вращения, 1/с	n_n	1440
Номинальная угловая скорость, рад/с	ω_n	150,79
Номинальный момент, Н·м	M_n	364,73
Сопrotивление обмотки статора, Ом	R_s	0,0429
Сопrotивление обмотки ротора (приведенное), Ом	R'_R	0,0875
Индуктивность намагничивания, Гн	L_m	0,0109817
Индуктивность статора, Гн	L_s	0,0113955
Индуктивность ротора (приведенное), Гн	L'_R	0,0113700
Общая индуктивность рассеяния статора, Гн	$L_{\text{экв}}$	0,000788839

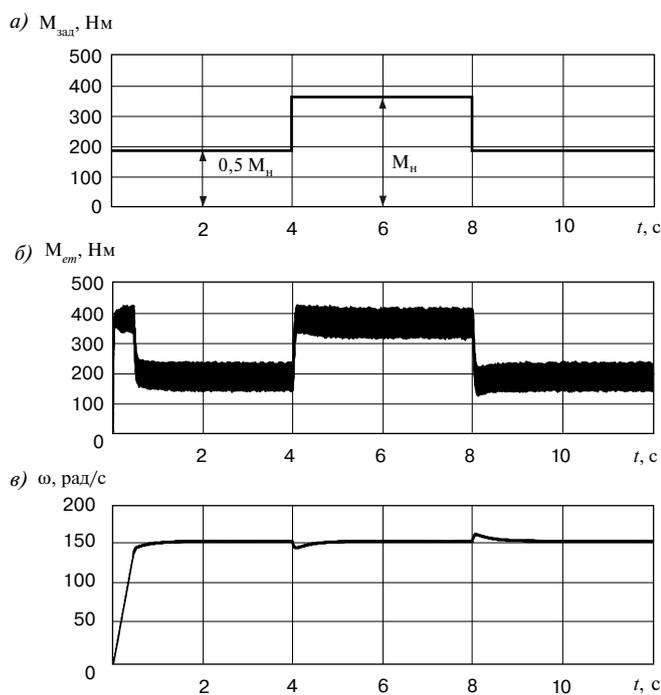


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования системы векторного управления асинхронным двигателем:
 а — заданный момент $M_{зад}$; б — электромагнитный момент $M_{эм}$;
 в — угловая скорость вращения ротора ω

Fig. 3. Results of simulation modeling of a vector control system for an asynchronous motor:
 a — selected moment $M_{зад}$; b — electromagnetic moment $M_{эм}$;
 c — angular speed of the rotor rotation ω

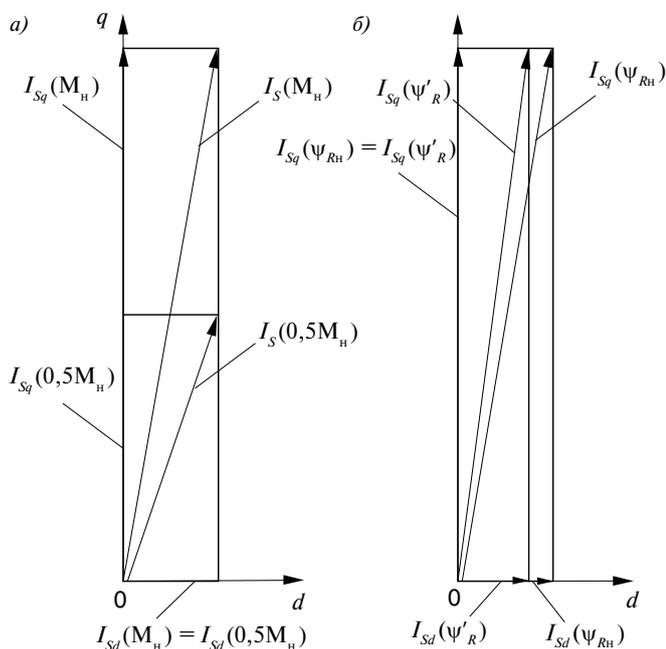


Рис. 4. Векторные диаграммы управления асинхронным двигателем:
 а — при изменении электромагнитного момента $M_{эм}$;
 б — при изменении потокосцепления ротора ψ_R

Fig. 4. Vector diagrams for controlling an asynchronous motor:
 a — at the electromagnetic torque $M_{эм}$ change;
 b — at the rotor flux linkage ψ_R change

системы управления происходит формирование выходных сигналов инвертора.

При моделировании любой системы регулирования значительные затраты времени связаны с настройкой регуляторов, поскольку их коэффициенты подбираются преимущественно эмпирическим путем. Элемент «Оптимизатор» в среде SimInTech позволяет автоматизировать процесс настройки регуляторов по времени переходного процесса и величине перерегулирования, сокращая при этом время проектирования. При помощи элемента «Оптимизатор» были настроены все имеющиеся регуляторы: РС, РП, РМ, РТ1 и РТ2.

Результаты моделирования. На рис. 3 представлены результаты имитационного моделирования системы векторного управления асинхронным двигателем.

Моделирование проводилось при двух значениях заданного момента: $M_{зад} = M_n$ и $M_{зад} = 0,5M_n$ (рис. 3, а). Из рис. 3, б следует, что развиваемое двигателем значение электромагнитного момента $M_{эм}$ соответствует заданному. Пульсации в форме сигнала $M_{эм}$ связаны с работой инвертора. На рис. 3, в представлена диаграмма угловой скорости вращения ротора, которая наглядно показывает, что система векторного управления поддерживает заданное значение угловой скорости ротора $\omega_{зад} = 150,79$ рад/с независимо от развиваемого двигателем электромагнитного момента.

На рис. 4 показаны векторные диаграммы системы управления асинхронным двигателем, полученные в результате имитационного моделирования.

Векторные диаграммы соответствуют работе электропривода при изменении одного из задающих воздействий: электромагнитного момента на валу двигателя (рис. 4, а) и потокосцепления ротора (рис. 4, б).

Из рис. 4, а следует, что увеличение момента нагрузки от $0,5M_n$ до M_n приводит к увеличению тока статора. При этом изменяется только составляющая тока статора I_{Sq} по оси q , проекция тока I_{Sd} на ось d остается неизменной.

Уменьшение величины потокосцепления от номинального значения ψ_{Rn} до некоторой величины ψ'_R (рис. 4, б) вызывает уменьшение проекции тока статора I_{Sd} на ось d , другая составляющая тока I_{Sq} в проекции на ось q при этом не изменяется.

Из рис. 4 следует вывод о том, что регулирование величины момента и потокосцепления при векторном управлении происходит независимо друг от друга. Величина электромагнитного момента определяется составляющей тока статора I_{Sq} по оси q , а величина потокосцепления зависит только от составляющей тока статора I_{Sd} по оси d вращающейся декартовой системы координат $d-q$.

Заключение. Разработанная структура векторного управления асинхронным двигателем позволя-

ет обрабатывать различные алгоритмы повышения энергоэффективности работы вспомогательных машин электровоза путем применения предложенного алгоритма выбора оптимальной величины потокосцепления ротора. При этом в соответствии со стратегией импортозамещения используется отечественная среда для моделирования технических систем SimInTech. При моделировании во вращающейся системе координат $d-q$ учтено взаимное влияние каналов управления друг на друга и скомпенсировано влияние составляющих тока статора I_{sd} и I_{sq} . Представленная структура управления позволяет реализовать ее на базе современных микроконтроллеров, способствуя сокращению времени программирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Космодамианский А. С., Воробьев В. И., Пугачев А. А. Системы скалярного управления тяговым асинхронным двигателем // *Электротехника*. 2016. № 9. С. 44–50.
2. Ключников А. Т., Турпак А. М. Бездатчиковое векторное управление асинхронным двигателем при расчете в комплексной форме // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2020. № 33. С. 160–176.
3. Космодамианский А. С., Воробьев В. И., Пугачев А. А. Моделирование электропривода с асинхронным двигателем в режиме минимума мощности потерь // *Электротехника*. 2012. № 12. С. 26–31.
4. Шонин О. Б., Пронько В. С. Энергосберегающие алгоритмы частотного управления асинхронным приводом с уточнением области минимума потерь на основе методов нечеткой логики // *Записки Горного института*. 2016. Т. 218. С. 270–280.
5. Костенко М. П. Электрические машины. Специальная часть. Л.: Госэнергоиздат, 1949. 708 с.
6. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die Transvektor-Regelung von Drehfeldmaschinen (in German) // *Siemens-Zeitschrift*. 1971. 10/45. S. 757–760.
7. Кулинич Ю. М., Шухарев С. А., Гуляев А. В. Повышение энергетической эффективности вспомогательных машин электровоза переменного тока // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2021. Т. 80, № 5. С. 276–284. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-276-284>.
8. Калачёв Ю. Н. SimInTech: моделирование в электроприводе. М.: ДМК Пресс, 2019. 98 с.
9. Усольцев А. А. Частотное управление асинхронными двигателями: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 94 с.
10. Асинхронный тяговый привод локомотивов: учеб. пособие / А. А. Андрищенко [и др.]. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2013. 413 с.
11. Пустоветов М. Моделирование асинхронных вспомогательных машин электровозов. Дюссельдорф: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 177 с.
12. Кулинич Ю. М. Электронная преобразовательная техника: учеб. пособие. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2015. 204 с.
13. Clarke E. Circuit Analysis of AC Power Systems. New York: John Wiley & Sons, 1943. Vol. 1. 540 p.
14. Pradeep J., Devanathan R. Adoption of Park's Transformation for Inverter Fed Drive // *International Journal of Power Electronics and Drive System*. 2015. Vol. 5, no. 3. P. 366–373.

REFERENCES

1. Kosmodamianskiy A. S., Vorob'ev V. I., Pugachev A. A. Sistemy skalyarnogo upravleniya tyagovym asinkhronnym dvigatelem [Systems of scalar control of a traction asynchronous motor]. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*. 2016;(9):44–50. (In Russ.).
2. Klyuchnikov A. T., Turpak A. M. Bezdatchikovoe vektornoe upravlenie asinkhronnym dvigatelem pri raschete v kompleksnoy forme [Sensorless vector control of an asynchronous motor when calculating in a complex form]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrotechnics, informational technologies, control systems*. 2020;(33):160–176. (In Russ.).
3. Kosmodamianskiy A. S., Vorob'ev V. I., Pugachev A. A. Modelirovanie elektroprivoda s asinkhronnym dvigatelem v rezhime minimuma moshchnosti poter' [Modeling of an electric drive with an asynchronous motor in the mode of minimum power loss]. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*. 2012;(12):26–31. (In Russ.).
4. Shonin O. B., Pron'ko V. S. Energoberegayushchie algoritmy chastotnogo upravleniya asinkhronnym privodom s utochneniem oblasti minimuma poter' na osnove metodov nechetkoy logiki [Energy-saving algorithms for frequency control of an asynchronous drive with specification of the area of minimum losses based on fuzzy logic methods]. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2016;(218):270–280. (In Russ.).
5. Kostenko M. P. Elektricheskie mashiny. Spetsial'naya chast' [Electrical Machines. Special part]. Leningrad: Gosenergoizdat Publ.; 1949. 708 p. (In Russ.).
6. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die Transvektor-Regelung von Drehfeldmaschinen (in German). *Siemens-Zeitschrift*. 1971;10(45):757–760.
7. Kulinich Yu. M., Shukharev S. A., Gulyaev A. V. Povysenie energeticheskoy effektivnosti vspomogatel'nykh mashin elektrovoza peremennogo toka [Increasing the energy efficiency of auxiliary machines of AC electric locomotive]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2021;80(5):276–284. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-276-284>. (In Russ.).
8. Kalachev Yu. N. SimInTech: modelirovanie v elektroprivode [SimInTech: simulation in the electric drive]. Moscow: DMK Press; 2019. 98 p. (In Russ.).
9. Usolt'sev A. A. Chastotnoe upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami: ucheb. posobie [Frequency control of asynchronous motors: Tutorial]. St. Petersburg: SPbGU ITMO Publ.; 2006. 94 p. (In Russ.).
10. Andriyushchenko A. A., Babkov Yu. V., Zarifyan A. A., et al. Asinkhronnyy tyagovyy privod lokomotivov: ucheb. posobie [Asynchronous traction drive of locomotives: Tutorial]. Moscow: Ucheb.-metod. tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transporte [Educational and methodological center for education in railway transport] Publ.; 2013. 413 p. (In Russ.).
11. Pustovetov M. Modelirovanie asinkhronnykh vspomogatel'nykh mashin elektrovozov [Modeling of asynchronous auxiliary machines of electric locomotives]. Dusseldorf: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2016. 177 p. (In Russ.).
12. Kulinich Yu. M. Elektronnaya preobrazovatel'naya tekhnika: ucheb. posobie [Electronic converting technology: Tutorial]. Moscow: Ucheb.-metod. tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transporte [Educational and methodological center for education in railway transport] Publ.; 2015. 204 p. (In Russ.).
13. Clarke E. Circuit Analysis of AC Power Systems. New York: John Wiley & Sons; 1943. Vol. 1. 540 p.
14. Pradeep J., Devanathan R. Adoption of Park's Transformation for Inverter Fed Drive. *International Journal of Power Electronics and Drive System*. 2015;5(3):366–373.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юрий Михайлович КУЛИНИЧ,

д-р техн. наук, профессор, кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО «ДВГУПС», AuthorID: 360696, <https://orcid.org/0000-0002-7725-8152>

Сергей Анатольевич ШУХАРЕВ,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО «ДВГУПС», AuthorID: 889967, <https://orcid.org/0000-0001-7856-6651>

Вячеслав Константинович ДУХОВНИКОВ,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО «ДВГУПС», AuthorID: 616256, <https://orcid.org/0000-0002-8060-3754>

Александр Викторович ГУЛЯЕВ,

доцент, кафедра «Электротехника, электроника и электромеханика», ФГБОУ ВО «ДВГУПС», AuthorID: 718358, <https://orcid.org/0000-0001-7412-3298>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuriy M. KULINICH,

Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department "Railway Transport", FGBOU VO "DVGUPS", AuthorID: 360696, <https://orcid.org/0000-0002-7725-8152>

Sergey A. SHUKHAREV,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of "Railway Transport", FGBOU VO "DVGUPS", AuthorID: 889967, <https://orcid.org/0000-0001-7856-6651>

Vyacheslav K. DUHOVNIKOV,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department "Railway Transport", FGBOU VO "DVGUPS", AuthorID: 616256, <https://orcid.org/0000-0002-8060-3754>

Alexander V. GULYAEV,

Associate Professor, Department "Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics", FGBOU VO "DVGUPS", AuthorID: 718358, <https://orcid.org/0000-0001-7412-3298>

ВКЛАД АВТОРОВ

Юрий Михайлович КУЛИНИЧ. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, анализ результатов (30%).

Сергей Анатольевич ШУХАРЕВ. Имитационное моделирование (30%).

Вячеслав Константинович ДУХОВНИКОВ. Вывод уравнений асинхронного двигателя во вращающейся системе координат (30%).

Александр Викторович ГУЛЯЕВ. Обзор систем векторного управления асинхронным приводом (10%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Yuriy M. KULINICH. Formation of research direction, formulation of goals and objectives, analysis of results (30%).

Sergey A. SHUKHAREV. Simulation modeling (30%).

Vyacheslav K. DUHOVNIKOV. Derivation of the equations of an asynchronous motor in a rotating coordinate system (30%).

Alexander V. GULYAEV. Overview of vector control systems for asynchronous drives (10%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

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

Статья поступила в редакцию 01.02.2022, первая рецензия получена 03.02.2022, вторая рецензия получена 08.02.2022, принята к публикации 14.02.2022.

The article was submitted 01.02.2022, first review received 03.02.2022, second review received 08.02.2022, accepted for publication 14.02.2022.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

На сайте www.elibrary.ru открыт доступ к электронным версиям статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта».

Для работы с фондами библиотеки пользователю необходимо самостоятельно зарегистрироваться, заполнив регистрационную форму на главной странице eLibrary.ru. Доступ возможен по Вашему логину и паролю с любого компьютера, имеющего выход в интернет.

Материалы журнала, размещенные на сайте Научной электронной библиотеки для свободного использования, допускаются использовать, копировать, цитировать исключительно в некоммерческих целях с соблюдением соответствующих положений действующего авторского законодательства (Гражданский кодекс РФ от 18.12.2006 № 230-ФЗ, Часть IV; Глава 70 «Авторское право») с обязательным указанием имени автора/ов произведения и источника заимствования.

На сайте журнала www.journal-vniizht.ru контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.