

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.423 + 06

doi: 10.30987/2782-5957-2024-5-40-49

СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОВОЗА

Дмитрий Викторович Ольховатов¹, Николай Вячеславович Гребенников², Анастасия Владимировна Шевкунова^{3✉}

^{1,2,3} Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

¹ dm@olkh.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3723-5375>

² grebennikovnv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5959-2547>

³ nastya3051990@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5508-8367>

Аннотация

Цель исследования заключается в повышении надежности и энергоэффективности работы электропривода компрессора электровоза. Для ее достижения был выполнен расчет необходимой мощности электродвигателя, произведена проверка производительности компрессорной установки, объема главных резервуаров и выбранного электродвигателя по пусковой и регулировочной способности при пониженном напряжении питания.

Задача, решению которой посвящена статья заключается в построении электропривода мотор компрессора. Была построена векторная модель асинхронного двигателя. Смоделирован процесс прямого пуска и процесс пуска асинхронного электродвигателя с применением скалярной системы управления и IR-компенсации.

Методы исследования: системный подход; положения теории автоматического управления и электротехники; численное моделирование на ПЭВМ с использованием программного комплекса Matlab.

Новизна работы заключается в применении частотно-регулируемого электропривода для пуска

асинхронного электродвигателя компрессорной установки вместо штатно устанавливаемых пусковых конденсаторов. Данное схемотехническое решение позволит значительно снизить амплитуду пусковых токов, что в свою очередь, уменьшит износ изоляции обмоток.

Результаты исследования приведены, по результатам построенных моделей, в качестве графиков зависимостей скорости и тока при прямом пуске электродвигателя и с системой управления.

Выводы: скалярная система управления благодаря введению задатчика интенсивности, а также схемы IR-компенсации позволяет продлить время переходного процесса и контролировать величину пускового тока в допустимых значениях. Подобный подход к построению электропривода мотор компрессора способен в значительной степени повысить его надежности и срок службы, а также повысить общую энергоэффективность системы.

Ключевые слова: электровоз, машины, компрессорная установка, электропривод, система, управление, схема IR-компенсации.

Ссылка для цитирования:

Ольховатов Д.В. Синтез электропривода компрессорной установки электровоза / Д.В. Ольховатов, Н.В. Гребенников, А.В. Шевкунова // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 5. – С. 40-49. doi: 10.30987/2782-5957-2024-5-40-49.

Original article

Open Access Article

SYNTHESIS OF AN ELECTRIC COMPRESSOR DRIVE OF AN ELECTRIC LOCOMOTIVE

Dmitry Viktorovich Olkhovатов¹, Nikolay Vyacheslavovich Grebennikov², Anastasia Vladimirovna Shevkunova^{3✉}

^{1,2,3} Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

¹ dm@olkh.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3723-5375>

² grebennikovnv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5959-2547>

³ nastya3051990@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5508-8367>

Abstract

The study objective is to improve the reliability and energy efficiency of the electric locomotive compressor drive. To achieve this, the required power of the electric motor was calculated the performance of the compressor unit, the volume of the main tanks and the selected electric motor were checked to start and adjust the capacity at low supply voltage.

The task to which the paper is devoted is to design an electric drive for a compressor motor. A vector model of an asynchronous motor was made. The process of direct start-up and starting an asynchronous electric motor with the use of a scalar control system and IR compensation were modeled.

Research methods: systematic approach; provisions of the theory of automatic control and electrical engineering; numerical PC simulation using Matlab software package.

The novelty of the work is in the use of a frequency-controlled electric drive to start the asynchronous electric motor of the compressor unit instead of

the normally installed starting capacitors. This design solution will significantly reduce the amplitude of the starting currents, which in turn will reduce the wear of the winding insulation.

The study results are presented, based on the results of the constructed models, as graphs of the dependencies of speed and current during direct start of the electric motor and with the control system.

Conclusions: the scalar control system, thanks to the introduction of an intensity setter, as well as IR compensation diagram, allow extending the transition time and controlling the value of the inrush current in acceptable values. Such an approach to make an electric drive compressor motor is able to significantly increase its reliability and service life, as well as to increase the overall energy efficiency of the system.

Keywords: electric locomotive, machines, compressor unit, electric drive, system, control, IR compensation diagram.

Reference for citing:

Olkhovatov DV, Grebennikov NV, Shevkunova AV. Synthesis of an electric compressor drive of an electric locomotive. *Transport Engineering*. 2024;5:40-49. doi: 10.30987/2782-5957-2024-5-40-49.

Введение

На тяговом подвижном составе (ТПС), в зависимости от назначения, электрические машины подразделяются на тяговые и вспомогательные [1]. Последние, в свою очередь, зачастую представлены электрическими машинами асинхронного типа. Наибольшее распространение на ТПС получили асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором [2–5]. Данное обстоятельство объясняется простотой конструкции, высокой надежностью и ремонтпригодностью. Как и все технические объекты, АД имеет свои недостатки, такие как высокое значение пускового тока, электродинамические воздействия, действующие на активные части и т.п. Известно, что пусковые токи оказывают негативное влияние на колебания напряжения в питающей сети и на каче-

ство электрической энергии, получаемой электровозом. В итоге данные факторы приводят к снижению срока службы электродвигателя и приводного механизма.

Согласно статистическим данным [6, 7] на асинхронные вспомогательные машины (АВМ) электровозов приходится более 12 % отказов, из которых доминирующая доля – это неисправности электродвигателей мотор-компрессоров (МК). Поэтому разработка надежного электропривода мотор-компрессора является актуальной задачей.

Целью данной работы является моделирование процесса прямого пуска и пуска асинхронного электродвигателя привода компрессора с применением скалярной системы управления и IR-компенсации.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Компрессорная установка электровоза – это система, отвечающая за обеспечение поезда сжатым воздухом. Для АД привода компрессора присущ повторно-кратковременный режим работы, характеризующийся частыми пусками и нагрузкой пульсирующего типа. По необходимой производительности компрессора рассчи-

таем параметры электродвигателя привода [4, 8]. Требуемая производительность компрессорной установки и объем главного резервуара определены на основе зависимостей:

$$Q_{\text{ком}} = \mu \frac{Q_{\text{общ}}}{70}, \quad (1)$$

$$V_{\text{гр}} = \frac{\Delta P_{\text{м}} V_{\text{м}} u_i}{\Delta P_{\text{гр}}}. \quad (2)$$

где $Q_{\text{общ}}$ – общий часовой расход воздуха, $\text{м}^3/\text{мин}$; μ – коэффициент, учитывающий остановки компрессора для охлаждения; ΔP_M – глубина разрядки тормозной магистрали при экстренном торможении, МПа; V_M – объем тормозной магистрали вагона, м^3 ; $\Delta P_{\text{гр}}$ – допустимый перепад давления воздуха в главном резервуаре при экстренном торможении, МПа; u_i – количество вагонов одинаковой осности в составе.

В результате расчета требуемая производительность компрессорной установки составила $Q_{\text{ком}} = 3 \text{ м}^3/\text{мин}$, а требуемый объем главного резервуара $V_{\text{гр}} = 0,96 \text{ м}^3$.

Далее проведем проверку производительности компрессорной установки и объема главных резервуаров. Ее особенность заключается в расчетах для случаев отпуска и зарядки тормозов с учетом подзарядки запасного резервуара за определенное время ($t_{\text{от}} = 4 \text{ мин}$) после полного служебного торможения (ПСТ) и после экстренного торможения (ЭТ) для длинно-составных поездов ($t_{\text{от}} = 5 \text{ мин}$). При PST составило $Q'_{\text{ком}} = 2,79 \text{ м}^3/\text{мин}$, при ЭТ – $Q'_{\text{ком}} = 1,84 \text{ м}^3/\text{мин}$. Данные значения удовлетворяют условию $Q'_{\text{ком}} < Q_{\text{ком}}$, где $Q_{\text{ком}} = 3,5 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Исходя из производительности и специфики работы мотор-компрессора расчетная номинальная мощность асинхронного двигателя (АД) определяется зависимостью:

$$P_{\text{номр}} = \frac{P_{\text{номд}} \lambda a_{\text{мин}}}{K_n^2 \lambda_{\text{ном}}} \quad (3)$$

где $P_{\text{номд}}$ – номинальная мощность электродвигателя при номинальном токе, кВт; $\lambda_{\text{мин}}$ – наименьшая необходимая перегрузочная способность электродвигателя в условиях работы на подвижном составе; $\lambda_{\text{ном}}$ – номинальная перегрузочная способность электродвигателя при номинальных условиях работы; K_n – просадка напряжения.

По необходимой мощности $P_{\text{номр}}$ выбран асинхронный двигатель типа НВА-55 ($P_{\text{ном}} = 55 \text{ кВт}$).

Согласно известной методике [4, 8] была произведена проверка выбранного электродвигателя по пусковой и перегрузочной способности при пониженном напряжении питания. Двигатель имеет запас мощности по пуску $K_{\text{п}} = 1,52$, что поз-

воляет запустить компрессор при нормальных и критических условиях.

Широкое распространение для пуска вспомогательных АД на электровагонах получила конденсаторная схема, вследствие определенных преимуществ, таких как компактность и отсутствие активного сопротивления. Однако, основным минусом является значительный нагрев электродвигателя и низкое значение пускового момента.

Ввиду данных обстоятельств, авторами предлагается в качестве пускового устройства АД для привода компрессора выбрать частотный преобразователь (ПЧ), в силу его неоспоримых преимуществ по сравнению с конденсаторной схемой [9, 10]: возможность регулирования скорости и момента; ограничение пусковых токов дает возможность задавать время разгона и торможения; отключение установки при возникновении аварийных режимов работы и др.

Рассмотрев различные варианты управления скоростью АД, для которого приводным агрегатом является компрессор электровагона, авторы считают, что наиболее предпочтительной является частотно-параметрическая система управления. Электроприводы с данным типом управления нашли свое применение в установках, для которых характерен продолжительный режим с постоянной (медленно изменяющейся) нагрузкой.

Базируясь на уравнениях переходных процессов АД [8], строится схема замещения (рис. 1) одной фазы АД, учитывая регулирование в широком диапазоне частоты и напряжения.

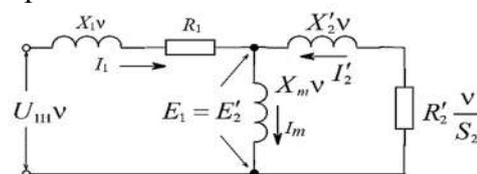


Рис. 1. Схема замещения фазы АД при частотном регулировании скорости

Fig. 1. Phase replacement circuit of an asynchronous motor with frequency speed control

Индуктивные сопротивления на схеме аналогичны номинальной частоте статора:

$$x_1 = \omega_{1H} L_{1\sigma}, x_2' = \omega_{1H} L_{2\sigma}, x_m = \omega_{1H} L_m, \quad (4)$$

где $\omega_{1H} = 2\pi f_{1H}$.

Посредством представленной схемы замещения устанавливаются базовые соотношения координат и параметров АД. Через них можно определить более рациональные способы частотного регулирования. К таким соотношениям относятся зависимости электродвижущей силы E_1 , магнитного потока в воздушном зазоре Φ , тока статора I_1 , тока ротора I_2 , тока намаг-

ничивания I_m и электромагнитного момента двигателя M от параметров схемы замещения и регулируемых параметров $v = f_1/f_{1m}$ и $\gamma = U_1/U_{1H}$, где v – относительная частота питающего двигателя напряжения; γ – относительная амплитуда этого напряжения; S_2 – абсолютное скольжение двигателя. Основные соотношения координат и параметров АД в общем виде выражаются формулами.

$$\left. \begin{aligned} E_1 = E_2' &= U_{1H} \gamma v \sqrt{\frac{B(S_2)}{A(v, S_2)}}; & \Phi &= \frac{U_{1H} \gamma}{c_1 f_{1H}} \sqrt{\frac{B(S_2)}{A(v, S_2)}}; \\ I_1 &= U_{1H} \gamma \sqrt{\frac{C(S_2)}{A(v, S_2)}}; & I_2' &= U_{1H} \gamma \frac{S_2}{\sqrt{A(v, S_2)}}; \\ I_m &= U_{1H} \gamma \sqrt{\frac{D(S_2)}{A(v, S_2)}}; & M &= \frac{3U_{1H}^2}{\omega_{1H}} \gamma^2 \frac{R_2' S_2}{A(v, S_2)}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В формулах (1) приняты следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} A(v, S_2) &= (b^2 + c^2 v^2) S_2^2 + 2R_1 R_2' v_1 S_2 + (d^2 + e^2 v^2) R_i^2; \\ B(S_2) &= R_2'^2 + x_2^2 S_2; & D(S_2) &= \frac{R_2'^2}{x_m^2} + k_{\sigma 2}^2 S_2^2; \\ C(S_2) &= \frac{R_2'^2}{x_m^2} + (1 + k_{\sigma 2})^2 S_2^2; & b &= R_1(1 + k_{\sigma 2}); \\ c &= x_m k_{\sigma}; & d &= \frac{R_1}{x_m}; & e &= 1 + k_{\sigma 1}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где c_1 – конструктивная постоянная двигателя; $k_{\sigma 1}, k_{\sigma 2}, k_{\sigma}$ – коэффициенты рассеяния соответственно статора $k_{\sigma 1} = x_1/x_m$, ротора $k_{\sigma 2} = x_2'/x_{m2}$ и общий $k_{\sigma} = k_{\sigma 1} + k_{\sigma 2} + k_{\sigma 1} k_{\sigma 2}$.

Представленные в общем виде координаты АД – функции параметров схемы замещения и регулируемых координат γ, v, S_2 – абсолютного скольжения. Они не создают однозначности в формировании алгоритмов управления. Если обеспечить стабилизацию, например, магнитного потока Φ или тока статора I_1 , то все остальные координаты однозначно выражаются через абсолютное скольжение S_2 .

Используя соотношения координат и параметров двигателя, полученных из схемы замещения АД [8], можно с учетом необходимости постоянства перегрузочной способности двигателя, найти зависимость $\gamma = \varphi(v)$, т.е. закон частотного регулирования. Опуская промежуточные выкладки, приведем окончательную формулу

$$\gamma = \sqrt{\frac{R_1 v \pm \sqrt{(b^2 + c^2 v^2)(d^2 + e^2 v^2)}}{R_1 \pm \sqrt{(b^2 + c^2 v^2)(d^2 + e^2 v^2)}}} = F(v) \quad (7)$$

Согласно закону частотного регулирования стабильность величины критического момента АД при уменьшении частоты требуется величину напряжения уменьшать в меньшей мере, нежели значение частоты. В то же время следует помнить, что при большом снижении частоты стабильность значения критического момента АД создается при увеличении тока намагничивания и магнитного потока. Постоянство потока двигателя обеспечивается до значения $v = 0,2 \dots 0,3$. В этом случае диапазон регулирования скорости АД составляет примерно 3...5 при постоянстве перегрузочной способности двигателя.

Различие между зависимостью $\gamma = F(v)$ и законом частотного регулирования вызвано тем, что при выводе формулы

$$\frac{U_1}{U_{1H}} = \frac{f_1}{f_{1H}} \text{ или } \frac{U_1}{f_1} = \text{const} \quad (8)$$

пренебрегли влиянием активного сопротивления статора R_1 . Поэтому при практической реализации с помощью функционального преобразователя (ФП) реализуют зависимость (8), но вводят компенсацию

падения напряжения $I_1 R_1$, измеряя ток статора с помощью датчика тока (ДТ). Функциональная схема частотного регулирования с IR – компенсацией приведена на рис. 2.

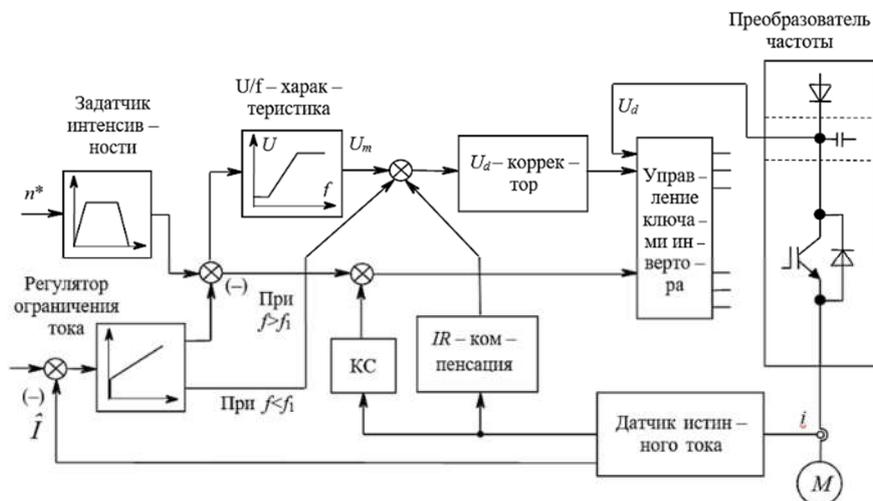


Рис. 2. Функциональная схема скалярной системы без обратной связи по скорости
 Fig. 2. Functional diagram of a scalar system without speed feedback

Задающее напряжение U_{zc} подается на вход задатчика интенсивности (ЗИ). Выходное напряжение ЗИ U_f определяет скорость изменения частоты преобразователя частоты. Это же напряжение поступает на вход ФП. Выходное напряжение ФП является задающим для контура регулирования напряжения. Сигнал ДТ поступает на блок IR -компенсации, на блок компенсации скольжения (КС) и на регулятор токоограничения (РТО).

Выходной сигнал блока КС, пропорциональный току статора АД, повышает напряжение U_f , а, следовательно, частоту напряжения статора f_1 . Повышение частоты f_1 не велико и находится в пределах скольжения, что позволяет повысить точность поддержания скорости двигателя по отношению заданного значения.

Регулятор токоограничения представляет собой ПИ-регулятор, имеющий два выхода. Первый выход работает, если частота вращения двигателя меньше частоты напряжения статора f_1 (т.е. двигатель работает в двигательном режиме). При этом сигнал с РТО уменьшает напряжение на двигателе для уменьшения тока статора.

Второй выход РТО включается, если частота вращения двигателя превышает

частоту выходного напряжения преобразователя частоты (т.е. двигатель работает в режиме генераторного торможения). В этом случае сигнал с выхода РТО увеличивает напряжение, управляющее частотой преобразователя. Возрастание частоты напряжения приводит к уменьшению тока статора.

В модели использована векторная модель асинхронного двигателя в базовых векторах \bar{i}_1 и $\bar{\Psi}_2$. Питание двухфазной модели двигателя производится от управляемого генератора напряжения, который по каналу F управляет частотой выходного напряжения, а по каналу A – амплитудой этого напряжения. С помощью функционального преобразователя ФП реализован табличным способом закон частотного регулирования. Задатчик интенсивности определяет темп пуска и торможения двигателя. На модели присутствуют элементы стабилизации скорости и ограничения тока статора.

Модель асинхронного двигателя в неподвижной системе координат выполнена с опорными векторами \bar{i}_1 и $\bar{\Psi}_2$, определяющими электромагнитный момент двигателя в виде векторного произведения представлена на рис. 3.

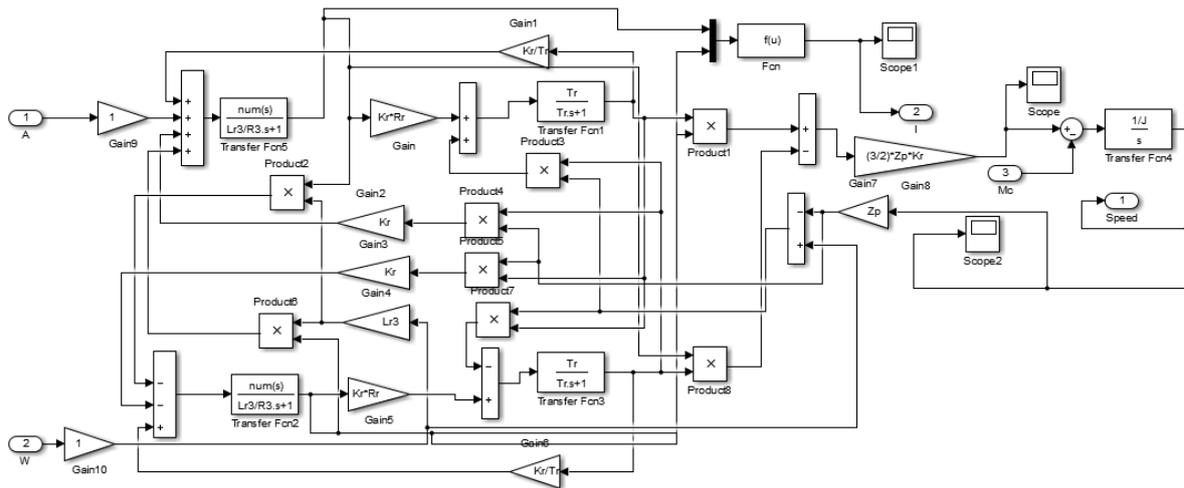


Рис. 3. Модель асинхронного электродвигателя во вращающийся системе координат
 Fig. 3. Model of an asynchronous electric motor in a rotating coordinate system

Построение имитационной модели выполнялось в пакете программ *Matlab* [11, 12], являющемся мощным специализированным инструментом для моделиро-

вания различных электротехнических систем.

Уравнения модели АД в неподвижных осях $\alpha - \beta$ выглядят следующим образом

$$\left. \begin{aligned}
 i_{1\alpha} &= \frac{1}{R_1'(1+T_1'p)} \left(U_{1\alpha} + \frac{K_2}{T_2} \Psi_{2\alpha} - \omega \Psi_{2\beta} K_2 \right), \\
 i_{1\beta} &= \frac{1}{R_1'(1+T_1'p)} \left(\frac{K_2}{T_2} \Psi_{2\beta} + \omega \Psi_{2\alpha} K_2 + U_{1\beta} \right), \\
 \Psi_{2\alpha} &= \frac{T_2}{1+T_2p} (K_2 R_2 i_{1\alpha} + \omega \Psi_{2\beta}), \\
 \Psi_{2\beta} &= \frac{T_2}{1+T_2p} (K_2 R_2 i_{1\beta} + \omega \Psi_{2\alpha}), \\
 M &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\Psi_{2\alpha} i_{1\beta} - \Psi_{2\beta} i_{1\alpha}), \\
 M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt}.
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$, $U_{1\alpha}$, $U_{1\beta}$, $\Psi_{2\alpha}$, $\Psi_{2\beta}$ – проекции обобщённых векторов тока и напряжения статора, а также потокосцепления ротора на оси α и β ; T_2 – электромагнитная постоянная времени ротора; p_n – число пар полюсов; M – электромагнитный момент; M_c – момент сопротивления, приведенный к валу; J – момент инерции; ω – частота вращения ротора, $k_2 = L_m/L_2$, где L_m – индуктивность намагничивающего контура, L_2 – полную индуктивность обмотки ротора; $T_1' = L_1'/R_1'$, где $L_1' = L_1 - L_m^2/L_2$, R_1 – активное сопротивление статора, L_1 – пол-

ную индуктивность обмотки статора; $R_1' = k_2^2 R_2 + R_1$, где R_2 – активное сопротивление ротора.

По итогам произведенного расчета параметров структурной схемы АД типа НВА-55, согласно вышеприведенным уравнениям, были получены следующие результаты значения для ввода в модель, приведенные в таблице.

На рис. 4 изображена модель прямого пуска АД. На рис. 5 изображена модель скалярной системы управления АД без обратной связи по скорости.

Calculated values for input into the asynchronous motor model

Параметр модели	Размерность	Величина
k_2		0,96584
L_1'	Гн	0,0007889
T_2	с	0,1299
R''	Ом	0,1245
T'''	с	0,006337
$1/R''$	1/Ом	8,031
$k_2 R_2$	Ом	0,084511
k_2/T_2	1/с	7,4351
$\frac{3}{2} p_n k_2$		2,3
$1/J$	1/кг·м ²	0,2

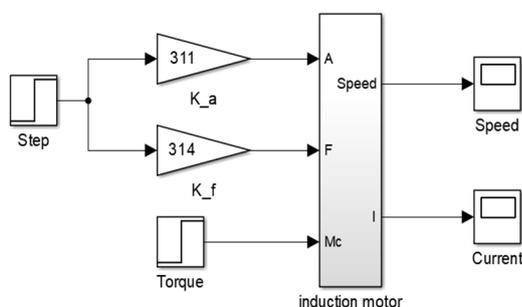


Рис. 4. Модель прямого пуска асинхронного двигателя

Fig. 4. Direct start model of an asynchronous motor

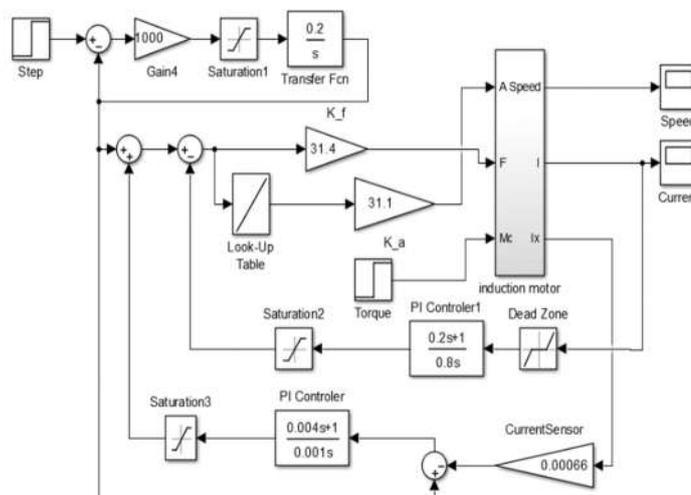
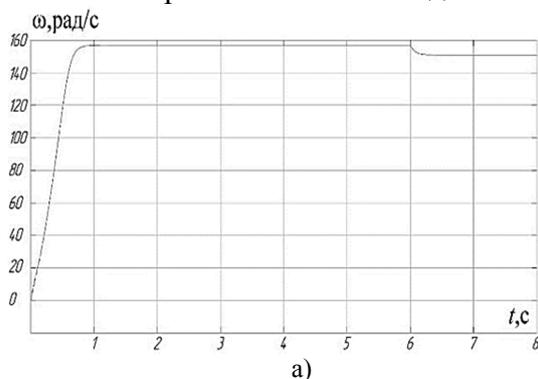


Рис. 5. Модель скалярной системы управления асинхронным двигателем без обратной связи по скорости

Fig. 5. A model of a scalar asynchronous motor control system without speed feedback

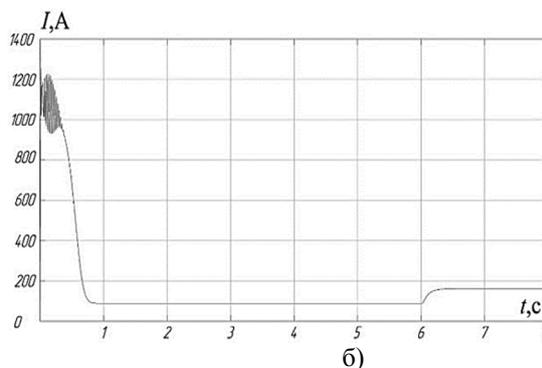
Результаты

На рис. 6 а,б представлены графики скорости и тока АД при пуске на холостом ходу. В момент времени 6 с на вал двига-



а)

теля подается статический момент равный номинальному.



б)

Рис. 6. График скорости а - и тока б - асинхронного двигателя при прямом пуске на холостом ходу
Fig. 6. Graph of the speed (a) and current (b) of the asynchronous motor during direct start at idle

На рис. 7 а, б представлены графики скорости и тока АД при пуске под нагруз-

кой. В начальный момент времени на вал двигателя подается статический момент

равный номинальному. Данный режим нагрузки более адекватно описывает процесс протекающие в приводе компрессора.

На рис. 8 а, б представлены графики скорости и тока системы управления асинхронного двигателя при пуске на холостом ходу. В момент времени 6 с на вал двига-

теля подается статический момент равный номинальному. На рис. 9 а, б представлены графики скорости и тока системы управления асинхронного двигателя при пуске под нагрузкой. В начальный момент времени на вал двигателя подается статический момент равный номинальному.

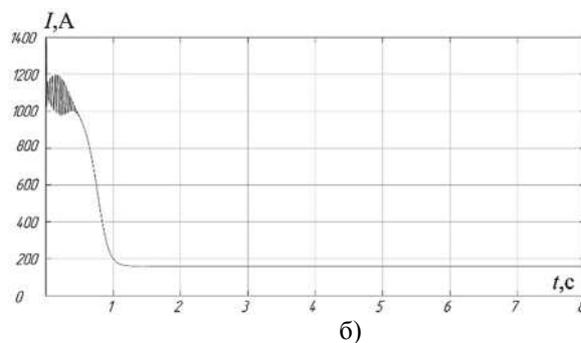
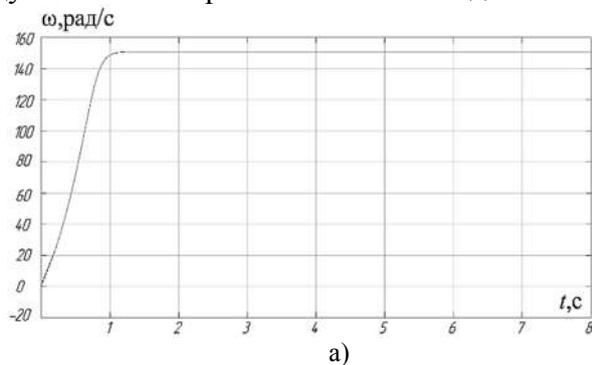


Рис. 7. График скорости а - и тока б - асинхронного двигателя при прямом пуске под нагрузкой
 Fig. 7. Graph of the speed (a) and current (b) of an asynchronous motor during direct start under load

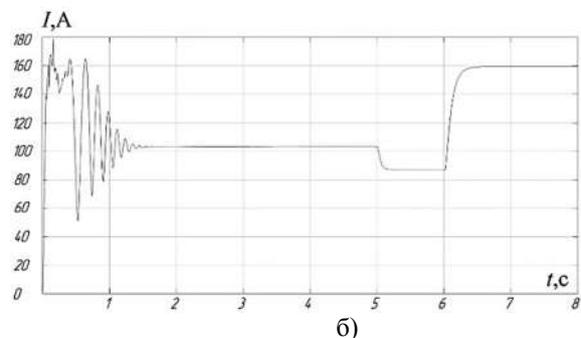
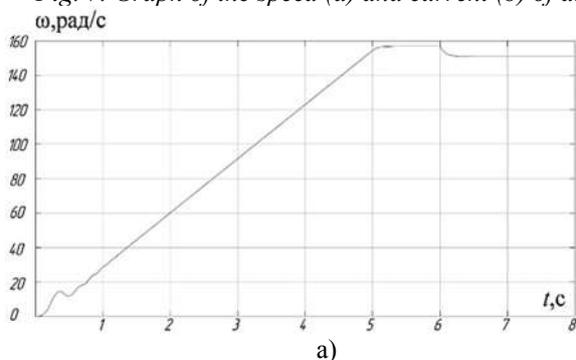


Рис. 8. График скорости (а) и тока (б) асинхронного двигателя с системой управления на холостом ходу
 Fig. 8. Graph of the speed (a) and current (b) of an asynchronous motor with an idling control system

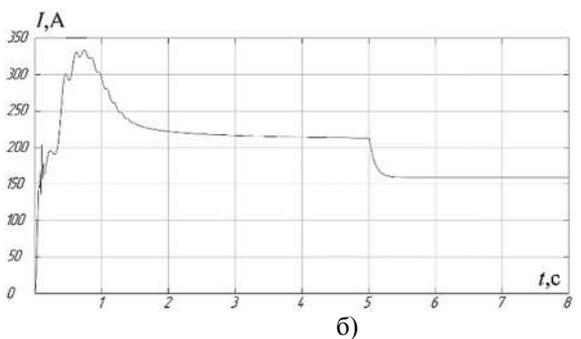
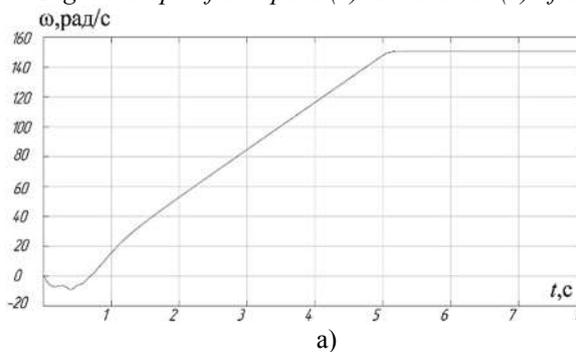


Рис. 9. График скорости а - и тока б - асинхронного двигателя с системой управления под нагрузкой
 Fig. 9. Graph of the speed (a) and current (b) of an asynchronous motor with a load control system

Заключение

В результате анализа проведенного исследования можно сделать выводы, что скалярная система управления благодаря введению задатчика интенсивности, а также схемы IR-компенсации позволяет продлить время переходного процесса и контролировать величину пускового тока в допустимых значениях. Отсутствие датчика скорости, который часто применяется в

других замкнутых системах управления, позволяют снизить итоговую стоимость данного технического решения. Подобный подход к построению электропривода мотор компрессора способен в значительной степени повысить его надежность и срок службы, а также увеличить общую энергоэффективность системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Космодамианский, А.С. Тяговый и вспомогательный привод локомотивов с асинхронными двигателями / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Локомотив. 2019. № 3 (747). С. 30-34.
2. Ольховатов, Д.В. Разработка энергоэффективного асинхронного электропривода мотор-вентилятора электровоза / Д.В. Ольховатов, А.В. Шевкунова // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2023. № 3 (59). С. 46-55.
3. Ольховатов, Д.В. Синтез электропривода вентилятора для охлаждения тяговых электродвигателей / Д.В. Ольховатов, А.В. Шевкунова, А.В. Донченко // Приводы и компоненты машин. 2023. № 1-3 (40). С. 6-10.
4. Анализ энергетической эффективности асинхронного электропривода электровозов / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченок, Л.А. Астраханцев, В.В. Немыкина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. №1 (65). С. 101-111.
5. Андриященко, А.А. Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом / А.А. Андриященко, А.А. Зарифьян, П.Г. Колпахчян // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2015. №4 (45). С. 5-14.
6. Выжимова, В.Н. Комплексная оценка факторов, влияющих на надежность асинхронных вспомогательных машин электровозов переменного тока, определение основных причин отказов / В.Н. Выжимова. – Текст : электронный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. №3 (39). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnaya-otsenka-faktorov-vliyayuschih-na-nadezhnost-asinhronnyh-vspomogatelnyh-mashin-elektrovozov-peremennogo-toka-opredelenie> (дата обращения: 05.04.2024).
7. Васильев, А.А. Анализ надежности вспомогательных электрических машин электропоездов Восточно-Сибирского региона / А.А. Васильев. – Текст : электронный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. №2 (46). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-nadezhnosti-vspomogatelnyh-elektricheskikh-mashin-elektropoezdov-vostochno-sibirskogo-regiona> (дата обращения: 05.04.2024).
8. Иванов, П.Ю. Повышение эксплуатационной надежности асинхронных вспомогательных машин магистральных электровозов переменного тока : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Иванов Павел Юрьевич ; Иркутский государственный университет путей сообщения ИрГУПС (ИрИИТ). Иркутск, 2015. 198 с. Библиогр.: с. 180-194.
9. Афлятунов, И.Ф. Асинхронный электропривод с конденсаторным пуско-компенсирующим устройством : 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Афлятунов Ильдар Фаатович ; Ульяновский государственный технический университет. Ульяновск, 2016. –181 с. Библиогр.: С. 166-180.
10. Достоинства и недостатки современных устройств плавного пуска электродвигателей / А.В. Масенко, В.А. Скворцов, Н.И. Сбитнева, В.А. Щebetеев // Проблемы научной мысли. 2019. Т. 1, № 3. С. 59-65.
11. Еремочкин, С.Ю. Разработка и исследование имитационной модели асинхронного электропривода с однофазным частотным регулятором скорости / С.Ю. Еремочкин, А.А. Жуков, Д.В. Дорохов. – Текст : электронный // Вестник НГИ-ЭИ. 2021. №11 (126). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-issledovanie-imitatsionnoy-modeli-asinhronnogo-elektroprivoda-s-odnofaznym-chastotnym-regulyatorom-skorosti> (дата обращения: 07.04.2024).
12. Марченко, А.А. Исследование механических характеристик асинхронного электродвигателя в режиме генераторного торможения / А.А. Марченко, С.В. Столетов. – Текст : электронный // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития. 2022. №IV. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-mehnicheskikh-harakteristik-asinhronnogo-elektrodvigatelya-v-rezhime-generatornogo-tormozheniya> (дата обращения: 07.04.2024).

REFERENCES

1. Kosmodamiansky AS, Vorobyov VI, Pugachev AA. Traction and auxiliary drive of locomotives with asynchronous motors. Lokomotiv. 2019;3(747):30-34.
2. Olkhovатов, DV, Shevkunova AV. Development of the energy-efficient asynchronous electric drive of a locomotive blower motor. Herald of the Ural State University of Railway Transport. 2023;3(59):46-55.
3. Olkhovатов DV, Shevkunova AV, Donchenko AV. Synthesis of an electric fan drive for cooling traction electric motors. Machine Drives and Parts. 2023;1-3(40):6-10.
4. Alekseeva T L, Ryabchenok NL, Astrakhantsev LA, Nemykina VV. The analysis of energy efficiency of asynchronous electric drive of electric locomotives. Modern Technologies. System Analysis. Modeling. 2020;1(65):101-111.
5. Andryushchenko AA, Zarifyan AA, Kolpakhchyan PG. Increasing energy efficiency of electric passenger locomotives with asynchronous locomotive driving

- unit. Proceedings of Petersburg Transport University. 2015;4(45):5-14.
6. Vyzhimova, VN. Comprehensive assessment of factors affecting the reliability of asynchronous auxiliary machines of AC electric locomotives, determination of the main causes of failures [Internet]. Modern Technologies. System Analysis. Modeling. 2013;3(39) [cited 2024 Apr 05]. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnaya-otsenka-faktorov-vliyayuschih-na-nadezhnost-asinhronnyh-vspomogatelnyh-mashin-elektrovozov-peremennogo-toka-opredelenie>.
 7. Vasiliev AA. Reliability analysis of auxiliary electric machines of electric trains of the East Siberian region [Internet]. Modern Technologies. System Analysis. Modeling. 2015;2(46) [cited 2024 Apr 05]. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-nadezhnosti-vspomogatelnyh-elektricheskikh-mashin-elektropoezdov-vostochno-sibirskogo-regiona>.
 8. Ivanov PYu. Improving the operational reliability of asynchronous auxiliary machines of mainline electric locomotives of alternating current [dissertation]. [Irkutsk (RF)]: Irkutsk State Transport University; 2015.
 9. Aflyatunov IF. Asynchronous electric drive with capacitor start-up compensating device [dissertation].

[Ulyanovsk (RF)]: Ulyanovsk State Technical University; 2016.

10. Masenko AV, Skvortsov VA, Sbitneva NI, Shchebetev VA. Advantages and disadvantages of modern soft-start devices for electric motors. Problemi Nauchnoi Mysli. 2019;1(3):59-65.
11. Eremochkin SYu, Zhukov AA, Dorokhov DV. Development and research of a simulation model of an asynchronous electric drive with a single-phase frequency speed controller [Internet]. Bulletin of NGIEL. 2021;11(126) [cited 2024 Apr 07]. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-issledovanie-imitatsionnoy-modeli-asinhronnogo-elektroprivoda-s-odnofaznym-chastotnym-regulyatorom-skorosti>.
12. Marchenko AA, Stoletov SV. Study of the mechanical characteristics of an asynchronous electric motor in the mode of generator braking [Internet]. Technical Operation of Water Transport: Problems and Ways of Development. 2022;4 [cited 2024 Apr 07]. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-mehanichestikh-harakteristik-asinhronnogo-elektroprivoda-v-rezhime-generatornogo-tormozheniya>.

Информация об авторах:

Ольховатов Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» ФГБОУ ВО РГУПС, тел. 8-952-572-90-62.

Гребенников Николай Вячеславович – доктор технических наук, доцент кафедры «Тяговый по-

Olkhovatov Dmitry Viktorovich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Traction Rolling Stock at RSTU; phone: 8-952-572-90-62.

Grebennikov Nikolay Vyacheslavovich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the De-

движной состав» ФГБОУ ВО РГУПС, тел. 8-951-490-17-54.

Шевкунова Анастасия Владимировна – доцент, кандидат технических наук, 8-928-194-88-39, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» ФГБОУ ВО РГУПС.

partment of Traction Rolling Stock at RSTU; phone: 8-951-490-17-54.

Shevkunova Anastasia Vladimirovna - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Traction Rolling Stock at RSTU; phone: 8-928-194-88-39.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 02.04.2024; одобрена после рецензирования 15.04.2024; принята к публикации 26.04.2024. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 02.04.2024; approved after review on 15.04.2024; accepted for publication on 26.04.2024. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.