



АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Оригинальная статья

УДК 621.313.333:621.316.71

DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-1-70-79

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



ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ПРИВОДОМ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Ю. М. Кулинич, С. А. Шухарев✉,
В. К. Духовников, Д. А. Стародубцев

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
Хабаровск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена задача повышения энергоэффективности асинхронного привода, в частности, вспомогательных электрических машин электровоза. Эта публикация является продолжением тематики оптимального управления асинхронными машинами, начатой в №5, 2021 г. и №1, 2022 г. в журнале «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта».

Материалы и методы. Для расчета динамических характеристик асинхронного привода применено программное обеспечение SimInTech российской компании «ЗВ Сервис», предназначенное для моделирования различных прикладных задач. С помощью пакета прикладных программ SimInTech разработана математическая модель предлагаемой системы оптимального векторного управления асинхронным двигателем.

Результаты. Было установлено, что применение разработанной системы оптимального управления позволяет уменьшить потребляемый двигателем ток. Представленные результаты имитационного моделирования подтвердили правильность принятых схемотехнических решений.

Обсуждение и заключение. Предложенная система оптимального управления вспомогательными машинами электровоза предназначена для повышения энергоэффективности привода за счет применения нового алгоритма выбора оптимальной величины потокосцепления ротора, которая позволяет уменьшить величину потребляемого двигателем тока. Представленная структура векторного управления может быть успешно реализована на базе современных микроконтроллеров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электровоз, вспомогательные электромашины, асинхронный двигатель, векторное управление, оптимальное потокосцепление, имитационное моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кулинич Ю. М., Шухарев С. А., Духовников В. К., Стародубцев Д. А. Оптимальное управление асинхронным приводом вспомогательных машин электроподвижного состава // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 1. С. 70–79. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-1-70-79>.

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

© Кулинич Ю. М., Шухарев С. А., Духовников В. К.,
Стародубцев Д. А., 2023



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 621.313.333:621.316.71

DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-1-70-79

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



OPTIMAL CONTROL OF ASYNCHRONOUS DRIVE OF AUXILIARY MACHINES OF ELECTRIC ROLLING STOCK

Yuriy M. Kulinich, Sergey A. Shukharev✉,
Vyacheslav K. Dukhovnikov, Dmitriy A. Starodubtsev

Far Eastern State Transport University,
Khabarovsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors considered the problem of increasing the energy efficiency of an asynchronous drive, in particular, auxiliary electric machines of an electric locomotive. The publication continues the topic of optimal control of asynchronous machines from the past articles in No. 5, 2021 and No. 1, 2022 of the Russian Railway Science Journal.

Materials and methods. The calculation of the dynamic characteristics of an asynchronous drive used the SimInTech software of 3V Service, a Russian company, designed to simulate various applied problems. The SimInTech software package was used in the development of a mathematical model of the proposed system for optimal vector control of an asynchronous drive.

Results. The authors have found that the developed system of optimal control enables to reduce the current consumed by the asynchronous drive. These simulation modeling results confirmed that the adopted circuit solutions are correct.

Discussion and conclusion. The proposed system of optimal control of electric locomotive auxiliary machines is designed to improve the energy efficiency of the drive with a new algorithm for selecting the optimal value of the rotor flux linkage by reducing the current consumed by the drive. This vector control structure could be successfully implemented on the basis of modern microcontrollers.

KEYWORDS: electric locomotive, auxiliary electric machines, asynchronous drive, vector control, optimal flux linkage, simulation modeling

FOR CITATION: Kulinich Yu. M., Shukharev S. A., Dukhovnikov V. K., Starodubtsev D. A. Optimal control of asynchronous drive of auxiliary machines of electric rolling stock. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(1):70-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-1-70-79>.

✉ shuharevsa@gmail.com (S. A. Shukharev)

© Kulinich Yu. M., Shukharev S. A., Dukhovnikov V. K.,
Starodubtsev D. A., 2023

Введение. Успехи в развитии силовой и информационной электроники послужили основой для внедрения на подвижном составе железных дорог нового типа электропривода для управления асинхронными машинами. На Дальневосточной железной дороге успешно прошли испытания нового типа электровоза 2ЭС5С с асинхронными двигателями, и в настоящее время ожидается поступление на дорогу этих электровозов. В этой связи становится актуальной задача повышения энергоэффективности асинхронного привода, в частности, вспомогательных электрических машин электровоза.

Оптимальному управлению асинхронным двигателем посвящен ряд публикаций. Так, в работе [1] в качестве критерия энергоэффективности управления асинхронным двигателем выбран минимум потерь электроэнергии, что позволяет управлять двигателем с более высоким значением показателя качества энергоэффективности в отличие от систем управления с постоянным током намагничивания. В изобретении [2] техническим результатом является достижение максимальных значений КПД двигателя и максимальных электромагнитных моментов в системах с векторным управлением асинхронным двигателем. В патенте [3] минимизация потерь энергии при регулировании момента и скорости вращения достигается за счет векторного регулирования токов в двухфазной системе напряжений статора u_{Sa} и $u_{S\beta}$ путем вычисления фазы и амплитуды потокосцепления ротора в неподвижной системе координат. Исходя из анализа опубликованных работ в области повышения энергоэффективности асинхронного привода была определена цель данного исследования: повышение энергетических показателей системы векторного управления двигателем за счет выбора оптимального значения потокосцепления ψ_R^{opt} в режимах его работы, отличных от номинального. Это значение определяется критерием минимального потребления тока статора двигателя в зависимости от заданных значений электромагнитного момента M_{em} на валу двигателя.

Обоснование структуры системы управления. В работе [4] анализ электромагнитных процессов в асинхронном двигателе выполнен во вращающейся системе координат dq , в которой уравнение электромагнитного момента асинхронного двигателя представлено в виде

$$M_{em} = \frac{3}{2} z_p \frac{L_m}{L_R} |\vec{\psi}_R \vec{i}_S| = \frac{3}{2} z_p \frac{L_m}{L_R} (\psi_{Rd} i_{Sq} - \psi_{Rq} i_{Sd}), \quad (1)$$

где z_p — число пар полюсов двигателя; ψ_R — потокосцепление ротора; L_m — индуктивность намагничивания; L_R — индуктивность ротора; i_S — ток статора двигателя.

Векторы тока статора \vec{i}_S и потокосцепления ротора $\vec{\psi}_R$ вращаются в пространстве с угловой частотой

$\omega_1 = 2\pi f_1 / z_p$. Если выбрать систему координат, также вращающуюся в пространстве с синхронной частотой ω_1 , то проекции векторов тока \vec{i}_S и потокосцепления $\vec{\psi}_R$ будут постоянными величинами. Систему векторного управления можно существенно упростить, если совместить одну из осей вращающейся системы координат с одним из векторов \vec{i}_S или $\vec{\psi}_R$. В этом случае проекция выбранного вектора на эту ось определяется его модулем, а проекция на другую ось будет равна нулю. Благодаря этому существенно упростится выражение (1) для электромагнитного момента. Так, если вектор потокосцепления направить вдоль продольной оси d , то его проекции на оси d и q будут равны: $\psi_{Rd} = \psi_R$, а $\psi_{Rq} = 0$, поэтому уравнение (1) принимает вид

$$M_{em} = \frac{3}{2} z_p \frac{L_m}{L_R} \psi_{Rd} i_{Sq} = \frac{3}{2} z_p K_R \psi_{Rd} i_{Sq}, \quad (2)$$

где K_R — коэффициент электромагнитной связи ротора.

Если в системе управления асинхронным двигателем потокосцепление ротора ψ_R оставить неизменным во всех режимах работы, то в соответствии с выражением (2) изменение электромагнитного момента M_{em} можно осуществлять только за счет поперечной составляющей тока статора i_{Sq} . При этом продольная составляющая тока статора i_{Sd} не оказывает влияние на величину развиваемого момента M_{em} .

Вращающаяся система координат dq является ортогональной, т. е. изменение одной из проекций тока статора никак не влияет на другую. Это означает, что управление величиной момента и потокосцепления осуществляется независимо. Таким образом, векторное управление заключается в раздельном регулировании магнитного потока Φ и электромагнитного момента M_{em} двигателя с помощью независимых составляющих проекций тока статора i_{Sd} и i_{Sq} на оси системы вращающихся координат dq , ориентированной по направлению вектора потокосцепления ротора. Векторные диаграммы управления двигателем при изменении электромагнитного момента M_{em} и потокосцепления ротора ψ_R приведены в [5].

Векторное управление с постоянным значением потокосцепления $\psi_R = \text{const}$ имеет ограниченные энергетические характеристики, обусловленные увеличенным потреблением тока статора в режимах работы двигателя, отличных от номинального.

Оптимальное значение потокосцепления ψ_R^{opt} по критерию минимального значения тока статора i_S при фиксированном значении момента M_{em} определяется аналитическим выражением [6]:

$$\psi_R^{opt} = \sqrt{\frac{2M_{em}}{3z_p} (L_{\sigma R} + L_m)}, \quad (3)$$

где $L_{\sigma R}$ — индуктивность рассеяния ротора.

Применение в прикладных разработках закона оптимального управления потокосцеплением в аналитическом виде весьма затруднительно, поскольку это требует построения точной модели двигателя с изменяющимися параметрами его обмоток, которые зависят от температуры, влажности и срока службы двигателя [7]. Кроме того, изменяющиеся со временем магнитные характеристики двигателя также влияют на входящие в формулу (3) параметры. Это приводит к отклонению от оптимального режима работы двигателя и требует периодической коррекции значения оптимального потокосцепления, что на практике является проблематичным.

В итеративных поисковых системах управления электроприводом не требуется знания электрических параметров двигателя, поскольку эти системы основаны на шаговом изменении управляющего воздействия (величины потокосцепления) до достижения минимального значения потребляемого двигателем тока.

На рис. 1 представлена предлагаемая структурная схема электропривода с оптимальным управлением асинхронным двигателем по критерию минимизации тока статора.

Схема выполнена в виде двух управляющих контуров: по оптимальной величине потокосцепления ротора и угловой частоте вращения вала двигателя. Векторное управление двигателем реализовано на принципе раздельного управления потокосцеплением ψ_R и электромагнитным моментом M_{em} с помощью независимых составляющих тока статора i_{sd} и i_{sq} , представляющих собой проекции тока статора i_s на оси d и q вращающейся системы координат.

Система оптимального управления асинхронным двигателем работает следующим образом.

Задатчик скорости ЗС формирует сигнал заданной скорости вращения асинхронного двигателя ω_R^* , который с помощью первого элемента сравнения ЭС1 сравнивается с фактической скоростью вращения двигателя ω_R . Сигнал рассогласования (ошибки) по скорости $\Delta\omega_R = \omega_R^* - \omega_R$ с выхода элемента сравнения ЭС1 поступает на вход регулятора скорости РС, в котором из сигнала рассогласования по скорости $\Delta\omega_R$ вырабатывается сигнал заданного значения электромагнитного момента M_{em}^* на валу двигателя.

Сигнал оптимального значения потокосцепления ψ_R^{opt} поступает на вход вычислителей тока статора двигателя i_{sd}^* и i_{sq}^* , в которых рассчитываются заданные значения проекций тока статора двигателя на оси dq вращающейся системы координат, обеспечивающие оптимальную величину потокосцепления в соответствии с выражениями

$$i_{sd}^* = \psi_R^{opt} / L_m; i_{sq}^* = 2M_{em}^* / 3z_p \psi_R^{opt}. \quad (4)$$

В вычислителе скольжения ВС рассчитывается скорость скольжения ротора $\Delta\omega$ при оптимальном значении потокосцепления ψ_R^{opt} и заданном значении электромагнитного момента M_{em}^* :

$$\Delta\omega = \frac{2R_R}{3z_p (\psi_R^{opt})^2} M_{em}^*, \quad (5)$$

где R_R — активное сопротивление роторной цепи двигателя.

Второй ЭС2 и третий ЭС3 элементы сравнения вычисляют разности между заданными и фактическими значениями проекций тока статора $i_{sd}^* - i_{sd}$ и $i_{sq}^* - i_{sq}$ на оси d и q вращающейся системы координат dq . Эти сигналы поступают на входы первого РТ1 и второго РТ2 регуляторов тока, в которых формируются сигналы заданных значений проекций u_{sd}^* и u_{sq}^* на вращающуюся систему координат dq .

С помощью первого преобразователя координат ПК1 происходит преобразование заданных значений сигналов u_{sd}^* и u_{sq}^* из вращающейся системы координат dq в заданные величины напряжений $u_a^* - u_b^* - u_c^*$ для неподвижной трехфазной системы координат abc . По величине этих сигналов, а также напряжению сети в преобразователе частоты ПЧ происходит формирование трехфазной системы напряжений $u_A - u_B - u_C$ для асинхронного двигателя, удовлетворяющих заданным оптимальным значениям потокосцепления ψ_R^{opt} и скорости вращения двигателя ω_R^* .

С помощью второго преобразователя координат ПК2 происходит преобразование текущих значений токов статора асинхронного двигателя из трехфазной неподвижной системы координат abc во вращающуюся систему dq . На выходе преобразователя ПК2 формируются сигналы фактических значений тока статора двигателя i_{sd} и i_{sq} в проекциях на вращающиеся оси координат dq , которые сравниваются с их заданными значениями i_{sd}^* и i_{sq}^* на входе элементов сравнения ЭС2 и ЭС3.

Для работы преобразователей координат необходимо знать текущее значение угла поворота θ между вращающейся и неподвижной системами координат. Сигналы $\sin\theta$ и $\cos\theta$ вычисляются с помощью вычислителя угла потокосцепления ВУП и поступают на входы преобразователей ПК1 и ПК2 для выполнения процедуры преобразования координат.

Входными сигналами вычислителя ВУП являются скорость скольжения ротора $\Delta\omega$, рассчитанная в вычислителе ВС, а также текущее значение скорости вращения двигателя ω_R , измеренное с помощью датчика скорости ДС, установленного на роторе асинхронного двигателя. Угол положения потокосцепления ротора θ относительно неподвижной системы

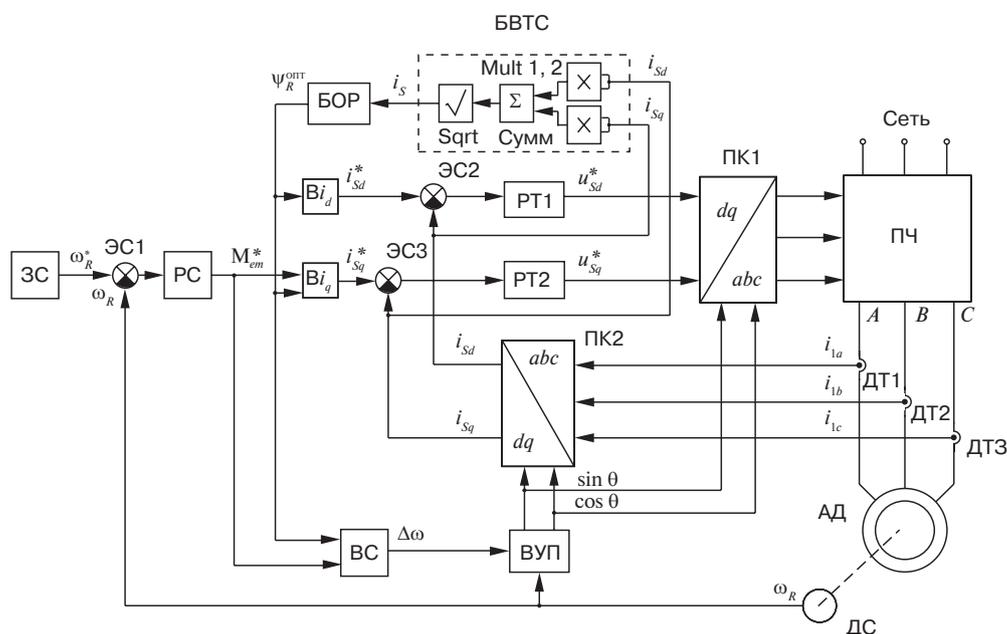


Рис. 1. Структурная схема электропривода с оптимальным управлением:

ПЧ — преобразователь частоты; АД — асинхронный двигатель; ДС — датчик скорости; ДТ1–ДТ3 — датчики тока; ЗС — задатчик скорости; РС — регулятор скорости; РТ1, РТ2 — регуляторы тока; ПК1, ПК2 — преобразователи координат; Bi_d, Bi_q — вычислители d и q — составляющих тока статора; ЭС1–ЭС3 — элементы сравнения; БВТС — блок вычисления тока статора; БОР — блок оптимального регулирования; ВУП — вычислитель угла потокосцепления; ВС — вычислитель скольжения

Fig. 1. Structure diagram of an electric drive with optimal control:

ПЧ — frequency converter; АД — asynchronous drive; ДС — speed sensor; ДТ1–ДТ3 — current sensors; ЗС — speed setter; РС — speed controller; РТ1, РТ2 — current controllers; ПК1, ПК2 — coordinate converter; Bi_d, Bi_q — computing devices d and q — of the stator current components; ЭС1–ЭС3 — comparing elements; БВТС — stator current computing unit; БОР — optimal control unit; ВУП — flux linkage angle computing unit; ВС — glide computing unit

координат определяется в результате интегрирования входных сигналов:

$$\theta = z_p \int \omega_R dt + \int \Delta\omega dt. \quad (6)$$

Сигнал текущего значения скорости вращения двигателя ω_R поступает также на второй вход элемента сравнения ЭС1, где сравнивается с заданным значением ω_R^* .

В блоке вычислителя тока статора БВТС происходит вычисление текущего значения сигнала тока статора i_s по сигналам фактических значений тока i_{sd} и i_{sq} в проекциях на оси вращающейся системы координат dq по формуле

$$i_s = \sqrt{(i_{sd})^2 + (i_{sq})^2}. \quad (7)$$

В соответствии с формулой (7) возведение во вторую степень сигналов i_{sd} и i_{sq} осуществляется с помощью умножителей Mult 1 и 2, а сложение — с помощью сумматора Сумм, сигнал тока статора i_s формируется на выходе вычислителя квадратного корня Sqrt.

Рассмотрим более детально принцип работы основных блоков, составляющих структурную схему электропривода на рис. 1.

Блок оптимального регулирования. Сигнал i_s , пропорциональный току статора двигателя, рассчитанный в блоке БВТС, поступает на вход блока оптимального регулирования БОР, осуществляющего поиск потокосцепления ψ_R в области минимальных значений тока статора. Поиск ψ_R^{opt} осуществляется за счет ступенчатого изменения сигнала ψ_R на выходе блока БОР на величину шага поиска потокосцепления $\Delta\psi_R$ как в сторону увеличения, так и уменьшения. Схема блока оптимального регулирования, реализованная в программе SimInTech [8], показана на рис. 2.

Алгоритм поиска оптимального значения потокосцепления ψ_R^{opt} заключается в следующем: сигнал тока статора i_s поступает на вход экстраполятора нулевого порядка Extr, который фиксирует текущее значение тока i_{Si} в конце каждого шага поиска. С помощью линии задержки Z_1 и элемента сравнения ЭС вычисляется величина приращения тока статора $\Delta i_s = i_{Si} - i_{S(i-1)}$ на каждом шаге поиска.

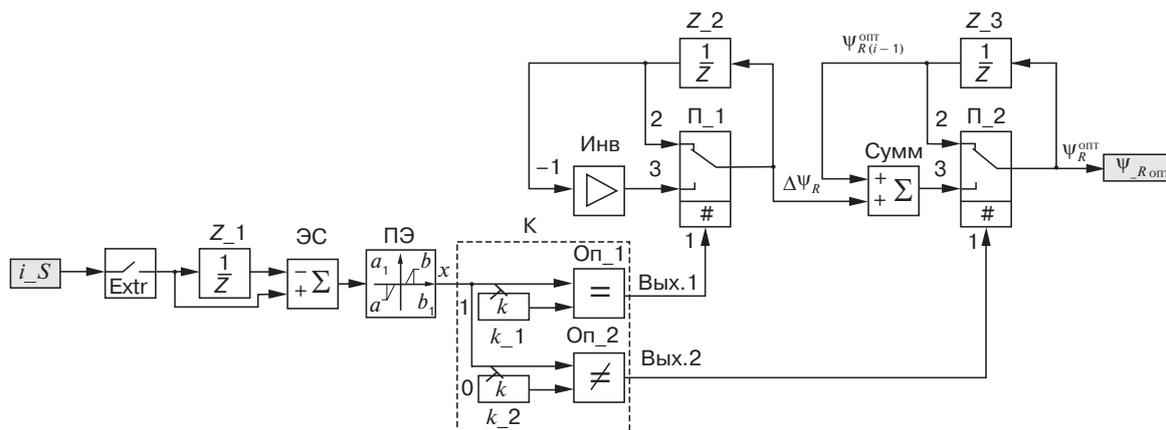


Рис. 2. Схема блока оптимального регулирования:

Extr — экстраполиатор нулевого порядка; Z₁–Z₃ — линии задержки; П₁, П₂ — переключатели; ЭС — элемент сравнения; ПЭ — пороговый элемент; Инв — инвертор; Сумм — сумматор; Оп₁, Оп₂ — операторы; К — коммутатор; k₁ и k₂ — константы (k₁=1, k₂=0)

Fig. 2. Optimal control unit diagram:

Extr — zero order extrapolator; Z₁–Z₃ — delay lines; П₁, П₂ — switches; ЭС — comparison item; ПЭ — threshold element; Инв — inverter; Сумм — adder; Оп₁, Оп₂ — operators; К — switchboard; k₁ and k₂ — constants (k₁=1, k₂=0)

Пороговый элемент ПЭ, имеющий три состояния выхода x, определяет режим продолжения или окончания поиска, а также направление поиска оптимального значения потокосцепления ψ_R^{opt} в соответствии со следующим алгоритмом:

$$x = \begin{cases} -1, & \text{если } \Delta i_s < -\delta; \\ 0, & \text{если } -\delta < \Delta i_s < \delta; \\ 1, & \text{если } \Delta i_s > \delta. \end{cases} \quad (8)$$

где δ — величина зоны нечувствительности при вычислении тока статора.

Сигнал на первом выходе (Вых. 1) оператора Оп₁, подключенного к входу переключателя П₁, задает направление поиска с помощью сигналов лог. 0 и лог. 1; сигналы лог. 0 и лог. 1 на втором выходе (Вых. 2) оператора Оп₂, подключенного к входу переключателя П₂, запускают или останавливают процедуру поиска оптимального значения потокосцепления ψ_R^{opt} . Значения параметров работы коммутатора К приведены в таблице.

При поступлении сигнала лог. 0 на первый вход переключателя П₁ происходит соединение его второго входа с выходом, обеспечивающее соединение входа и выхода линии задержки Z₂. В этом случае не происходит изменение знака сигнала приращения потокосцепления $\Delta\psi_R$ на выходе переключателя П₁. В случае появления сигнала лог. 1 на входе переключателя П₁ происходит соединение выхода с третьим входом, при котором выходной сигнал линии задержки Z₂ инвертируется с помощью инвертора Инв. При этом сигнал

Таблица истинности коммутатора

Switch truth table

Вход x	Вых. 1	Вых. 2
-1	0	1
0	0	0
1	1	1

$\Delta\psi_R$ на выходе переключателя П₁ меняет знак, и изменяется направление поиска оптимального значения потокосцепления ψ_R^{opt} .

При поступлении сигнала лог. 0 на первый вход переключателя П₂ происходит замыкание его контактами входа и выхода линии задержки Z₃, останавливая процесс поиска оптимального значения, при котором сигнал ψ_R^{opt} на выходе переключателя П₂ и, соответственно, БОР остается неизменным. В случае появления сигнала лог. 1 на первом входе переключателя П₂ выходной сигнал ψ_R^{opt} БОР получается в результате сложения сигналов в Сумм в соответствии с выражением

$$\psi_R^{opt} = \psi_{R(i-1)}^{opt} + \Delta\psi_R, \quad (9)$$

где $\psi_{R(i-1)}^{opt}$ — значение потокосцепления на предыдущем (i-1)-м шаге; $\Delta\psi_R$ — величина приращения потокосцепления, принимающая значения $\pm\Delta\psi_R$.

Таким образом, блок БОР обеспечивает оптимально низкие значения тока статора двигателя в соответствии с оптимальными значениями потокосцепления ротора.

Блоки преобразования координат ПК1 и ПК2. При построении векторной системы управления асинхронным двигателем (рис. 1) необходимо выполнить преобразование координат, т. е. произвести переход из трехфазной неподвижной системы координат abc во вращающуюся двухфазную систему dq с помощью преобразователя ПК2, а также осуществить обратный переход из системы dq в систему трехфазных координат abc с использованием преобразователя ПК1. Эти преобразования выполняются в два этапа. При прямом преобразовании координат $abc \rightarrow dq$ вначале производится переход из трехфазной неподвижной системы координат abc в неподвижную декартову систему $\alpha\beta$. Такое преобразование получило название прямого преобразования Кларк в честь женщины-электротехника Edit Klark [9]. В последующем с помощью прямого преобразования Парка [10] производится преобразование из неподвижной системы координат $\alpha\beta$ во вращающуюся систему dq . Это преобразование по существу является продолжением преобразования Кларк из неподвижной системы отсчета во вращающуюся. Обратное преобразование координат $dq \rightarrow abc$ производится с использованием обратных преобразований Кларк и Парка.

Преобразование, выполняемое преобразователем ПК2 — $abc \rightarrow dq$ (часто называемое преобразованием Парка), представляет собой пространственно-векторное преобразование трехфазных сигналов во временной области из стационарной системы координат abc во вращающуюся систему dq . Преобразование сигналов напряжения во временной области в естественной системе отсчета (u_a, u_b и u_c) выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-120^\circ) & -\sin(\theta+120^\circ) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где $\theta = \omega t + \delta$ — угол между вращающейся и неподвижной системами координат в текущий момент времени t , где δ — начальный сдвиг фаз между векторами напряжений \vec{u}_α (системы координат $\alpha\beta$) и \vec{u}_d (вращающейся системы dq).

Обратное преобразование из системы координат dq в неподвижную систему abc выполняется с помощью преобразователя ПК1 в соответствии с уравнениями

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \cos(\theta-120^\circ) & -\sin(\theta-120^\circ) \\ \cos(\theta+120^\circ) & -\sin(\theta+120^\circ) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix}. \quad (11)$$

После раскрытия определителя в (10) и проведения необходимых алгебраических преобразований с

учетом векторного равенства $\vec{u}_a = \frac{2}{3}\vec{u}_d - \frac{1}{3}\vec{u}_b - \frac{1}{3}\vec{u}_c$ си-

стема уравнений (10) для прямого векторного преобразования координат $abc \rightarrow dq$ принимает вид

$$\begin{cases} u_d = \frac{u_b - u_c}{\sqrt{3}} \sin\theta + u_a \cos\theta; \\ u_q = \frac{u_b - u_c}{\sqrt{3}} \cos\theta - u_a \sin\theta. \end{cases} \quad (12)$$

Выполнив аналогичные преобразования матричного уравнения (11), получим выражения для напряжений u_a, u_b и u_c неподвижной трехфазной системы преобразования координат $dq \rightarrow abc$:

$$\begin{cases} u_a = u_d \cos\theta - u_q \sin\theta; \\ u_b = \frac{\sqrt{3}}{2}(u_d \sin\theta + u_q \cos\theta) - \frac{1}{2}u_a; \\ u_c = -\frac{\sqrt{3}}{2}(u_d \sin\theta + u_q \cos\theta) - \frac{1}{2}u_a. \end{cases} \quad (13)$$

В соответствии с полученными выражениями (13) и (12) составлены структурные схемы блоков преобразователей ПК1 и ПК2, включенных в структурную схему управления асинхронным двигателем.

Имитационное моделирование. Для подтверждения работоспособности предложенной системы оптимального управления выполнено ее имитационное моделирование. На рис. 3 изображена структурная схема системы оптимального управления асинхронным двигателем, реализованная в среде моделирования SimInTech.

Структурная схема системы управления представлена четырьмя блоками: «Модель роторной цепи», «Система управления», «Модель двигателя» и «Оптимальный регулятор». В блоке «Модель двигателя» реализована математическая модель асинхронного двигателя [5] НВА-55 мощностью 55 кВт, используемого на электровозе в качестве мотор-вентилятора.

В блоке «Модель роторной цепи» производится преобразование фазных токов статора $i_{s(abc)}$ из неподвижной системы координат abc во вращающуюся систему с помощью преобразователя ПК2. Сигнал потокосцепления ротора ψ_R на выходе блока получается в результате интегрирования дифференциального уравнения [5]:

$$\frac{d\psi_R}{dt} = \frac{1}{T_R} (L_m i_{sd} - \psi_R), \quad (14)$$

где T_R — постоянная времени ротора.

Электромагнитный момент M_{em} формируется на выходе блока в соответствии с выражением (2).

Блок «Система управления» представляет собой двухконтурную схему регулирования по величине потокосцепления ψ_R и угловой скорости вращения вала

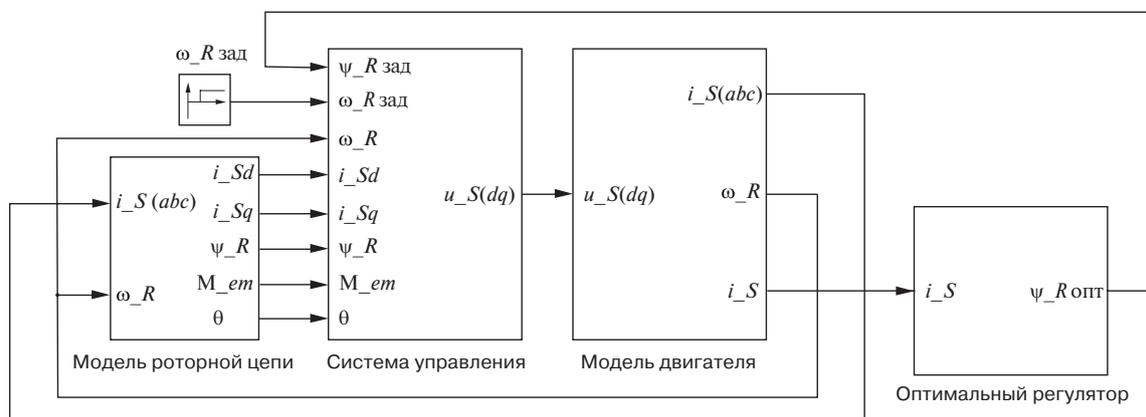


Рис. 3. Структурная схема системы оптимального управления асинхронным двигателем:

i_{Sd}, i_{Sq} — продольная и поперечная составляющие тока статора соответственно; M_{em} — электромагнитный момент; θ — угол между неподвижной и вращающейся системами координат; ψ_R — потокосцепление ротора; $\psi_{Rзад}$ — заданное значение потокосцепления ротора; ω_R — угловая скорость вращения ротора; $\omega_{Rзад}$ — заданное значение угловой скорости вращения ротора

Fig. 3. Structure diagram of the optimal control system of asynchronous drive:

i_{Sd}, i_{Sq} — longitudinal and transverse components of the stator current respectively; M_{em} — electromagnetic torque; θ — the angle between the static and rotating coordinate systems; ψ_R — rotor flux linkage; $\psi_{Rзад}$ — rotor flux linkage setpoint; ω_R — rotor angular speed; $\omega_{Rзад}$ — rotor angular speed setpoint

ротора ω_R [11]. В контурах формируются заданные значения проекций токов статора i_{Sd}^* и i_{Sq}^* (см. рис. 1) на соответствующие оси d и q . Каждый из контуров регулирования представляет собой классический регулятор по рассогласованию (ошибке) [12]. На вход этих каналов регулирования поступают сигналы заданных значений скорости вращения и потокосцепления ротора. Соответствующие регуляторы тока РТ1 и РТ2 формируют управляющее воздействие, сводящее к нулю сигналы на выходе элементов сравнения ЭС2 и ЭС3.

Блок «Оптимальный регулятор» выполнен в соответствии со схемой блока оптимального регулирования (рис. 2). На его вход поступает сигнал тока статора i_S , по величине которого формируется сигнал оптимального значения потокосцепления ротора $\psi_R^{опт}$.

Система оптимального регулирования потокосцепления выполняет выбор наиболее соответствующей заданным условиям величины тока статора i_S методом шагового поиска, т. е. путем ступенчатого изменения значения потокосцепления ψ_R (рис. 4). При этом характер формы тока i_S после достижения его оптимального значения выгодно отличается от рассмотренного ранее устройства экстремального регулятора [13]. В форме тока i_S в установившемся режиме работы ($t > 15$ с) отсутствуют характерные пульсации, вызванные работой экстремального регулятора, которые усложняют работу системы управления. В результате моделирования получено минимальное (оптимальное) значение тока статора $i_S = 91,2$ А при оптимальном значении потокосцепления $\psi_R^{опт} = 1,88$ Вб. При этом оптимальное значение потокосцепления совпадает со значением, рассчитанным в

соответствии с выражением (3) при величине электромагнитного момента $M_{em} = 355$ Н·м [14].

Обсуждение. Установлено, что повышение энергетических показателей векторного управления асинхронным двигателем может быть достигнуто за счет выбора оптимального значения потокосцепления в зависимости от режима работы двигателя. Практическое применение предлагаемого решения авторы видят в использовании разработанного устройства оптимального регулирования в преобразователе для питания вспомогательных машин электровоза переменного тока. Система управления может быть реализована в виде трехфазного автономного инвертора напряжения, выполненного на базе IGBT-транзисторов,

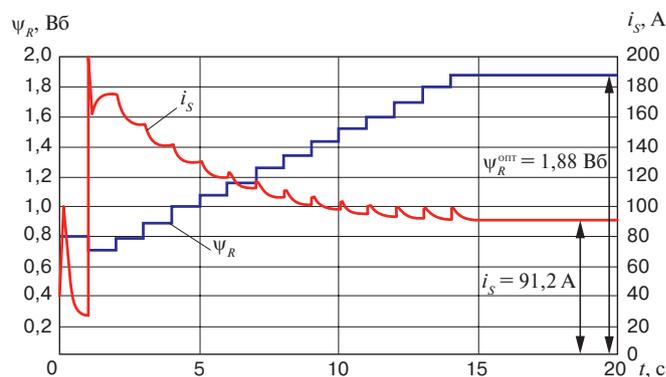


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования системы оптимального регулирования потокосцепления ψ_R

Fig. 4. Simulation results of the optimal control system of flux linkage ψ_R

управляемых микропроцессорной системой на основе микроконтроллера C167 INFINEON.

Заключение. Разработанная система оптимального управления позволяет повысить энергетическую эффективность вспомогательного привода электроваза за счет использования оптимального регулятора. Предлагаемая структура управления предназначена для уменьшения потребляемого двигателем тока во всех режимах его работы. В результате имитационного моделирования установлено, что использование описанной системы оптимального управления позволяет уменьшить ток статора с 120 до 91,2 А.

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

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

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

- Самосейко В. Ф., Гуськов В. О. Оптимальное управление асинхронным двигателем по критерию потерь энергии // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2020. Т. 12, № 4. С. 775–788 [Samoseiko V. F., Guskov V. O. Optimal control of an asynchronous motor according to the criterion of energy losses. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 2020; 12(4):775-788. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2020-12-4-775-788>.
- Патент № 2402147 Российская Федерация, МПК H02P 21/08, H02P 27/04. Способ оптимального векторного управления асинхронным двигателем: № 2009133125/07: заявл. 04.09.2009; опубл. 20.10.2010 / Изосимов Д. Б., Макаров Л. Н. 16 с. [Izosimov D. B., Makarov L. N. *Patent No. 2402147 Russian Federation, MПК H02P 21/08, H02P 27/04. Method of optimum vector control of asynchronous motor: No. 2009133125/07: appl. 04.09.2009: publ. 20.10.2010*. 16 p. (In Russ.)].
- Патент № 2132110 Российская Федерация, МКП H02P 21/00. Способ оптимального векторного управления асинхронным электродвигателем и электропривод для осуществления этого способа (варианты): № 98105552/09: заявл. 25.03.1998; опубл. 20.06.1999 / Мищенко В. А., Мищенко Н. И., Мищенко А. В. 35 с. [Mishchenko V. A., Mishchenko N. I., Mishchenko A. V. *Patent No. 2132110 Russian Federation, MПК H02P 21/00. Method for optimal vector control of induction electric motor and electric drive which implements said method: No. 98105552/09: appl. 25.03.1998: publ. 20.06.1999*. 35 p. (In Russ.)].
- Усольцев А. А. Частотное управление асинхронными двигателями: учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 94 с. [Usol'tsev A. A. *Chastotnoe upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami: ucheb. posobie* [Frequency

control of asynchronous motors: Textbook]. St. Petersburg: SPbGU ИТМО; 2006. 94 p. (In Russ.)].

5. Моделирование векторного управления асинхронным приводом вспомогательных машин электроподвижного состава / Ю. М. Кулинич [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 23–30 [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>.

6. Калачев Ю. Н. SimInTech: моделирование в электроприводе. М.: ДМК Пресс, 2019. 98 с. [Kalachev Yu. N. *SimInTech: modelirovanie v elektroprivoде* [SimInTech: simulation in the electric drive]. Moscow: DMK Press; 2019. 98 p. (In Russ.)].

7. Романова В. В., Хромов С. В., Сулов К. В. Анализ воздействующих факторов, влияющих на эксплуатационную надежность низковольтных асинхронных электродвигателей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 3. С. 80–89 [Romanova V. V., Khromov S. V., Suslov K. V. Analysis of influencing factors affecting the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(3):80-89. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-80-89>.

8. Герман-Галкин С. Г., Карташов Б. А., Литвинов С. Н. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech. М.: ДМК Пресс, 2021. 494 с. [German-Galkin S. G., Kartashov B. A., Litvinov S. N. *Model'noe proektirovanie elektromekhanicheskikh mekhatronnykh modulei dvizheniya v srede SimInTech* [Model design of electromechanical mechanisms of mechatronic motion in the SimInTech environment]. Moscow: DMK Press; 2021. 494 p. (In Russ.)].

9. Bellan D. Clarke Transformation Solution of Asymmetrical Transients in Three-Phase Circuits. *Energies*. 2020;13(19):5231. <https://doi.org/10.3390/en13195231>.

10. 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. <http://doi.org/10.11591/ijpeds.v5.i3.pp366-373>.

11. Терехин В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0/1): учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2008. 320 с. [Terekhin V. B. *Modelirovanie sistem elektroprivoda v Simulink (Matlab 7.0.1): ucheb. posobie* [Modeling of electric drive systems in Simulink (Matlab 7.0.1): Tutorial]. Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University; 2008. 320 p. (In Russ.)].

12. Автоматизация электроподвижного состава: учеб. для вузов по спец. ж.-д. транспорта / под ред. А. Н. Савоськина. М.: Транспорт, 1990. 312 с. [Savos'kin A. N. (ed.). *Avtomatizatsiya elektropodvizhnogo sostava: ucheb. dlya vuzov po spets. zh.-d. transporta* [Electric rolling stock automation: Textbook for railway universities]. Moscow: Transport; 1990. 312 p. (In Russ.)].

13. Кулинич Ю. М., Шухарев С. А., Гуляев А. В. Повышение энергетической эффективности вспомогательных машин электроваза переменного тока // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80, № 5. С. 276–284 [Kulinich Yu. M., Shukharev S. A., Gulyaev A. V. Increasing the energy efficiency of auxiliary machines of AC electric locomotive. *Russian Railway Science Journal*. 2021;80(5):276-284. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-276-284>.

14. Электроваз 2ЭС5К (3ЭС5К) магистральный. Руководство по эксплуатации. Книга 3. Новочеркасск, 2004. 31 с. [Elektrovaz 2ES5K (3ES5K) magistral'nyy. *Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kniga 3*. [Electric locomotive 2ES5K (3ES5K) mainline. Manual. Book 3]. Novocherkassk; 2004. 31 p. (In Russ.)].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юрий Михайлович КУЛИНИЧ,

д-р техн. наук, профессор, кафедра «Транспорт железных дорог», Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47), Author ID: 360696, <https://orcid.org/0000-0002-7725-8152>

Сергей Анатольевич ШУХАРЕВ,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Транспорт железных дорог», Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47), Author ID: 889967, <https://orcid.org/0000-0001-7856-6651>

Вячеслав Константинович ДУХОВНИКОВ,

канд. техн. наук, директор Приморского института железнодорожного транспорта — филиала Дальневосточного государственного университета путей сообщения в г. Уссурийске (ПримИЖТ, 692522, Приморский край, г. Уссурийск, ул. Пушкина, д. 166), Author ID: 616256, <https://orcid.org/0000-0001-7412-3298>

Дмитрий Алексеевич СТАРОДУБЦЕВ

инженер, кафедра «Транспорт железных дорог», Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47), <https://orcid.org/0000-0001-8850-7954>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuriy M. KULINICH,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Railway Transport Department, Far Eastern State Transport University (680021, Khabarovsk, 47, Serysheva St.), Author ID: 360696, <https://orcid.org/0000-0002-7725-8152>

Sergey A. SHUKHAREV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Railway Transport Department, Far Eastern State Transport University (680021, Khabarovsk, 47, Serysheva St.), Author ID: 889967, <https://orcid.org/0000-0001-7856-6651>

Vyacheslav K. DUHOVNIKOV,

Cand. Sci. (Eng.), Director of the Primorsky Institute of Railway Transport, the Ussuriysk Branch of the Far Eastern State Transport University (692522, Primorskiy Krai, Ussuriysk, 166, Pushkina St.), Author ID: 616256, <https://orcid.org/0000-0001-7412-3298>

Dmitriy A. STARODUBTSEV,

Engineer, Railway Transport Department, Far Eastern State Transport University (680021, Khabarovsk, 47, Serysheva St.), <https://orcid.org/0000-0001-8850-7954>

ВКЛАД АВТОРОВ

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

Сергей Анатольевич ШУХАРЕВ. Имитационное моделирование (30%).

Вячеслав Константинович ДУХОВНИКОВ. Раздел преобразования координат векторной системы управления (10%).

Дмитрий Алексеевич СТАРОДУБЦЕВ. Вывод уравнений асинхронного двигателя во вращающейся системе координат и разработка структуры оптимального регулятора (30%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Yuriy M. KULINICH. Substantiation of the research area, setting up goals and objectives, analysis of results (30%).

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

Vyacheslav K. DUHOVNIKOV. Section of coordinate transformations of the vector control system (10%).

Dmitriy A. STARODUBTSEV. Derivation of the equations of an asynchronous drive in a rotating coordinate system and design of an optimal controller (30%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 28.11.2022, рецензия от первого рецензента получена 01.12.2022, рецензия от второго рецензента получена 05.12.2022, принята к публикации 14.12.2022.

The article was submitted 28.11.2022, first review received 01.12.2022, second review received 05.12.2022, accepted for publication 14.12.2022.

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, допускается 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.