

Повышение энергетической эффективности вспомогательных машин электровоза переменного тока

Ю. М. КУЛИНИЧ, С. А. ШУХАРЕВ, А. В. ГУЛЯЕВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО «ДВГУПС»), Хабаровск, 680021, Россия

Аннотация. В настоящее время асинхронный частотно-регулируемый привод, выполненный на базе полупроводниковых преобразователей, широко применяется благодаря относительной простоте и надежности конструкции. Использование цифровых микропроцессорных систем обеспечивает высокую точность и гибкость управления приводом. На отечественном подвижном составе началось широкое внедрение асинхронных двигателей взамен тяговых двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением. В частности, асинхронные двигатели со скалярным управлением применяются на серийно выпускаемых тепловозах 2ТЭ25А и электровозах ЭП20. Регулирование режимов работы вспомогательных асинхронных машин этих локомотивов осуществляется методом векторного управления.

Применение на подвижном составе нового типа двигателя позволяет добиться значительного повышения качества потребляемой энергии и снижения расходов электроэнергии на тягу поездов. Обеспечение энергетической эффективности привода в широком диапазоне нагрузок требует дальнейшего исследования. В этой связи становится весьма актуальным вопрос экономии энергоресурсов. В статье предложена схема векторного управления асинхронными двигателями вспомогательных машин электровоза, реализующая экстремальный метод управления по критерию минимизации потребляемого тока. Анализ работы двигателя выполнен на базе его математической модели во вращающейся системе координат $d-q$, которая реализована в пакете прикладных программ MatLab/Simulink. В результате имитационного моделирования установлено, что система экстремального управления с переменным шагом позволяет для каждого фиксированного значения электромагнитного момента двигателя за минимальное время находить оптимальное (экстремальное) значение магнитного потока ротора двигателя, которому соответствует минимальное значение тока статора. Разработанная модель двигателя с векторным управлением дополнена устройством экстремального регулятора, позволяющего с минимальным временем поиска достигать наилучших энергетических показателей двигателя и уменьшать электрические потери во всех режимах работы. Представленные результаты исследования могут быть использованы при разработке энергосберегающих систем управления асинхронным двигателем.

Ключевые слова: электровоз переменного тока; асинхронный двигатель; имитационное моделирование; векторное управление; вращающаяся система координат; экстремальное управление

Введение. В настоящее время асинхронный электропривод является самым распространенным из всех видов приводов, успешно применяющихся в промышленности и на транспорте. Популярность асинхронного двигателя обусловлена его высокими эксплуатационными и энергетическими показателями по сравнению с двигателями постоянного тока, традиционно применяющимися на подвижном составе отечественных железных дорог. Теоретической основой для появления электропривода с частотным управлением послужили работы М. П. Костенко [1], разработавшего основной закон частотного (скалярного) управления. Следующим шагом в развитии частотного управления стала разработка Ф. Блашке (F. Blaschke) [2], в которой в 1971 г. были сформулированы принципы векторного управления. В ее основу положены уравнения электромагнитных процессов в асинхронном двигателе, представленные в векторной форме, которые ориентированы в системе координат по направлению магнитного поля (FOC — field oriented control). В этом же году немецкими и японскими исследователями была представлена теория прямого управления моментом [3] (DTC — direct torque control) асинхронного двигателя.

При традиционном векторном FOC-управлении описание электромагнитных процессов осуществляется в системе координат $d-q$ [4], вращающейся синхронно с магнитным полем статора двигателя с частотой ω_1 [5]. Вектор потокосцепления ротора Ψ_R совместим с осью d выбранной системы координат. В этом случае проекции векторов потокосцепления ротора Ψ_R и тока статора I_S будут постоянными величинами, что значительно упрощает анализ электромагнитных процессов. В системе координат $d-q$ уравнение электромагнитного момента имеет вид

$$M_{em} = \frac{3}{2} z_p \frac{L_m}{L_R} \Psi_R I_{Sq}, \quad (1)$$

где z_p — число пар полюсов двигателя; Ψ_R — потоко-сцепление ротора; I_{Sq} — проекция тока статора на ось q ;

L_m — индуктивность намагничивания; L_R — индуктивность ротора.

С помощью продольной составляющей тока статора I_{Sd} можно независимо управлять потокосцеплением ротора $\Psi_{Rd} = \Psi_R$. Передаточная функция канала управления потокосцеплением двигателя соответствует аperiодическому звену первого порядка с постоянной времени ротора:

$$\Psi_{Rd} = \Psi_R = \frac{L_m}{1 + T_R p} I_{Sd}, \quad (2)$$

где T_R — постоянная времени ротора, $T_R = L_R / R'_R$, R'_R — активное сопротивление обмотки ротора; p — оператор Лапласа.

Угловая частота вращения ротора ω_R при постоянном значении потокосцепления ротора Ψ_R безынерционно определяется поперечной составляющей тока статора I_{Sq} :

$$\omega_R = \frac{L_m}{T_R \Psi_R} I_{Sq}. \quad (3)$$

Система координат $d-q$ ортогональна, т. е. изменение одной из проекций тока статора не влияет на другую, поэтому управление потокосцеплением и частотой может осуществляться независимо [6].

В настоящее время на перспективных электровозах с асинхронными двигателями, например ЭП10, используется метод скалярного управления тяговыми двигателями за счет изменения частоты и амплитуды питающего напряжения [7]. Векторное управление с постоянной величиной потокосцепления применяется, как правило, в электроприводе вспомогательных машин. При этом такой привод имеет ограниченные энергетические показатели, связанные с повышенным потреблением тока. Предлагаемый в статье подход позволяет устранить этот недостаток и за счет изменения регулируемой величины потокосцепления уменьшить потребление тока и повысить показатели работы электропривода. Кроме того, с помощью представленной математической модели двигателя можно исследовать работу тягового асинхронного двигателя электровоза при скалярном управлении.

Целью исследования является повышение энергоэффективности системы векторного управления асинхронного двигателя за счет оптимизации задания потокосцепления ротора Ψ_R . Оптимальное значение потокосцепления $\Psi_R^{\text{опт}}$ определяется в соответствии с критерием минимального потребляемого тока статора I_S в зависимости от заданного значения электромагнитного момента M_{em} на валу двигателя. При таком управлении оптимальное значение потокосцепления обеспечивает на определенном уровне

взаимное положение моментобразующих векторов и, соответственно, заданное значение электромагнитного момента.

Расчет оптимального значения потокосцепления ротора. Установим оптимальное значение потокосцепления ротора $\Psi_R^{\text{опт}}$, соответствующее минимальному значению тока статора двигателя при фиксированном значении электромагнитного момента.

Из векторной диаграммы асинхронного двигателя [8] связь между треугольниками токов и магнитных потоков описывается соотношением

$$\vec{\Psi}_R = L_m \vec{I}_S + L_R \vec{I}_R, \quad (4)$$

откуда для вектора тока статора можно записать

$$\vec{I}_S = \frac{1}{L_m} \vec{\Psi}_R - \frac{L_R}{L_m} \vec{I}_R, \quad (5)$$

где \vec{I}_R — вектор тока ротора.

Перепишем полученное уравнение в проекциях на вращающиеся оси $d-q$

$$(I_{Sd} + jI_{Sq}) = \frac{1}{L_m} (\Psi_{Rd} + j\Psi_{Rq}) - \frac{L_R}{L_m} (I_{Rd} + jI_{Rq}), \quad (6)$$

где j — мнимая единица.

Составляющая тока статора I_{Sd} на вещественную ось d выражается уравнением

$$I_{Sd} = \frac{1}{L_m} \Psi_{Rd} - \frac{L_R}{L_m} I_{Rd}. \quad (7)$$

С учетом того что в системе координат $d-q$ значения $\Psi_{Rd} = \Psi_R$ и $I_{Rd} = 0$, последнее уравнение принимает вид

$$I_{Sd} = \frac{\Psi_{Rd}}{L_m}. \quad (8)$$

Из уравнения (1) для составляющей тока статора I_{Sq} можно записать

$$I_{Sq} = \frac{2M_{em}}{3z_p \Psi_R K_R}, \quad (9)$$

где K_R — коэффициент электромагнитной связи ротора, $K_R = L_m / L_R = L_m / (L_m + L_{\sigma R})$, $L_{\sigma R}$ — индуктивность рассеяния ротора.

Подставляя значение коэффициента K_R в уравнение (9), получим

$$I_{Sq} = \frac{2M_{em}}{3z_p \Psi_R} \left(1 + \frac{L_{\sigma R}}{L_m} \right). \quad (10)$$

Значение модуля тока статора I_S может быть получено в результате квадратичного сложения его проекций на оси d – q в соответствии с уравнениями (8) и (10):

$$I_S = \sqrt{I_{Sd}^2 + I_{Sq}^2} = \sqrt{\left(\frac{\Psi_R}{L_m}\right)^2 + \left[\frac{2M_{em}}{3z_p \Psi_R} \left(1 + \frac{L_{\sigma R}}{L_m}\right)\right]^2}. \quad (11)$$

Для определения экстремального (оптимального) значения потокосцепления ротора Ψ_R^{opt} , соответствующего минимальному значению тока статора I_S , вычислим и приравняем к нулю первую производную тока статора $dI_S/d\Psi_R = 0$. Выполнив необходимые преобразования, получим аналитическое выражение для оптимального значения потокосцепления Ψ_R^{opt} при фиксированном значении электромагнитного момента M_{em}

$$\Psi_R^{opt} = \sqrt{\frac{2M_{em}}{3z_p} (L_{\sigma R} + L_m)}. \quad (12)$$

Применение оптимального закона управления потокосцеплением в аналитическом виде на практике является весьма проблематичным из-за трудностей построения точной модели двигателя, которая учитывает его изменяющиеся параметры, зависящие от температуры, нелинейности цепи намагничивания, а также потери и насыщение в магнитной цепи. Изменение параметров двигателя под действием указанных факторов приводит к отклонению от оптимального режима и требует постоянной коррекции величины оптимального потокосцепления.

Итеративные поисковые системы, например, экстремального управления не требуют знания параметров привода, поскольку они основаны на ступенчатом изменении управляющего воздействия (величины потокосцепления) до достижения минимальной величины потребляемого двигателем тока. При этом основная задача метода экстремального управления состоит в снижении времени достижения оптимального режима. Применение метода экстремального управления с переменным шагом поиска позволяет уменьшить время поиска минимума тока двигателя.

Уравнения асинхронного двигателя во вращающейся системе координат d – q . Современные системы управления асинхронным двигателем построены на представлении электромагнитных процессов в векторной форме, что является практически стандартом управления [9]. 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.

Если систему управления приводом построить таким образом, чтобы потокосцепление ротора Ψ_R оста-

валось неизменным во всех режимах работы двигателя ($\Psi_R = const$), то регулирование электромагнитного момента двигателя M_{em} будет осуществляться за счет изменения поперечной составляющей тока статора I_{Sq} . Управление магнитным потоком (потокосцеплением) в такой системе происходит за счет проекции тока статора I_{Sd} , которая при этом не влияет на величину M_{em} . Таким образом, принцип векторного управления двигателем сводится к раздельному управлению потокосцеплением и моментом с помощью независимых составляющих тока статора I_{Sd} и I_{Sq} , являющихся проекциями вектора тока статора I_S на оси d и q вращающейся системы координат, ориентированной по направлению вектора потокосцепления ротора Ψ_R .

Управление асинхронным двигателем можно осуществлять также с помощью проекций вектора напряжения статора на оси координат d – q . Для этого необходимо разработать модель двигателя, входными величинами которого являются проекции напряжения статора U_{Sd} и U_{Sq} на оси d – q .

Система уравнений (13) является математической основой для создания электрической составляющей имитационной модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором [10].

$$\begin{cases} U_{Sd} = R_{\text{эКВ}}(pT_{\text{эКВ}} + 1)I_{Sd} - L_{\text{эКВ}}\omega_1 I_{Sq} - R'_R \frac{L_m}{L_R^2} \Psi_R; \\ U_{Sq} = R_{\text{эКВ}}(pT_{\text{эКВ}} + 1)I_{Sq} + L_{\text{эКВ}}\omega_1 I_{Sd} + K_2 \Psi_R \omega_R z_p; \\ \Psi_R = \frac{L_m}{T_R p + 1} I_{Sd}; \\ M_{em} = \frac{3}{2} z_p K_2 \Psi_R I_{Sq}, \end{cases} \quad (13)$$

где $R_{\text{эКВ}}$ – эквивалентное сопротивление, $R_{\text{эКВ}} = R_S + K_2^2 R'_R$, R_S – активное сопротивление обмотки статора; K_1 и K_2 – коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора соответственно, $K_1 = L_m/L_S$, $K_2 = L_m/L_R$; $L_{\text{эКВ}}$ – эквивалентная индуктивность, $L_{\text{эКВ}} = L_S(1 - K_1 K_2)$, L_S – индуктивность статора; $T_{\text{эКВ}}$ – эквивалентная постоянная времени, $T_{\text{эКВ}} = L_{\text{эКВ}}/R_{\text{эКВ}}$.

Угловая частота вращения ротора ω_R в модели двигателя может быть выражена через величину электрической угловой скорости вращения магнитного поля ротора Ω : $\Omega = z_p \omega_R$.

Уравнение электромеханического равновесия в модели двигателя представляется в виде

$$M_{em} - M_c = J \frac{d\omega_R}{dt}, \quad (14)$$

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

В соответствии с приведенными выше уравнениями разработана имитационная модель асинхронного

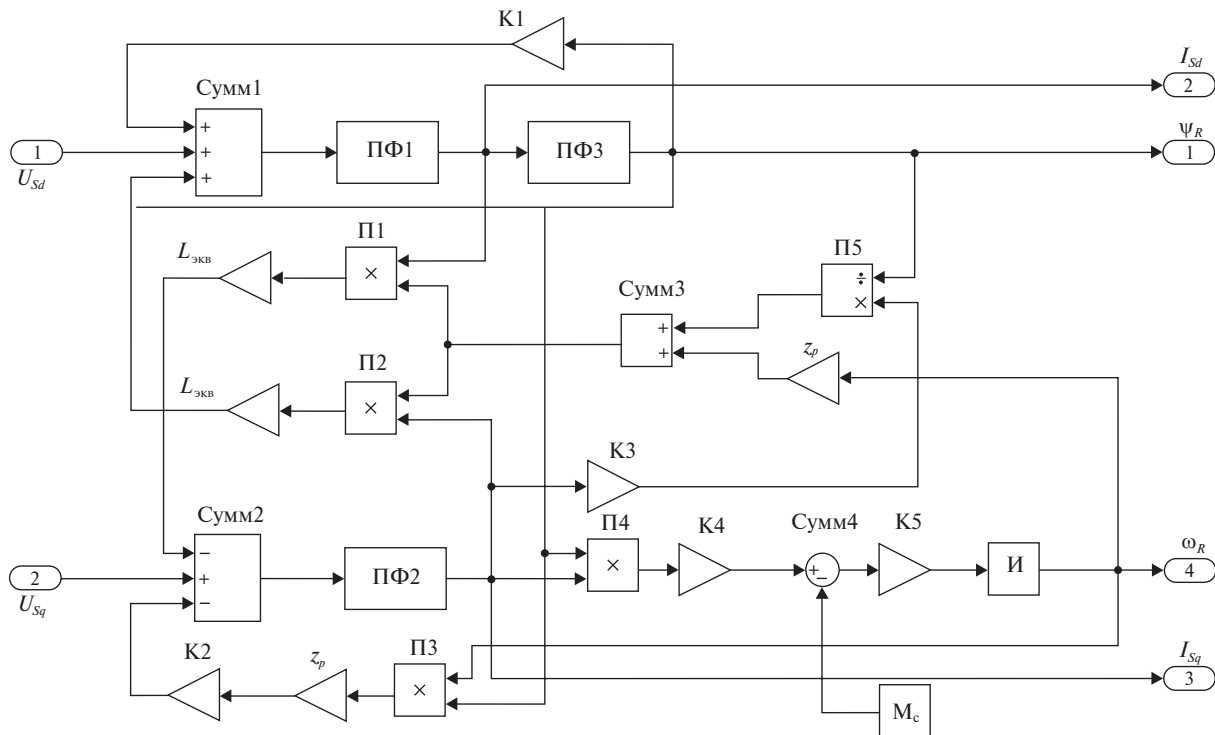


Рис. 1. Структурная схема модели двигателя в пакете MatLab/Simulink:

Сумм1—Сумм5 — сумматоры; К1—К5, z_p , $L_{экв}$ — усилители;

П1—П5 — перемножители; ПФ1—ПФ3 — блоки передаточной функции; И — интегратор

Fig. 1. Block diagram of the engine model in the MatLab/Simulink package:

Сумм1—Сумм5 — adders; К1—К5, z_p , $L_{экв}$ — amplifiers;

П1—П5 — multipliers; ПФ1—ПФ3 — transfer function blocks; И — integrator; U_{sd} , U_{sq} — stator voltage projections on the d - q axis;

I_{sd} , I_{sq} — projection of the stator current on the d - q axis; Ψ_R — rotor flux linkage; ω_R — angular frequency of rotor rotation;

M_c — moment of resistance on the engine shaft

двигателя, реализованная в пакете программ MatLab/Simulink [11]. Структурная схема модели изображена на рис. 1.

Смоделируем электромагнитные процессы в асинхронном двигателе типа 4A225M4 У2, установленном в приводе мотор-вентилятора электровоза ВЛ85. В статье основное внимание акцентировано на применении в асинхронном двигателе метода экстремального управления, поэтому на данном этапе исследования не учитываются потери в стали. При этом в экстремальном регуляторе принципиально не важна величина потерь в стали, поскольку он определяет экстремальное значение контролируемого параметра при любых параметрах потерь. Предполагается, что двигатель работает на линейной части характеристики насыщения, а автономный инвертор напряжения может быть представлен в виде апериодического звена первого порядка [12].

На рис. 1 с помощью сумматоров Сумм1—Сумм2 рассчитываются первые слагаемые первого и второго уравнения системы (13). Действительная I_{sd} и мнимая I_{sq} составляющие тока статора формируются на выходе блоков передаточных функций ПФ1 и ПФ2 в

результате деления на $R_{экв}(pT_{экв} + 1)$ в соответствии с первым и вторым уравнениями системы (13). В блоке ПФ3 формируется текущее значение потокосцепления ψ_R в соответствии с третьим уравнением системы (13). С помощью блока перемножения П4 и усилителя К4 в соответствии с последним выражением системы (13) рассчитывается величина электромагнитного момента M_{em} . Угловая частота вращения ротора ω_R определяется на выходе интегратора И в результате решения уравнения (14). Все оставшиеся элементы рисунка используются при решении системы уравнений (13).

Структурная схема векторного управления двигателем. Для реализации процесса векторного управления структурная схема асинхронного двигателя (рис. 1) дополнена двумя управляющими контурами: по потокосцеплению ротора ψ_R и угловой частоте вращения ротора ω_R с внутренними подчиненными контурами регулирования по току. Структурная схема асинхронного двигателя с векторным управлением показана на рис. 2, указанные контуры регулирования представлены в левой части схемы.

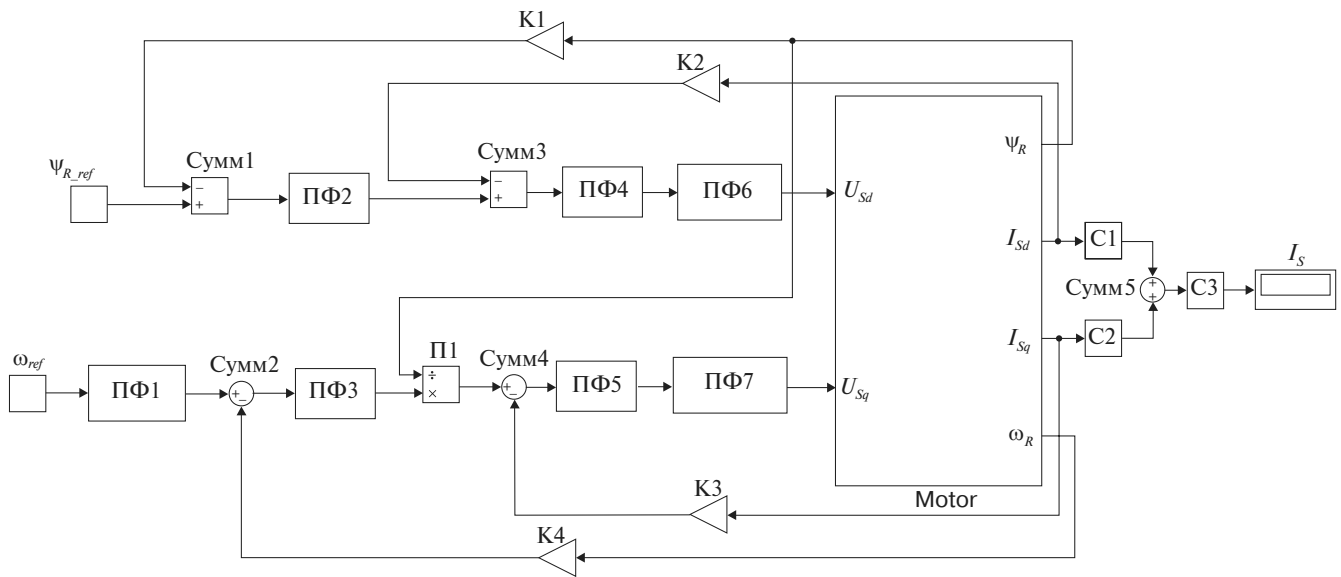


Рис. 2. Структурная схема двигателя с векторным управлением в пакете MatLab/Simulink:
 Сумм1—Сумм6 — сумматоры; К1—К4 — усилители; П1 — перемножитель; ПФ1—ПФ7 — блоки передаточной функции;
 C1—C2 — блоки возведения в степень; C3 — блок вычисления квадратного корня; Motor — модель двигателя
 Fig. 2. Block diagram of a vector control engine in the MatLab/Simulink package:
 Сумм1—Сумм6 — adders; К1—К4 — amplifiers; П1 — multiplier; ПФ1—ПФ7 — transfer function blocks;
 C1—C2 — exponentiation blocks; C3 — block for calculating the square root; Motor — engine model

Схема векторного управления двигателем состоит из двух контуров регулирования магнитного потока и угловой частоты вращения ротора двигателя. Каждый из этих контуров представляет собой классическую схему регулирования по отклонению. Ток в контурах создается с помощью инверторов напряжения ПФ6 и ПФ7, представленных в схеме идеальным апериодическим звеном первого порядка. Необходимые для моделирования значения потока ротора ψ_R и угловой частоты вращения ротора ω_R задаются с помощью соответствующих задатчиков ψ_{R_ref} и ω_{ref} . Сравнение заданного и фактического значений потокосцепления и угловой частоты вращения ротора осуществляется с помощью сумматоров Сумм1 и Сумм2. Регулирование величин потокосцепления и угловой частоты вращения ротора осуществляется соответствующими регуляторами потока ПФ2 и угловой частоты вращения ПФ3, а также регуляторами тока ПФ4 и ПФ5, представляющими собой пропорционально-интегрирующие регуляторы. Момент на валу двигателя создается за счет изменения момента сопротивления M_c блоком константы в модели двигателя Motor. Действующее значение тока статора определяется его проекциями на оси $d-q$ и рассчитывается в соответствии с выражением

$$I_S = \sqrt{I_{Sd}^2 + I_{Sq}^2}. \quad (15)$$

Узел для расчета тока статора представлен в правой части схемы и состоит из двух блоков возведения

в степень C1, C2 и блока вычисления квадратного корня C3.

Усилители К1—К4 являются датчиками фактических значений потокосцепления, действительной и мнимой составляющей тока статора и угловой частоты вращения ротора.

Разработка системы экстремального регулирования. 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 статорной цепи двигателя T_S , $T_S = (L_{\sigma S} + L_m) / R_S$ ($L_{\sigma S}$ — индуктивность рассеивания статора). В этом случае потокосцепление можно считать условно постоянным [8]. С этих позиций будем проектировать работу системы экстремального управления двигателем [13].

Текущее значение тока статора I_{Sk} определяется величиной сигнала потокосцепления $\psi_{R(k-1)}$ за предшествующий $k-1$ период времени. Полученное значение потокосцепления характеризует показатель качества регулирования $Q(x_{k-1})$ системы управления на предыдущем $k-1$ периоде вычисления. Сигнал $Q(x_{k-1})$, пропорциональный току двигателя, поступает на вход экстремального регулятора, осуществляющего поиск потокосцепления ψ_R вблизи его экстремальных значений $\psi_R^{экс}$ и поддерживает его вблизи этих значений. Поиск $\psi_R^{экс}$ осуществляется за счет ступенчатого изменения сигнала на входе канала потокосцепления на

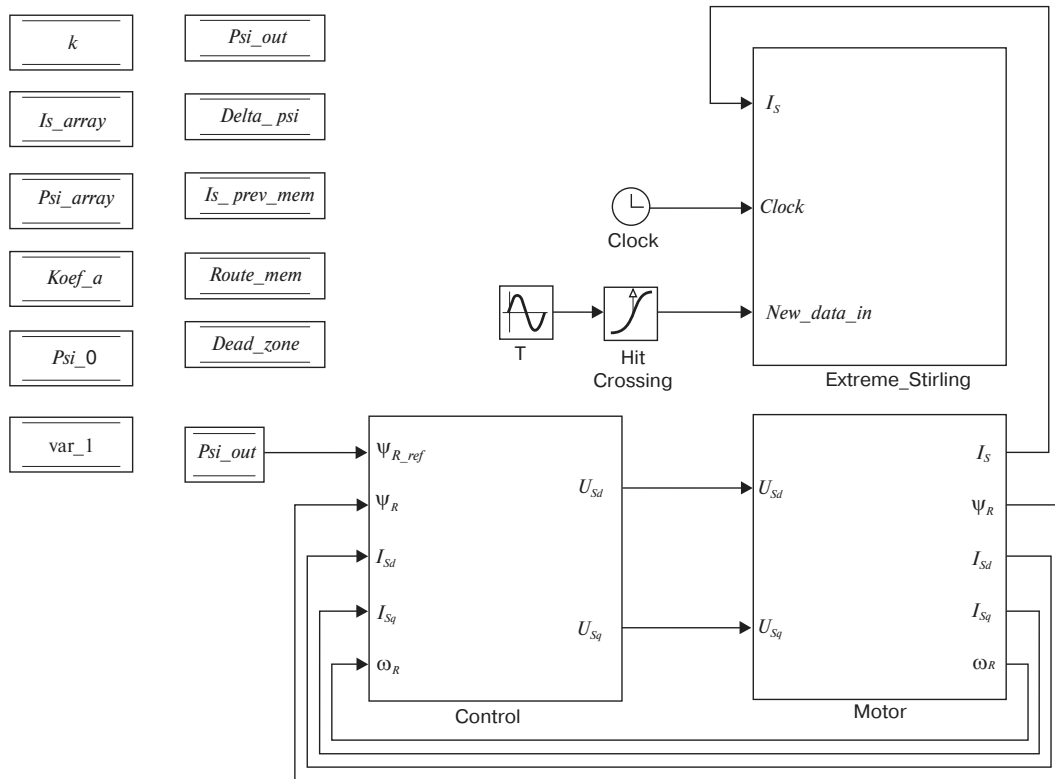


Рис. 3. Структурная схема двигателя с экстремальным управлением в пакете MatLab/Simulink: Motor — модель двигателя; Control — модель системы управления; Extreme_Stirling — программный блок экстремального регулятора; Hit Crossing — блок выявления нулевых значений; T — функциональный генератор; Clock — часы текущего времени; k, Is_array, Psi_array, Koef_a, Psi_0, var_1, Psi_out, Delta_psi, Is_prev_mem, Route_mem, Dead_zone — блоки памяти
 Fig. 3. Block diagram of engine with extreme control in the MatLab/Simulink package: Motor — engine model; Control — control system model; Extreme_Stirling — extreme regulator software block; Hit Crossing — block for detecting zero values; T — functional generator; Clock — current time clock; k, Is_array, Psi_array, Koef_a, Psi_0, var_1, Psi_out, Delta_psi, Is_prev_mem, Route_mem, Dead_zone — memory blocks

величину $\Delta\psi_R$ как в сторону увеличения, так и уменьшения.

Алгоритм поиска экстремального значения $\psi_R^{экс}$ заключается в следующем: при уменьшении тока статора двигателя I_S сохраняется приращение потокосцепления $\Delta\psi_R$, выбранное на предыдущем шаге вычисления, а при увеличении I_S приращение $\Delta\psi_R$ выбирается с противоположным знаком.

В процессе регулирования диапазон возможных значений ψ_R отличается от экстремального $\psi_R^{экс}$ на заданную величину зоны нечувствительности δ и находится в диапазоне значений от $\psi_R^{экс} - \delta$ до $\psi_R^{экс}$. По сути дела, экстремальное значение потокосцепления $\psi_R^{экс}$ определяет оптимальную величину потокосцепления $\psi_R^{опт}$ для системы управления двигателем, т. е. $\psi_R^{экс} = \psi_R^{опт}$.

Применение классического метода экстремального регулирования [14] предполагает проведение процедуры поиска с фиксированным шагом — приращением потокосцепления $\Delta\psi_R = \text{const}$, вычисленным перед проведением процедуры поиска. Вместе с тем использование в экстремальном регуляторе изменяющегося шага $\Delta\psi_R = \text{var}$ позволяет значительно сократить вре-

мя поиска экстремального значения I_S , а также уменьшить пульсации тока двигателя в установившемся режиме.

Для получения циклического закона изменения тока статора двигателя с наименьшей амплитудой колебаний в зоне нечувствительности δ необходимо, чтобы значение приращения потокосцепления $\Delta\psi_R$ выбиралось из следующего соотношения:

$$\Delta\psi_R = \sqrt{\frac{\delta}{|a|}}, \quad (16)$$

где a — коэффициент, определяющий форму кривой $I_S = f(\psi_R)$.

При работе экстремального регулятора с $\Delta\psi_R = \text{var}$ значение коэффициента a может быть получено методом численного дифференцирования графика $I_S = f(\psi_R)$. Анализ показал, что при описании параболического вида кривых $I_S = f(\psi_R)$ достаточно ограничиться полиномом второй степени:

$$I_S = a\psi_R^2 + b\psi_R + c. \quad (17)$$

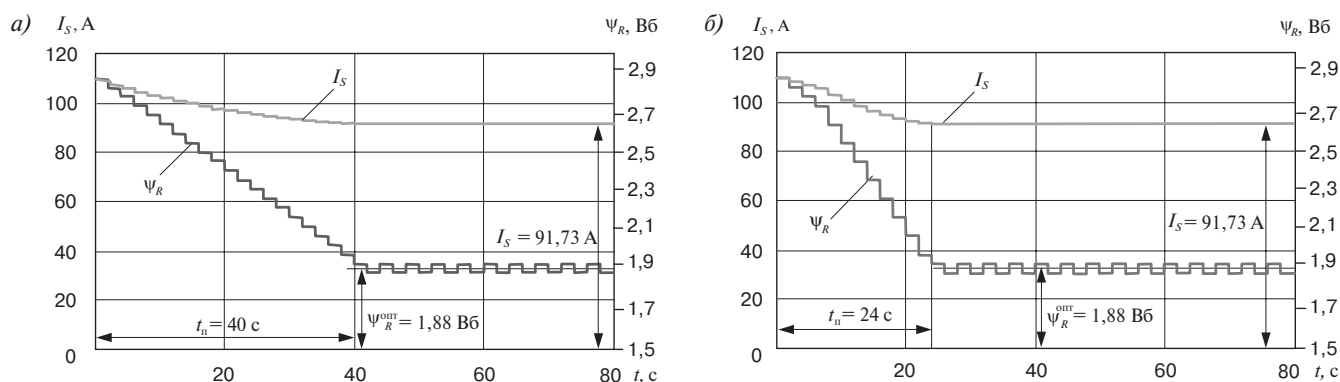


Рис. 4. Результаты моделирования системы экстремального регулирования:

а — с постоянным шагом $\Delta\psi_R$; б — с изменяющимся шагом $\Delta\psi_R$;

I_s — ток статора двигателя; ψ_R — потокосцепление ротора; ψ_R^{opt} — оптимальное значение потокосцепления ротора; t_n — время поиска

Fig. 4. Modeling results of the extreme regulation system:

a — with a constant step $\Delta\psi_R$; б — with a variable step $\Delta\psi_R$;

I_s — motor stator current; ψ_R — rotor flux linkage; ψ_R^{opt} — optimal value of the rotor flux linkage; t_n — search time

После дифференцирования уравнения (17) получаем

$$I'_s = 2a\psi_R + b. \quad (18)$$

В полученном выражении для определения искомого значения a необходимо также определить неизвестную b . Принимаем, что для одной параболы величина b является постоянной. В этом случае вычислим производные I'_{S1} и I'_{S2} в соседних точках кривой $I_s = f(\psi_R)$ при значениях ψ_{R1} и ψ_{R2} с шагом $\Delta\psi_R$. Приравняв в этих точках значения коэффициента a , получаем формулу для расчета коэффициента b :

$$b = \frac{\psi_{R2}I'_{S1} - \psi_{R1}I'_{S2}}{\Delta\psi_R}. \quad (19)$$

После подстановки полученного значения коэффициента b в уравнение (18) выразим из него искомое значение коэффициента a . Полученное значение a позволяет в соответствии с выражением (16) рассчитать приращение $\Delta\psi_R$ с изменяемым шагом $\Delta\psi_R = var$, обеспечивающее работу экстремального регулятора в зоне нечувствительности с наименьшими отклонениями тока статора от экстремального значения.

В соответствии с алгоритмом экстремального регулирования разработана имитационная модель системы экстремального управления асинхронным приводом (рис. 3). Схема состоит из программного блока Extreme_Stirling, одиннадцати блоков памяти, имитационной модели двигателя Motor, а также системы его управления Control, включающей каналы управления по угловой частоте вращения ротора ω_R и потокосцеплению ψ_R . Шаг работы экстремального регулятора задается с помощью функционального генератора T и блока 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 моменты поступления обновленного значения тока статора. Блоки памяти предназначены для хранения: номера текущего шага поиска k , нескольких предыдущих значений тока статора I_s_array и потокосцепления Psi_array , Psi_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 Psi_out , а также величины его приращения $Delta_psi$. Работа блока Extreme_Stirling реализована 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. 4.

Из анализа рисунка следует, что система экстремального регулирования выполняет поиск минимального значения I_s путем пошагового изменения величины ψ_R . При этом на рис. 4, а видно, что приращение $\Delta\psi_R$ выбрано неизменным во всем интервале поиска. На рис. 4, б поиск минимального значения 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 статора $I_s = 91,73$ А при принятой в моделировании величине электромагнитного момента 350 Н·м.

Выводы. Разработанная система экстремального регулирования позволяет повысить энергетическую эффективность вспомогательных машин электро-

воза и сократить время поиска оптимального значения потокосцепления ротора за счет использования экстремального регулятора с изменяемым шагом. Предлагаемая структура управления позволяет уменьшить электрические потери в двигателе во всех режимах его работы. Для рассмотренного в статье двигателя 4А225М4 У2 величину тока статора удалось сократить на 15 %, а время поиска на 40 % по сравнению с классическим методом экстремального регулирования с постоянным шагом поиска. Кроме этого, с помощью представленной математической модели двигателя можно анализировать работу тягового асинхронного привода электровоза при скалярном способе управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костенко М. П. Электрические машины. Специальная часть. Л.: Госэнергоиздат, 1949. 708 с.
2. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die Transvektor-Regelung von Drehfeldmaschinen (in German) // Siemens-Zeitschrift 45. 1971. Heft 10. S. 757–760.
3. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford University Press, 1998. 729 p.
4. 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.
5. Усольцев А. А. Частотное управление асинхронными двигателями: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 94 с.
6. Калачёв Ю. Н. Векторное регулирование: метод. пособие. М.: ЭФО, 2013. 63 с.
7. Система управления и диагностики электровоза ЭП10 / под ред. С. В. Покровского. М.: Интекст, 2009. 356 с.

8. Калачёв Ю. Н. SimInTech: моделирование в электроприводе. М.: ДМК Пресс, 2019. 98 с.

9. Yousef A., Abdelmaksoud S. Review on Field Oriented Control of Induction Motor // International Journal for Research in Emerging Science and Technology. 2015. Vol. 2. No. 7. P. 12.

10. 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. P. 10.

11. Eshkabilov S. Beginning MATLAB and Simulink: From Novice to Professional. New York: Apress, 2019. 544 p.

12. Терёхин В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учеб. пособие. Томск. Изд-во Томского политехн. ун-та, 2008. 320 с.

13. Kulnich 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. P. 84–86.

14. Растринин Л. А. Системы экстремального управления. М.: Наука, 1974. 630 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КУЛИНИЧ Юрий Михайлович,

д-р техн. наук, профессор, кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО «ДВГУПС»

ШУХАРЕВ Сергей Анатольевич,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО «ДВГУПС»

ГУЛЯЕВ Александр Викторович,

доцент, кафедра «Электротехника, электроника и электромеханика», ФГБОУ ВО «ДВГУПС»

Статья поступила в редакцию 27.07.2021 г., принята к публикации 30.08.2021 г.

Для цитирования: 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. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-276-284>.

Increasing the energy efficiency of auxiliary machines of AC electric locomotive

Yu. M. KULINICH, S. A. SHUKHAREV, A. V. GULYAEV

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Far Eastern State University of Railways" (FGBOU VO "DVGUPS"), Khabarovsk, 680021, Russia

Abstract. Currently, an asynchronous variable frequency drive based on semiconductor converters is widely used due to the relative simplicity and reliability of the design. The use of digital microprocessor systems ensures high accuracy and flexibility of drive control. On the domestic rolling stock, the widespread introduction of asynchronous motors began to replace DC traction motors with sequential excitation. In particular, scalar-controlled asynchronous motors are used on serially produced 2TE25A diesel locomotives and EP20 electric locomotives. The auxiliary asynchronous machines of these locomotives are controlled by the vector control method.

The use of a new type of engine on the rolling stock makes it possible to achieve a significant increase in the quality of consumed energy and reduce the consumption of electricity for traction of trains. Ensuring the energy efficiency of the drive in a wide range of loads requires further research. In this regard, the issue of saving

energy resources becomes very urgent. The article proposes a vector control scheme for asynchronous motors of auxiliary machines of an electric locomotive, which implements an extreme method of control according to the criterion of minimizing the consumed current. The analysis of the engine operation is carried out based on its mathematical model in a rotating coordinate system $d-q$, which is implemented in the MatLab/Simulink software package. As a result of simulation modeling, it was found that the extreme control system with a variable step allows for each fixed value of the electromagnetic moment of the motor in the minimum time to find the optimal (extreme) value of the magnetic flux of the motor rotor, which corresponds to the minimum value of the stator current. The developed model of the motor with vector control is supplemented with an extreme regulator device, which allows achieving the best energy performance of the motor and reducing electrical losses in

all operating modes with a minimum search time. The presented research results can be used in the development of energy-saving control systems for an asynchronous motor.

Keywords: AC electric locomotive; asynchronous motor; simulation modeling; vector control; rotating coordinate system; extreme control

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-276-284>

REFERENCES

1. Kostenko M. P. *Elektricheskie mashiny. Spetsial'naya chast'* [Electric machines. Special part]. Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1949, 708 p.
2. Blaschke F. *Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die Transvektor-Regelung von Drehfeldmaschinen*. Siemens-Zeitschrift 45, 1971, Heft 10, pp. 757–760 (in German).
3. Vas P. *Sensorless Vector and Direct Torque Control*. Oxford University Press, 1998, 729 p.
4. 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, pp. 366–373.
5. Usol'tsev A. A. *Chastotnoe upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami. Ucheb. posobie* [Frequency control of asynchronous motors. Textbook]. St. Petersburg, SPbGU ITMO Publ., 2006, 94 p.
6. Kalachev Yu. N. *Vektornoe regulirovanie. Metod. posobie* [Vector regulation. Methodological guide]. Moscow, EFO Publ., 2013, 63 p.
7. Pokrovskiy S. V. *Sistema upravleniya i diagnostiki elektrovoza EP10* [EP10 electric locomotive control and diagnostics system]. Moscow, Intext Publ., 2009, 356 p.
8. Kalachev Yu. N. *SimInTech: modelirovanie v elektroprivode* [SimInTech: modeling in an electric drive]. Moscow, DMK Press Publ., 2019, 98 p.

■ E-mail: elochai@yandex.ru (A. V. Gulyaev)

9. Yousef A., Abdelmaksoud S. *Review on Field Oriented Control of Induction Motor*. International Journal for Research in Emerging Science and Technology, 2015, Vol. 2, no. 7, p. 12.

10. 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, p. 10.

11. Eshkabilov S. *Beginning MATLAB and Simulink: From Novice to Professional*. New York, Apress Publ., 2019, 544 p.

12. 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, Izd-vo Tomskogo politekhn. un-ta [Publishing house of Tomsk Polytechnic University], 2008, 320 p.

13. 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, pp. 84–86.

14. Rastrigin L. A. *Sistemy ekstremal'nogo upravleniya* [Systems of extremal control]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 630 p.

ABOUT THE AUTHORS

Yuriy M. KULINICH,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department "Railway Transport", FGBOU VO "DVGUPS"

Sergey A. SHUKHAREV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Railway Transport", FGBOU VO "DVGUPS"

Aleksander V. GULYAEV,

Associate Professor, Department "Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics", FGBOU VO "DVGUPS"

Received 27.07.2021

Accepted 30.08.2021

For citation: Kulinich Yu. M., Shukharev S. A., Gulyaev A. V. Increasing the energy efficiency of auxiliary machines of AC electric locomotive // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (5): 276–284 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-276-284>.

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.