

Система экстремального управления вспомогательным приводом электровозов

С. А. Шухарев✉, А. В. Гуляев

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Российская Федерация

✉ shuharevsa@gmail.com

Резюме

Одним из путей повышения энергетической эффективности асинхронного двигателя является применение системы экстремального управления. Повышение энергетической эффективности достигается за счет уменьшения потребляемого тока двигателем до экстремально низких значений изменением величины потокосцепления ротора. Целью работы является повышение энергоэффективности системы векторного управления асинхронного двигателя за счет оптимизации задания потокосцепления ротора. Оптимальное значение потокосцепления определяется в соответствии с критерием минимального потребляемого тока статора в зависимости от заданного значения электромагнитного момента на валу двигателя. Недостатком классической системы экстремального регулирования является низкое быстродействие за счет большого значения времени поиска точки экстремума. Таким образом, классические поисковые системы применимы в установившихся режимах работы. В случае отклонения параметров двигателя или изменения режима его работы, необходимо осуществлять новый поиск экстремума при каждом изменении, что невозможно из-за низкого быстродействия. В этой связи применение классических экстремальных регуляторов ограничено. Для устранения этого недостатка предлагается использовать систему экстремального управления с изменяющимся шагом в процессе работы регулятора. При этом система управления обеспечивает повышение энергетических показателей асинхронного двигателя как в номинальном, так и в отличных от номинального режимах работы. Предложенный алгоритм регулирования целесообразно применять в приводе вспомогательных машин электровоза. В работе использовался типовой асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 4А225 М4 У2, установленный в приводе мотор-вентилятора ВЛ85. Предлагаемая система экстремального управления позволяет уменьшить электрические потери в двигателе во всех режимах его работы. Для рассмотренного двигателя 4А225 М4 У2 величину тока статора удалось сократить на 15 %, а время поиска на 40 % по сравнению с классическим методом экстремального регулирования с постоянным шагом поиска.

Ключевые слова

асинхронный двигатель, имитационное моделирование, векторное управление, вращающаяся система координат, экстремальное управление, MatLab / Simulink

Для цитирования

Шухарев С. А. Система экстремального управления вспомогательным приводом электровозов / С. А. Шухарев, А. В. Гуляев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 68–77. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).68-77

Информация о статье

поступила в редакцию: 12.09.2021, поступила после рецензирования: 21.09.2021, принята к публикации: 07.10.2021

Extreme control system of auxiliary drive of electric locomotives

S. A. Shukharev✉, A. V. Gulyaev

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, the Russian Federation

✉ shuharevsa@gmail.com

Abstract

One of the ways to increase the energy efficiency of an induction motor is the use of an extreme control system. The increase in energy efficiency is achieved by reducing the power consumed by the motor to extremely low values by changing the value of the rotor flux linkage. The purpose of the work is to increase the energy efficiency of the vector control system of an induction motor by optimizing the setting of the rotor flux linkage. The flux linkage optimum value is determined in accordance with the criterion of the minimum consumed stator current depending on the set value of the electromagnetic torque on the motor shaft. The disadvantage of classical systems of extreme regulation is low performance due to the large value of the search time for the extremum point. Thus, classical search engines are applicable in established operating modes. In the event of a deviation in the parameters of the engine or a change in its operating mode, it is necessary to carry out a new search for an extremum with each change, which is impossible due to low speed of performance. In this regard, the use of classical extremal controllers is limited. To eliminate this drawback, it is proposed to use an extreme control system with a variable step during the operation of the regulator. Herewith, the control system provides an increase in the energy performance of the asynchronous motor both in the nomi-

nal and non-nominal operating modes. It is advisable to use the proposed regulation algorithm in the drive of auxiliary machines of an electric locomotive. A typical asynchronous motor with a squirrel-cage rotor of the 4A225 M4 U2 type, installed in the VL85 motor-fan drive, was used in the work. The proposed extreme control system allows to reduce power losses in the engine in all modes of its operation. For the motor 4A225 M4 U2 considered in the work, the stator current was reduced by 15 %, and the search time by 40% in comparison with the classical method of extreme regulation with a constant search step.

Keywords

asynchronous motor, simulation, vector control, rotating coordinate system, extreme control, MatLab / Simulink

For citation

Shukharev S. A., Gulyaev A. V. Sistema ekstremal'nogo upravleniya vspomogatel'nym privodom ehlektrovozov [Extreme control system of auxiliary drive of electric locomotives]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 68–77. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).68-77

Article Info

Received: 12.09.2021, Revised: 21.09.2021, Accepted: 07.10.2021

Введение

Эксплуатация электровозов переменного тока, имеющих систему вспомогательных машин на основе асинхронных двигателей трехфазного переменного тока, сопровождается невысокой энергетической эффективностью, выраженной в низком коэффициенте мощности, достаточно высоким коэффициентом искажения синусоидальности питающего напряжения на первичной обмотке тягового трансформатора электровоза, а также высоким коэффициентом несимметрии трехфазного питающего напряжения асинхронных двигателей вспомогательных машин. Известны различные пути повышения эффективности работы асинхронных двигателей вспомогательных машин в виде снижения коэффициента искажения в обмотке собственных нужд и коэффициента несимметрии в трехфазной системе питания асинхронных двигателей. Коэффициенты искажения синусоидальности и несимметрии влияют на повышение энергетической эффективности, но это не решает в полной мере задачу повышения энергетической эффективности асинхронного двигателя. Одним из путей повышения энергетической эффективности является применение экстремального регулятора для управления асинхронным двигателем. Повышение энергетической эффективности достигается за счет уменьшения потребляемого тока двигателем до экстремально низких значений и изменением величины потокосцепления ротора.

Целью работы является повышение энергоэффективности системы векторного управления асинхронного двигателя за счет оптимизации задания потокосцепления ротора ψ_R . Оптимальное значение потокосцепления определяется по критерию минимального потребляемого

тока статора i_S в зависимости от заданного значения электромагнитного момента M_{em} на валу двигателя.

Недостатком всех поисковых систем управления является их низкое быстродействие за счет большого значения времени регулирования, т. е. поиска точки экстремума. Таким образом, классические поисковые системы применимы в установившихся режимах работы. При этом в динамических режимах работы в результате отклонения параметров двигателя или изменения режима его работы, необходимо осуществлять новый поиск экстремума при каждом изменении, что невозможно из-за низкого быстродействия. В этой связи применение классических экстремальных регуляторов ограничено. Для устранения этого недостатка предлагается использовать систему экстремального управления с изменяющимся шагом в процессе работы регулятора. При этом система управления обеспечивает повышение энергетических показателей асинхронного двигателя как в номинальном, так и в отличных от номинального режимах работы. Предложенный алгоритм регулирования целесообразно применять в приводе вспомогательных машин электровоза.

Уравнения асинхронного двигателя во вращающейся системе координат

Современные системы управления асинхронными двигателями построены на представлении электромагнитных процессов в векторной форме, что является практически стандартом управления [1]. Такой принцип управления позволяет эффективно управлять двигателем как в стационарных, так и в переходных режимах работы, обеспечивая наилучшие показатели качества управления по сравнению со

скалярным управлением. Система уравнений (1) является математической основой для создания электрической составляющей имитационной модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором [2]:

$$\begin{aligned} u_{sd} &= R_{equ} (pT_{equ} + 1) i_{sd} - L_{equ} \omega_1 i_{sq} - R_2' \frac{L_m}{L_2^2} \Psi_R; \\ u_{sq} &= R_{equ} (pT_{equ} + 1) i_{sq} + L_{equ} \omega_1 i_{sd} - K_2 \Psi_R \Omega z_p; \\ \Psi_R &= \frac{L_m}{T_2 p + 1} i_{sd}; \\ M_{em} &= \frac{3}{2} z_p K_2 \Psi_R i_{sq}. \end{aligned} \quad (1)$$

В уравнениях обозначено:

– эквивалентное сопротивление –

$$R_{экв} = R_S + K_2^2 R_R';$$

– коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора –

$$K_1 = L_m / L_S; \quad K_2 = L_m / L_R';$$

– эквивалентная индуктивность –

$$L_{экв} = L_S (1 - K_1 \cdot K_2);$$

– эквивалентная постоянная времени –

$$T_{экв} = L_{экв} / R_{экв}.$$

Частота вращения ротора ω в модели двигателя может быть выражена через величину механической угловой скорости вращения ротора Ω : $\omega = z_p \Omega$, где z_p – число пар полюсов двигателя.

Уравнение электромеханического равновесия в модели двигателя представляется в виде:

$$M_{em} - M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

где M_c – момент сопротивления на валу двигателя; J – момент инерции, приведенный к валу двигателя [3].

Для реализации векторного управления математическое описание модели двигателя (1) дополним двумя управляющими контурами: по потокоцеплению ротора Ψ_R и скорости вращения двигателя ω_R с внутренними подчиненными контурами регулирования по току. Структурная схема асинхронного двигателя с векторным управлением показана на рис. 1, в левой ее части представлены указанные контуры регулирования.

Схема векторного управления двигателем состоит из двух контуров регулирования магнитного потока и угловой скорости, каждый из которых представляет собой классическую схему регулирования по отклонению или по ошибке. Ток в контурах создается с помощью инвертора напряжения, представленного идеальным апериодическим звеном первого порядка Inverter. Необходимые для моделирования значения потока ротора (Ψ_{r_ref}) и скорости (ω_{r_ref}) задаются с помощью задатчиков (Ψ_{r_ref}) и (ω_{r_ref}). Сравнение заданного и

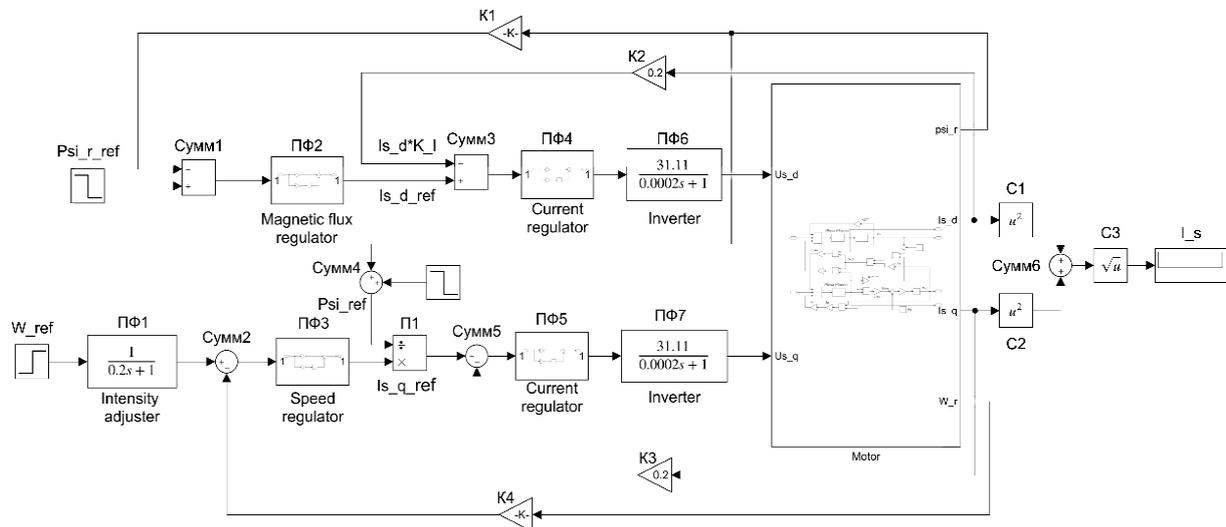


Рис. 1. Структурная схема двигателя с векторным управлением в пакете Matlab / Simulink: Сумм1–Сумм6 – сумматоры; К1–К4 – усилители; П1 – множитель; ПФ1–ПФ7 – блоки передаточной функции; С1–С3 – блоки возведения в степень; Motor – модель двигателя

Fig. 1. Structural scheme of the vector controlled engine in the Matlab/Simulink package: Сумм1–Сумм6 – adders, К1–К4 – amplifiers, П1 – multiplier, ПФ1–ПФ7 – transfer function block, С1–С3 – exponentiation blocks, Motor – engine model

фактического значений потокосцепления и скорости осуществляется сумматорами Сумм1 и Сумм2. Регулирование величины потокосцепления и скорости осуществляется регуляторами потока (Magnetic flux regulator) и скорости (Speed regulator), а также регуляторами тока (Current regulator), представляющими собой пропорционально-интегрирующие (ПИ) регуляторы. Момент на валу двигателя создается за счет изменения момента сопротивления блоком константы M_c в модели двигателя Motor. Действующее значение тока статора i_s определяется проекциями тока на оси d - q и рассчитывается в соответствии с выражением:

$$i_s = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2}.$$

Узел для расчета тока i_s представлен в правой части схемы и состоит из двух блоков возведения в степень С1, С2 и блока вычисления квадратного корня С3.

Классический закон векторного управления асинхронным двигателем предполагает поддержание постоянной величины потокосцепления. Однако в процессе регулирования возможно изменение величины ψ_R с периодом времени T , значительно превышающим постоянную времени $\tau = (L_{\sigma S} + L_m)/R_S$ статорной цепи двигателя. В этом случае потокосцепление можно считать условно постоянным [4]. С этих позиций будем проектировать работу системы экстремального управления двигателем [5].

Классическая система экстремального управления

Система экстремального регулирования (управления) СЭР [6] предназначена для нахож-

дения максимума или минимума показателя качества объекта и поддержания этого показателя на экстремальном уровне. В работе показателем качества выбран ток статора I_S асинхронного двигателя вспомогательного привода электроваза. В качестве управляющего воздействия на систему управления асинхронным двигателем выступает потокосцепление ротора ψ_R . Пример работы классической системы экстремального регулирования приведен на рис. 2.

В левой части рис. 2 приведена кривая функции качества $I_S = f(\psi_R)$, минимум значения которой находится в точке А. В правой части приведена ступенчатая кривая, показывающая процесс поиска минимального значения тока статора I_S , обозначенная цифрами 0–11. Процесс поиска минимального значения тока статора начинается в момент времени $t = 0$ со значением тока $I_{S(0)}$. На первом шаге поиска экстремальная система управления формирует некоторый уровень потокосцепления ротора, отличающегося от предыдущего значения на величину шага $\Delta\psi_{R(1)}$. Этому значению соответствует новая величина тока статора $I_{S(1)}$. Проверка правильности выбранного направления поиска осуществляется путем сравнения разницы между предыдущим $I_{S(0)}$ и текущим $I_{S(1)}$ значениями токов $\Delta I_{S(1)} = I_{S(0)} - I_{S(1)}$. Так как полученная разница $\Delta I_{S(1)}$ больше ширины зоны нечувствительности δ , то направление поиска выбрано верно, и следующий шаг поиска будет выполняться с тем же значением $\Delta\psi_{R(1)} = \Delta\psi_{R(2)}$. До шестого шага (точка Б) процесс поиска продолжается по приведенному алгоритму.

На шестом шаге поиска разница токов статора $\Delta I_{S(6)}$ между предыдущим $I_{S(5)}$ и текущим

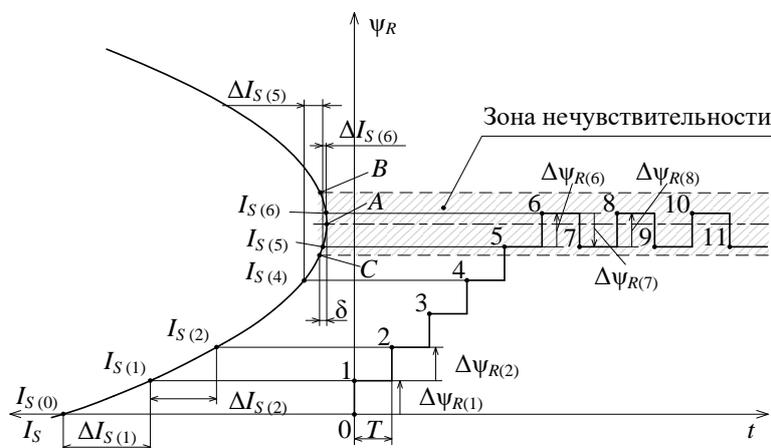


Рис. 2. Поиск минимального значения тока статора I_S системой экстремального управления
Fig. 2. Search for minimal stator current value I_S by the extreme control system

$I_{S(6)}$ значениями становится меньше ширины зоны нечувствительности δ . Это означает, что следующий седьмой шаг поиска необходимо выполнить в противоположном направлении по сравнению с шестым шагом, с величиной $\Delta\psi_{R(7)} = -\Delta\psi_{R(6)}$. Начиная с точки 7, осуществляется циклический поиск минимального значения тока статора первого рода [6].

На рис. 3 приведена структурная схема системы экстремального управления.

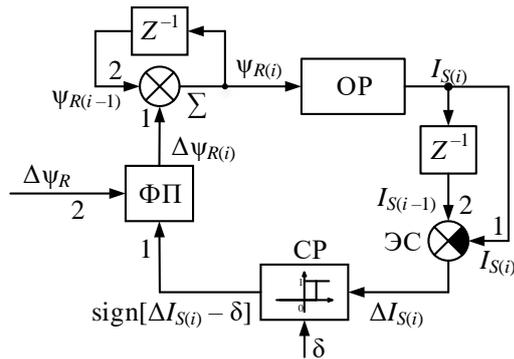


Рис. 3. Структурная схема системы экстремального управления
Fig. 3. Structural scheme of the extreme control system

Структурная схема системы экстремального управления состоит из двух блоков временных задержек Z^{-1} , элемента сравнения (ЭС), сигнум-реле (СР), блока формирования приращения потокосцепления ротора (ФП) и сумматора Σ . Текущее значение показателя качества $I_{S(i)}$ с выхода объекта регулирования поступает на вход блока задержки и на первый вход элемента сравнения. Элемент сравнения вычисляет разницу между предыдущим $I_{S(i-1)}$ и текущим $I_{S(i)}$. Полученная разница $\Delta I_{S(i)}$ поступает на вход блока СР и сравнивается с величиной зоны нечувствительности δ . Выходной сигнал с СР поступает на первый вход блока ФП. В соответствии с заданным значением шага $\Delta\psi_R$ на выходе блока формируется сигнал текущего шага $\Delta\psi_{R(i)}$. С помощью блока сумматора Σ и второго блока временной задержки Z^{-1} определяется текущее значение потокосцепления ротора $\psi_{R(i)}$. Текущее значение формируется на выходе сумматора в результате сложения величины шага $\Delta\psi_{R(i)}$ и предыдущего $\Delta\psi_{R(i-1)}$, поступающего с выхода элемента задержки Z^{-1} .

Основным недостатком классической СЭР является длительность процесса нахождения

экстремума, которая определяется заданной постоянной величиной поискового шага $\Delta\psi_R = const$. Для устранения этого недостатка предложен способ определения $\Delta\psi_R$ в процессе работы СЭР [7].

Система экстремального управления с изменяющимся шагом

По результатам имитационного моделирования работы асинхронного двигателя типа 4А225 М4 У2 [8], установленного в приводе мотор-вентилятора ВЛ85, получены кривые $I_S = f(\psi_R)$ (рис. 4).

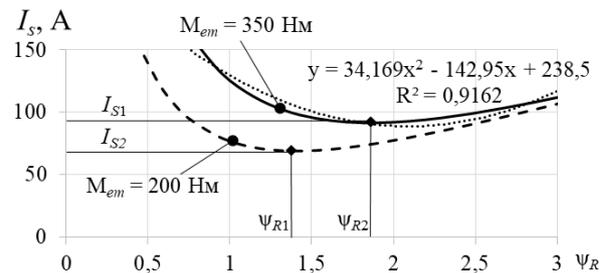


Рис. 4. Зависимость тока статора от величины потокосцепления ротора
Fig. 4. Dependence of the stator current on the rotor flux linkage value

На рисунке представлены кривые, соответствующие двум моментам сопротивления 350 и 200 Нм. Из анализа рисунка следует, что каждой кривой $I_S = f(\psi_R)$ соответствует свое минимальное значение тока статора (I_{S1} и I_{S2}) при отличающихся друг от друга величинах потокосцепления (ψ_{R1} и ψ_{R2}). Таким образом, при различном моменте сопротивления необходимо задавать оптимальное значение потокосцепления ротора ψ_{R1} или ψ_{R2} для достижения минимума потребляемого тока.

Произведем анализ кривой $I_S = f(\psi_R)$ при $M_{em} = 350$ Нм, выполнив ее аппроксимацию полиномом второй степени:

$$I_S = a\psi_R^2 + a\psi_R + c, \quad (2)$$

где a – старший коэффициент полинома; b – второй коэффициент полинома; c – свободный член.

В результате аппроксимации кривой $I_S = f(\psi_R)$ на рис. 4 получено значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,916$, что свидетельствует о достаточности использования полинома второй степени. В соответствии с [9–11] значение поискового шага определяется как

$$\psi = \sqrt{\frac{\delta}{|a|}}. \quad (3)$$

Значение коэффициента a может быть получено путем дифференцирования функции качества $I_S = f(\psi_R)$ при некотором значении потокосцепления ротора. Для определения неизвестного значения старшего коэффициента a произведем дифференцирование полинома (2):

$$I'_S = 2a\psi_R + b.$$

В полученном выражении, кроме искомого значения старшего коэффициента a полинома, необходимо также определить неизвестный коэффициент b . Принимаем, что для одной и той же функций $I_S = f(\psi_R)$ значения коэффициентов a и b остаются постоянными. В этом случае вычислим производные тока статора I'_{S_1} и I'_{S_2} в соседних точках кривой $I_S = f(\psi_R)$ при двух значениях потокосцепления ротора ψ_{R1} и ψ_{R2} взятых с шагом $\Delta\psi_R$:

$$I'_{S_1} = 2a\psi_{R_1} + b; I'_{S_2} = 2a\psi_{R_2} + b. \quad (4)$$

Выразим старшие коэффициенты a из (4):

$$a = \frac{b - I'_{S_1}}{2\psi_{R_1}}; a = \frac{b - I'_{S_2}}{2\psi_{R_2}}. \quad (5)$$

Приравняв между собой эти коэффициенты и выполняя нужные преобразования, получим:

$$a = \frac{b - I'_{S_1}}{2\psi_{R_1}} = a = \frac{b - I'_{S_2}}{2\psi_{R_2}} \Rightarrow b(\psi_{R_2} - \psi_{R_1}) \Rightarrow I'_{S_1}\psi_{R_2} - I'_{S_2}\psi_{R_1}.$$

Заменяя разность потокосцеплений ротора $\psi_{R2} - \psi_{R1}$ величиной $\Delta\psi_R$, получаем конечную формулу для расчета коэффициента b :

$$b = \frac{I'_{S_1}\psi_{R_2} - I'_{S_2}\psi_{R_1}}{\Delta\psi_R}. \quad (6)$$

В результате совместного решения уравнений (5) и (6), получаем искомое значение коэффициента a , которое определяется из выражения:

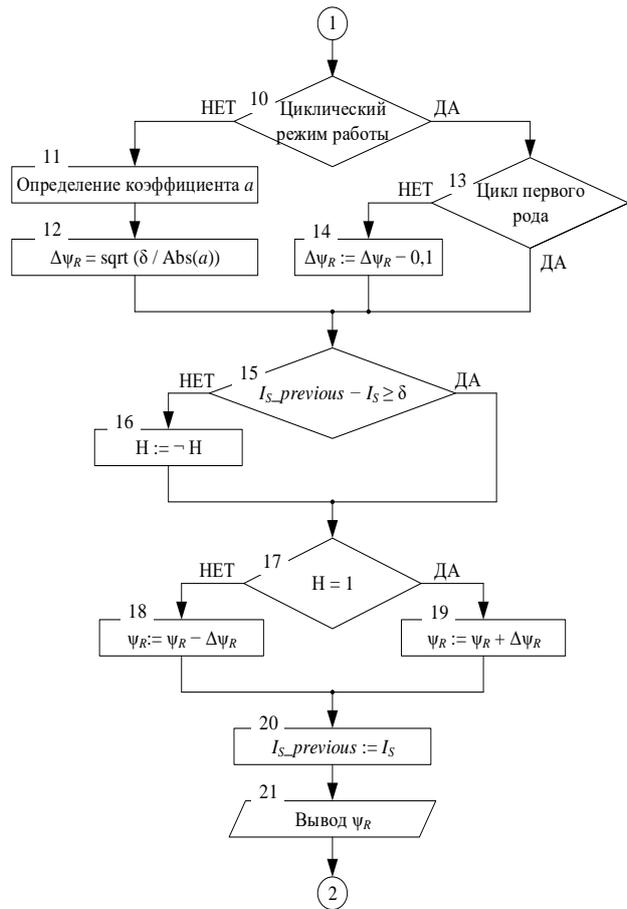
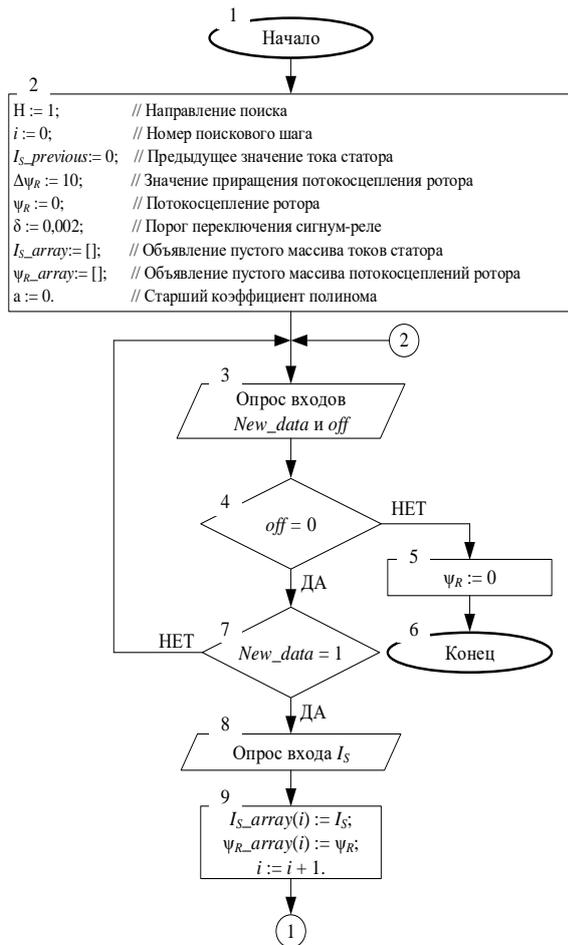


Рис. 5. Алгоритм работы системы экстремального управления
 Fig. 5. Algorithm of the extreme control system operation

$$a = \frac{I'_{S_1} \psi_{R_2} - \psi_{R_1} - I'_{S_2}}{2\psi_{R_2}}. \quad (7)$$

Таким образом, для определения старшего коэффициента a в полиноме (2) необходимы значения двух производных тока статора I'_{S_1} и I'_{S_2} , взятых с шагом $\Delta\psi_R$. Значения этих коэффициентов могут быть получены методом численного дифференцирования на основании нескольких значений функции $I_S = f(\psi_R)$. Для получения производной тока статора можно воспользоваться методом численного дифференцирования с помощью интерполяционной формулы Стирлинга [12].

Рассмотрим алгоритм работы СЭР с изменяемой в процессе поиска величиной шага $\Delta\psi_R$ (рис. 5).

Согласно алгоритму поиск минимального значения тока статора начинается с блока 2, в

котором осуществляется задание начальных значений используемых переменных. В блоке 3 выполняется проверка состояния входов *off* и *New_data*. Если на вход *off* подана лог. 1, то СЭР заканчивает свою работу. Если на вход *New_data* поступает лог. 1, то осуществляется опрос текущего i -го значения тока статора I_S и его запись в массив $I_S_array(i)$ в блоках 8 и 9. На основании значений из массива $\psi_R_array(i)$ в блоке 10 определяется цикличность работы СЭР. Если СЭР работает в режиме поиска, то в блоках 11 и 12 определяется старший коэффициент a (выражение 7) и новый шаг $\Delta\psi_R$ по формуле (3). Если СЭР не работает в цикле первого рода, то в блоке 14 рассчитанная величина шага $\Delta\psi_R$ уменьшается на 0,1. В блоке 15 производится сравнение разницы предыдущего I_S *previous* и текущего I_S значений тока статора с величиной зоны нечувствительности δ СР. Если это неравенство не соблюдается, то теку-

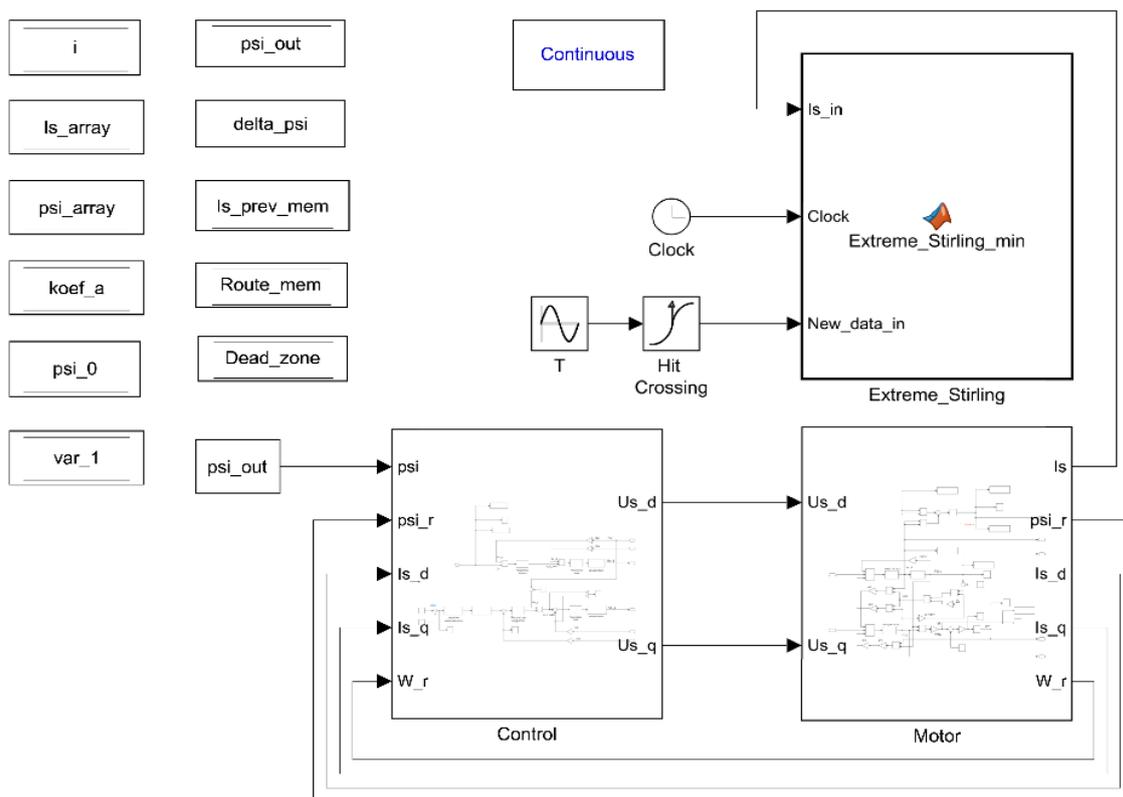


Рис. 6. Структурная схема двигателя с экстремальным управлением в пакете Matlab / Simulink: Motor – модель двигателя; Control – модель системы управления; Extreme_Stirling – программный блок экстремального регулятора; Hit Crossing – блок выявления нулевых значений; T – функциональный генератор; Clock – часы текущего времени

Fig. 6. Structural scheme of the engine with the extreme control in the Matlab/Simulink package: Motor – engine model; Control – control system model; Extreme Stirling – program block of the extreme regulator; Hit Crossing – zero values detection block; T – functional generator; Clock – current time clock

щее направление поиска меняется на противоположное. В случае если это неравенство верно, то направление поиска остается неизменным. В соответствии с текущим направлением поиска блоками 18 или 19 рассчитывается новая величина потокосцепления ротора, поступающая на вход векторной системы управления асинхронным двигателем.

Имитационное моделирование

В соответствии с алгоритмом экстремального регулирования разработана имитационная модель системы экстремального управления асинхронным приводом в среде Matlab / Simulink [13–15] (рис. 6).

Схема состоит из программного блока *Extreme_Stirling*, одиннадцати блоков памяти, имитационной модели двигателя *Motor*, системы его управления *Control* с каналами управления по скорости W_r и потокосцеплению ψ_r . Шаг работы экстремального регулятора задается функциональным генератором T и блоком *Hit Crossing*.

На входы блока *Extreme_Stirling* поступают значения трех управляющих сигналов: контролируемого значения тока статора I_s , полученного на выходе блока модели двигателя *Motor*, текущего значения времени моделирования *Clock* и сигнала *New_data_in*, контролирующего поступление обновленного значения тока статора. Блоки памяти предназначены для хранения: номера текущего шага поиска i , нескольких предыдущих значений тока статора

I_s_array и потокосцепления ψ_array , ψ_0 ротора, коэффициента a полинома второй степени $koef_a$, вспомогательных переменных в массиве var_1 , предыдущего значения тока двигателя $I_s_prev_mem$, ширины зоны нечувствительности $Dead_zone$, направления поиска экстремального значения $Route_mem$, текущего значения потокосцепления ψ_out , величины его приращения $\Delta\psi$. Работа блока *Extreme_Stirling* осуществляется в соответствии с приведенным выше алгоритмом работы экстремального регулятора. Он программно реализован на языке Си при помощи встроенного в *MATLAB* редактора.

Результаты имитационного моделирования работы системы экстремального регулирования показаны на рис. 7.

Из анализа рисунков следует, что система экстремального регулирования выполняет поиск минимального значения тока I_s путем пошагового изменения величины потокосцепления ψ_r . При этом на рис. 7, а видно, что приращение $\Delta\psi_r$ выбрано неизменным во всем интервале поиска. На рис. 7, б поиск минимального значения тока I_s осуществляется с изменяющимся шагом. Так увеличение $\Delta\psi_r$ в середине процесса поиска позволяет значительно уменьшить время поиска с 40 до 24 с. В обоих случаях достигается примерно одно и то же значение минимального тока $I_s = 91,73$ А при принятой в моделировании величине электромагнитного момента 350 Н·м.

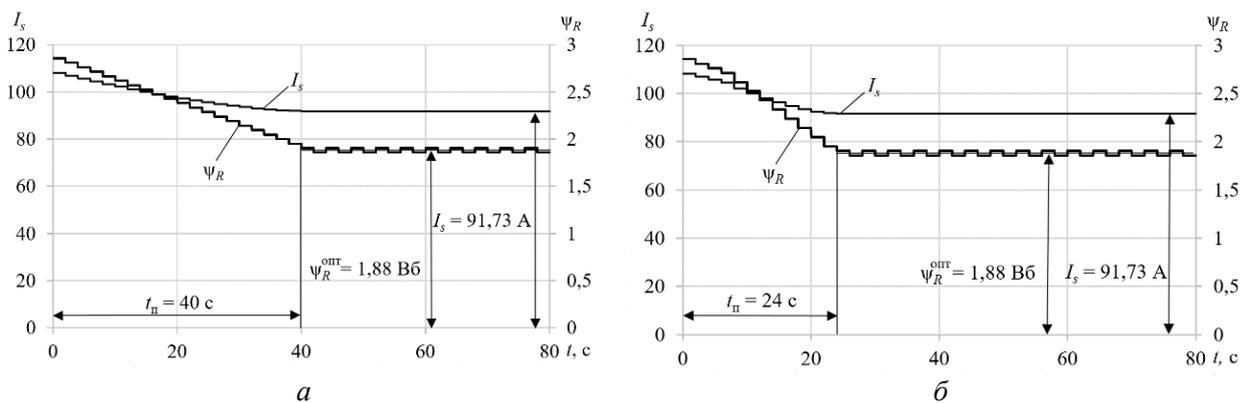


Рис. 7. Результаты моделирования системы экстремального регулирования (I_s – ток статора двигателя; ψ_r – потокосцепление ротора; t_n – время поиска):

a – с постоянным шагом $\Delta\psi_r$; b – с изменяющимся шагом $\Delta\psi_r$

Fig. 7. Extreme regulating system modeling results (I_s – engine stator current;

ψ_r – rotor flux linkage; t_n – search time):

a – with a constant step $\Delta\psi_r$; b – with an alternating step $\Delta\psi_r$

Заключение

Разработанная система экстремального регулирования позволяет повысить энергетическую эффективность вспомогательных машин электровоза и сократить время поиска оптимального значения ψ_R за счет использования экстремального регулятора с изменяемым шагом. Предлагаемая структура управления

уменьшает электрические потери в двигателе во всех режимах его работы. Для рассмотренного в работе двигателя 4A225M4 У2 величину тока статора I_S удалось сократить на 15 %, а время поиска оптимального значения на 40 % по сравнению с классическим методом экстремального регулирования с постоянным шагом поиска.

Список литературы

1. Yousef A. Abdel maksoud S. Review on Field Oriented Control of Induction Motor. *International Journal For Research In Emerging Science And Tech-nology*. 2015. Vol. 2. No. 7. 12 p.
2. Mekrini Z., Bri S. A Modular Approach and Simulation of an Asynchronous Machine. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2016. Vol. 4. No 6. 10 p.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. М.: Энергия, 1974. 839 с.
4. Калачёв Ю.Н. SimInTech: моделирование в электроприводе. М. ДМК Пресс. 2019. 98 с.
5. Kulinich Yu.M., Shukharev S.A. Application of an Extreme Control Sys-tem to Operate the Reactive Power Compensator of an Electric Locomotive. *Russian Electrical Engineering*. 2016. Vol. 2. No. 87. 3 p.
6. Растринин Л.А. Системы экстремального управления. М.: Наука, 1974. 623 с.
7. Кулинич Ю.М., Шухарев С.А., Гуляев А.В. Устройство экстремального управления асинхронного двигателя. Заявка на изобретение № 2021121608 Российская Федерация, МПК В 60 L 3/10.: заявл. 20.07.2021.
8. Кравчик А.Э., Шлаф М.М. Асинхронные двигатели серии 4А. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
9. Кулинич Ю.М., Шухарев С.А. Повышение энергетических показателей электровоза переменного тока за счет новой структуры управления компенсатором. *Электротехника*. 2016. № 9. С. 57–61.
10. Kulinich Y.M., Shukharev S.A. Improving the energy performance of an ac electric locomotive using a new compensator control structure. *Russian Electrical Engineering*. 2016. Vol. 87. No. 9. P. 532–535. DOI 10.3103/S106837121609008X.
11. Шухарев С.А. Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока на основе применения экстремального компенсатора реактивной мощности: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2017. 24 с.
12. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. Т. 1. М.: ГИФМЛ, 1962. 464 с.
13. Дьяконов В.П. Simulink: Самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2015. 782 с.
14. Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink. СПб.: Лань, 2013. 448 с.
15. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (MatLab 7.0.1). Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 320 с.
16. Eshkabilov S. Beginning MATLAB and Simulink: From Novice to Professional. Apress, 2019. 544 p.
17. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронным двигателем. СПб.: изд-во СПбГУ ИТМО, 2006. 94 с.
18. Панкратов В.В. Векторное управление асинхронными электроприводами. Новосибирск: изд-во НГТУ, 1999. 66 с.

References

1. Yousef A. Abdel Maksoud S. Review on Field Oriented Control of Induction Motor. *International Journal for Research in Emerging Science and Technology*, 2015. Vol. 2. No 7. 12 p.
2. Mekrini Z., Bri S. A Modular Approach and Simulation of an Asynchro-nous Machine. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2016. Vol. 4. No. 6. 10 p.
3. Voldek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric cars]. Moscow: Energiya Publ., 1974. 839 p.
4. Kalachev Yu.N. SimInTech: modelirovanie v elektroprivode [SimInTech: Simulation in an electric drive]. Moscow: DМК Press Publ., 2019. 98 p.
5. Kulinich Yu.M., Shukharev S.A. Application of an Extreme Control System to operate the Reactive Power Compensator of an Electric Locomotive. *Russian Electrical Engineering*. 2016. Vol. 2. No. 87. 3 p.
6. Rastrigin L.A. Extreme control systems. М.: Nauka, 1974. 623 p.
7. Kulinich Yu.M., Shukharev S.A., Gulyaev A.V. Application for invention No. 2021121608 Russian Federation, IPC B 60 L 3/10. Apr. 20.07.2021.
8. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I. etc. Asinkhronnye dvigateli serii 4A [Asynchronous motors of the 4A series]. Moscow: Energoizdat Publ., 1982. 504 p.
9. Kulinich Yu.M., Shukharev S.A. Povyshenie ehnergeticheskikh pokazateley ehlektrovoza peremennogo toka za schet novoy struktury upravleniya kompensatorom [Increasing the energy performance of an alternating current electric locomotive due to a new control structure of the compensator]. *Elektrotekhnika [Electrical engineering]*. 2016, No. 9. pp. 57–61.
10. Kulinich Y.M., Shukharev S.A. Improving the energy performance of an ac electric locomotive using a new compensator control structure. *Russian Electrical Engineering*. 2016. Vol. 87. No. 9. pp. 532–535. DOI 10.3103/S106837121609008X.
11. Shukharev S.A. Povyshenie ehnergeticheskoy ehffektivnosti ehlektrovozov peremennogo toka na osnove primeneniya ehkstreml'nogo kompensatora reaktivnoy moshhnosti: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. [Increasing the energy efficiency of

alternating current electric locomotives based on the use of an extreme reactive power compensator: author. Ph.D. (Engineering) diss.]. Komsomol'sk-na-Amure GTU, 2017. 24 p.

12. Berezin I.S., Zhidkov N.P. Metody vychisleniy. Tom 1 [Calculation methods. Vol. 1]. Moscow: GIFML Publ., 1962. 464 p.

13. Dyakonov V.P. Simulink: samouchitel' [Simulink: Tutorial]. Moscow: DMK Press Publ., 2015. 782 p.

14. German-Galkin S.G. Virtual'nye laboratorii poluprovodnikovyykh sistem v srede Matlab-Simulink [Virtual laboratories of semiconductor systems in the Matlab-Simulink environment]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2013. 448 p.

15. Terekhin V.B. Modelirovanie sistem ehlektroprivoda v Simulink (MatLab 7.0.1) [Simulation of electric drive systems in Simulink (MatLab 7.0.1)]. Tomsk: Tomskij politekhnicheskij universitet Publ., 2008. 320 p.

16. Eshkabilov S. Beginning MATLAB and Simulink: From Novice to Professional. Apress. 2019. 544 p.

17. Usoltsev A.A. Chastotnoe upravlenie asinkhronnym dvigatelem [Frequency control of an asynchronous motor]: Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyy universitet informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki Publ., 2006. 94 p.

18. Pankratov V.V. Vektornoe upravlenie asinkhronnymi ehlektroprivodami [Vector control of asynchronous electric drives]. Novosibirsk: Novosibirskij gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet Publ., 1999. 66 p.

Информация об авторах

Шухарев Сергей Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры транспорта железных дорог, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: shuharevsa@gmail.com.

Гуляев Александр Викторович – доцент кафедры электротехники, электроники и электромеханики, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: 89143127984@ya.ru.

Information about the authors

Sergey A. Shukharev – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Transport of Railways, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: shuharevsa@gmail.com.

Alexander V. Gulyaev – Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: 89143127984@ya.ru.