

УДК 621.31,004.94

ББК 31.2

Г.А. ФАЛЬКОВ, С.А. ПОПОВ, А.С. ГОРЛОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА РУДНИЧНОЙ СЕТИ

Ключевые слова: система управления, электропривод, качество электроэнергии, MATLAB Simulink, моделирование системы управления, математическое моделирование, имитационное моделирование.

Разработка системы управления для электропривода рудничной сети – перспективная область исследований, которая позволяет осуществлять точный контроль над параметрами работы электропривода (скорость движения подъемного сосуда, усилие грузовой лебедки, ток возбуждения).

Цель исследования – создание модели динамических процессов электропривода для изучения функционирования скиповой подъемной установки в условиях рудничной сети.

Материалы и методы. Моделирование динамических процессов в электроприводе подъемной установки при движении подъемного сосуда по заданной тахограмме производилось в среде MATLAB. Были использованы методы математического моделирования для изучения поведения системы управления электропривода при заданных параметрах настройки контуров регулирования, а также перенастройки контуров для получения требуемых переходных процессов. Моделирование проводилось с учетом допущения, что все элементы модели представляются соответствующими передаточными функциями.

Результаты. Произведены расчет и настройка основных передаточных функций регулятора тока возбуждения, тока якорной цепи, регулирование скорости электропривода. Выполнено сравнение результатов экспериментального измерения и моделирования в программном пакете MATLAB.

Выводы. В рамках исследования проведено моделирование динамических процессов электропривода подъемной установки рудничной сети в программном пакете MATLAB и разработана система управления, которая позволяет контролировать работу электропривода постоянного тока.

Введение. В современной рудничной сети электроприводы постоянного тока играют ключевую роль в автоматизации и управлении различными механизмами и системами. Разработка эффективных систем управления для таких приводов становится все более важной задачей с целью повышения производительности, энергоэффективности и надежности технических устройств. Системы управления представляют собой эффективный инструмент для реализации различных алгоритмов управления, обеспечивая точное и гибкое регулирование работы электроприводов рудничной сети [2].

В данной работе рассматривается разработка системы управления для электропривода постоянного тока рудничной сети с использованием среды MATLAB [1]. Это представляет собой актуальную задачу в контексте современных требований к эффективности и гибкости управления техническими системами. Использование MATLAB обеспечивает широкие возможности для моделирования, анализа и реализации различных алгоритмов управления, что делает эту среду предпочтительным выбором для разработки и отладки систем управления [4, 6].

На рис. 3 представлена используемая в исследовании структурная схема контура регулирования тока возбуждения. Регулятор тока возбуждения настраивался на модульный оптимум, с параметром настройки $a_T = 2$.

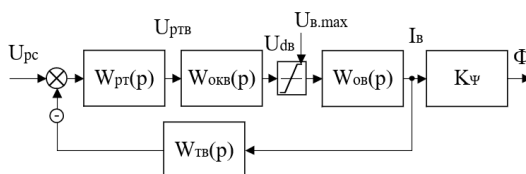


Рис. 3. Структурная схема контура регулирования тока возбуждения

Передаточные функции обмотки возбуждения ($W_{ов}(p)$), тиристорного возбудителя ($W_{тв}(p)$), обратной связи в контуре возбуждения ($W_{овк}(p)$), регулятора тока возбуждения ($W_{рт}(p)$) определялись по следующим формулам:

$$W_{ов}(p) = \frac{1}{r_b p + 1}; W_{тв}(p) = \frac{K_{тв}}{T'_{\mu b} p + 1};$$

$$W_{овк}(p) = \frac{K_{тпв}}{T_{фв} p + 1}; W_{рт}(p) = \frac{r_b (T_b p + 1)}{a_T K_{тв} K_{тпв} T'_{\mu b} p},$$

где r_b – сопротивление обмотки возбуждения двигателя; T_b – постоянная времени цепи возбуждения; $K_{тв}$ – передаточный коэффициент тиристорного возбудителя; $T'_{\mu b}$ – постоянная времени контура тока возбуждения; $K_{тпв}$ – передаточный коэффициент обратной связи; $T_{фв}$ – постоянная времени фильтра.

На рис. 4 представлена структурная схема контура регулирования тока якорной цепи.

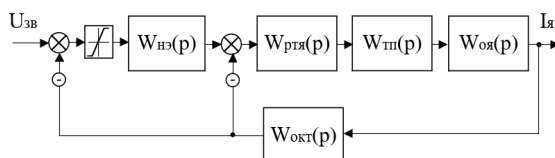


Рис. 4. Структурная схема контура регулирования тока якорной цепи

Передаточные функции тиристорного преобразователя ($W_{тп}(p)$), обратной связи в контуре тока якоря ($W_{окт}(p)$), обмотки якоря ($W_{оя}(p)$), нелинейного элемента ($W_{нэ}(p)$), регулятора тока якоря ($W_{оя}(p)$) определялись соответственно по формулам:

$$W_{тп}(p) = \frac{K_{тп}}{T_я p + 1}; W_{окт}(p) = \frac{K_T}{T_{фТ} p + 1}; W_{оя}(p) = \frac{1/R_я}{T_я p + 1};$$

$$W_{ртя}(p) = \frac{T_я p + 1}{a_T T'_{\mu} \frac{K_{тп} K_T}{R_я} p}; W_{нэ}(p) = \frac{1}{T_{и} p},$$

где $K_{тп}$ – передаточный коэффициент тиристорного преобразователя; $T_я$ – постоянная времени якорной цепи; K_T – передаточный коэффициент обратной связи

по току; $T_{фт}$ – постоянная времени фильтра на входе датчика тока; $R_я$ – суммарное активное сопротивление якорной цепи двигателя; $T_я$ – постоянная времени якоря; $\alpha_T = 2$ – параметр настройки регулятора тока; T'_μ – электромагнитная постоянная времени якорной цепи; $T_{ин}$ – постоянная времени интегратора.

На рис. 5 представлена структурная схема контура регулирования скорости.

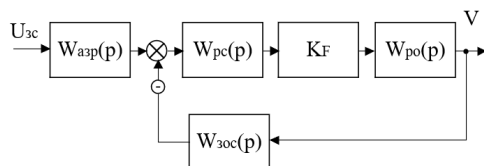


Рис. 5. Структурная схема контура регулирования скорости

Передаточные функции звена обратной связи ($W_{зос}(p)$), рабочего органа ($W_{ро}(p)$), регулятора скорости ($W_{рс}(p)$), апериодического звена ($W_{аз}(p)$) определялись по следующим формулам:

$$W_{зос}(p) = \frac{k_c}{T_{фс}p + 1}; \quad W_{ро}(p) = \frac{R_я}{T_M \cdot K_v \cdot K_F \cdot p};$$

$$W_{рс}(p) = \frac{K_T K_\theta T_M (b_c a_c a_T T_{\mu c} p + 1)}{k_c R_я b_c a_c^2 a_T^2 T_{\mu c}^2 p}; \quad W_{аз} = \frac{1}{b_c a_c a_T T_{\mu c} p + 1},$$

где k_c – коэффициент обратной связи по скорости; $T_{фс}$ – постоянная времени фильтра скорости; T_M – электромеханическая постоянная времени; K_v – коэффициент пропорциональности между ЭДС двигателя и линейной скоростью подъема; K_F – коэффициент пропорциональности между усилием и током в якорной цепи двигателя; k_c – коэффициент обратной связи по скорости; $a_c = b_c = 2$ – параметры настройки регулятора на симметричный оптимум и апериодическим звеном (фильтром) на входе с передаточной функцией; $T_{\mu c}$ – постоянная времени контура скорости.

Результаты исследования. На рис. 6 представлена блок-схема расчета системы управления для электропривода постоянного тока на основе приведенных выше формул.

Результаты расчета передаточных функций представлены в табл. 1.

Построение виртуальной модели системы электропривода ТП-Д в программном пакете MATLAB осуществлялась в соответствии с рассчитанной общей схемой системы электропривода ТП-Д (подчиненное регулирование) для рудничной сети. Входные данные для создания виртуальной модели включали в себя сигнал задания, который соответствует тахограмме движения подъемного сосуда подъемной установки (рис. 7).

На рис. 8 показана структурная модель электропривода по системе ТП-Д.

Моделирование проводится с учетом допущения, что все элементы модели представляются соответствующими передаточными функциями.

Результаты моделирования представлены в виде осциллограмм скорости подъема сосуда, усилия грузовой лебедки и тока возбуждения (рис. 9–12).

Таблица 1

Результаты расчета передаточных функций

Передаточная функция	Значение
Обмотки возбуждения ($W_{ов}(p)$)	$\frac{0,66}{2,87p + 1}$
Тиристорного возбудителя ($W_{тв}(p)$)	$\frac{54}{0,013p + 1}$
Обратной связи в контуре возбуждения ($W_{окв}(p)$)	$\frac{0,084}{3,139 \cdot 10^{-3}p + 1}$
Регулятора тока возбуждения ($W_{рт}(p)$)	$\frac{2,87p + 1}{0,08p}$
Тиристорного преобразователя ($W_{тп}(p)$)	$\frac{82,5}{0,01p + 1}$
Обратной связи в контуре тока якоря ($W_{ртя}(p)$)	$\frac{1,668 \cdot 10^{-3}}{1,569 \cdot 10^{-3}p + 1}$
Обмотки якоря ($W_{оя}(p)$)	$\frac{111,1}{0,021p + 1}$
Регулятора тока якоря ($W_{оя}(p)$)	$\frac{0,021p + 1}{0,364p}$
Нелинейного элемента ($W_{нэ}(p)$)	$\frac{1}{2,035p}$
Звена обратной связи ($W_{зос}(p)$)	$\frac{1,82}{0,009p + 1}$
Рабочего органа ($W_{ро}(p)$)	$\frac{9 \cdot 10^{-3}}{1409p}$
Регулятора скорости ($W_{рс}(p)$)	$\frac{0,08p + 1}{0,0048p}$
Апериодического звена ($W_{аз}(p)$)	$\frac{1}{0,16p + 1}$



Рис. 6. Блок-схема алгоритма расчета системы управления для электропривода постоянного тока

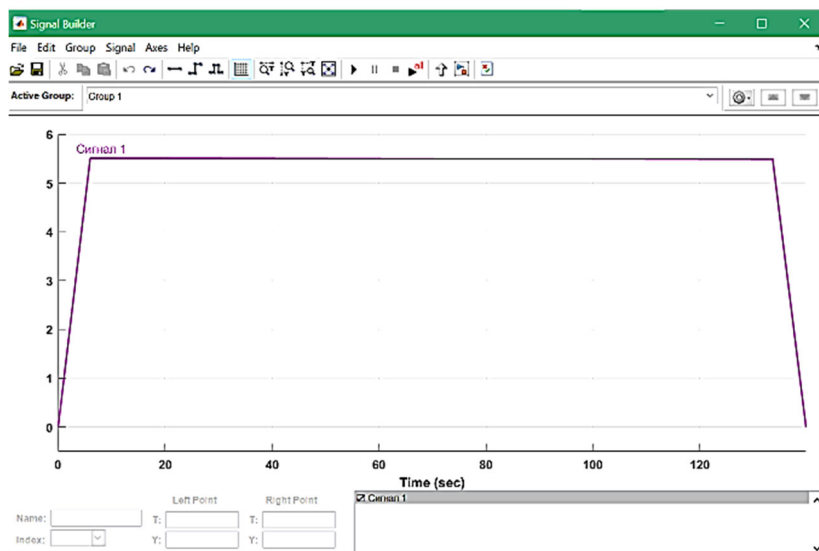


Рис. 7. Окно задания движения сосуда в программном пакете MATLAB (блок Signal Builder)

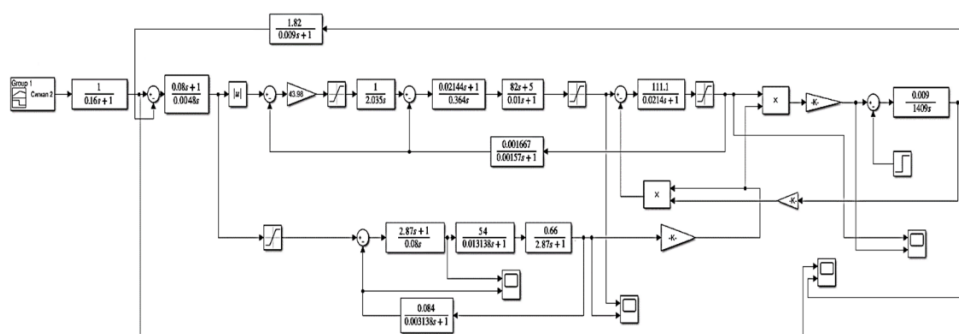


Рис. 8. Структурная модель электропривода по системе ТП-Д

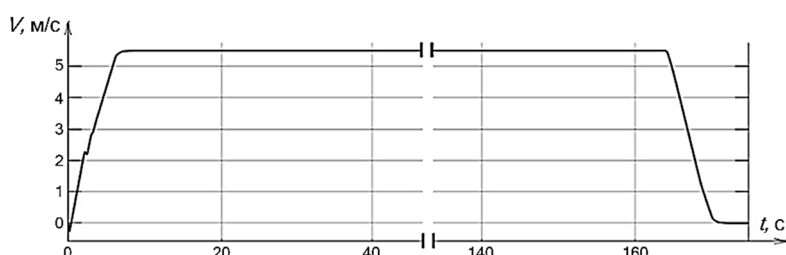


Рис. 9. Осциллограмма скорости движения подъемного сосуда

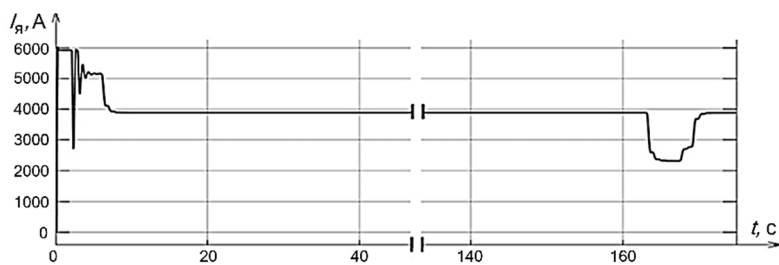


Рис. 10. Осциллограмма тока нагрузки

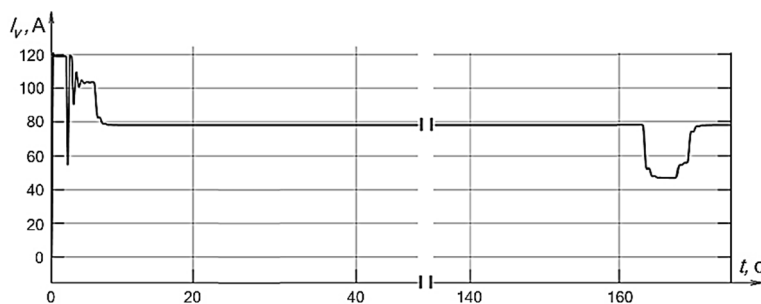


Рис. 11. Осциллограмма тока возбуждения

По результатам моделирования видно, что полученная скорость подъема груза соответствует заданной. При пуске и торможении происходит бросок тока якоря двигателя от нуля до 6000 А, ток возбуждения в момент пуска увеличивается от нуля до 120 А.

На рис. 12 изображена имитационная модель действующего электропривода скиповой подъемной установки с использованием системы визуального моделирования динамических систем MATLAB.

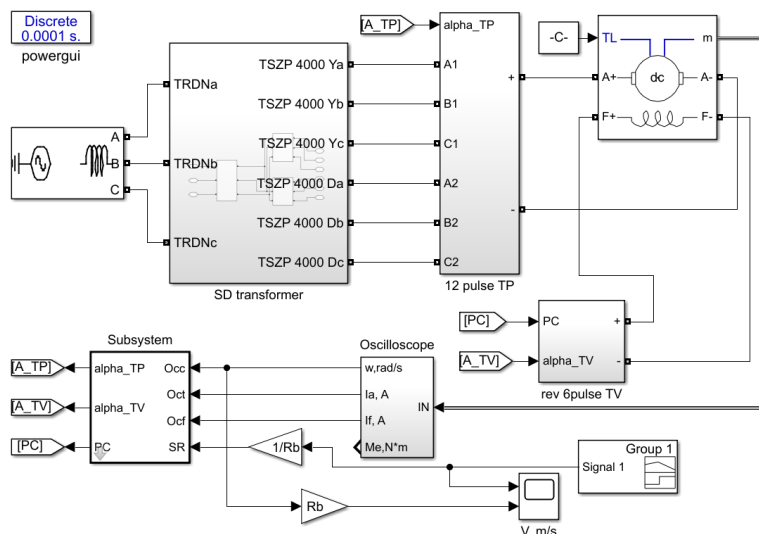


Рис. 12. Имитационная модель электропривода скиповой подъемной установки по системе ТП-Д в MATLAB

В силовую часть входит: источник синусоидального напряжения, блок (SD transformer) понижающего и двух согласующих трансформаторов, 12-пульсный тиристорный преобразователь, двигатель, реверсивный 6-пульсный тиристорный возбудитель. В систему управления входит блок управления Subsystem (рис. 13).

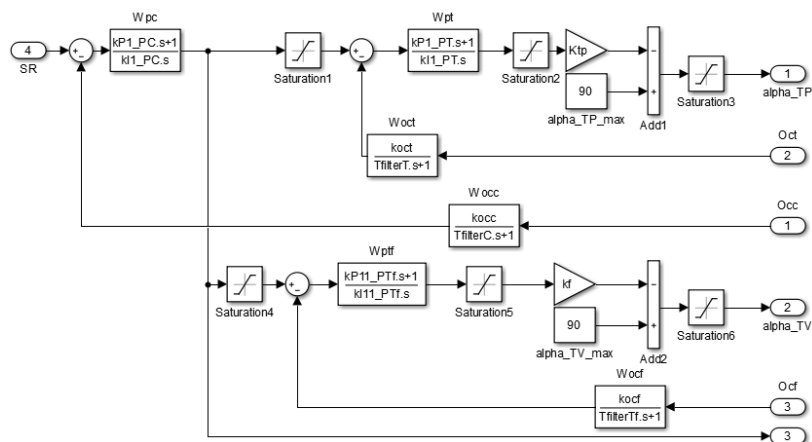


Рис. 13. Блок управления Subsystem

В результате проведенного моделирования были получены осциллограммы скорости (рис. 14), тока якоря (рис. 15) и тока возбуждения (рис. 16).

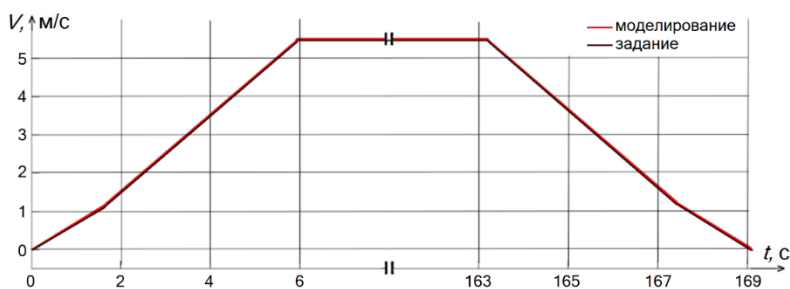


Рис. 14. Осциллограмма имитационного моделирования скорости

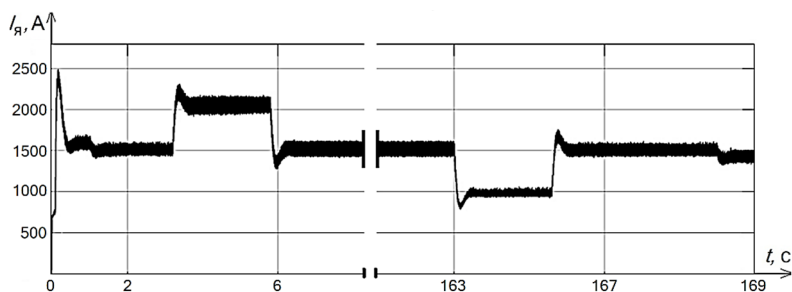


Рис. 15. Осциллограмма имитационного моделирования тока нагрузки

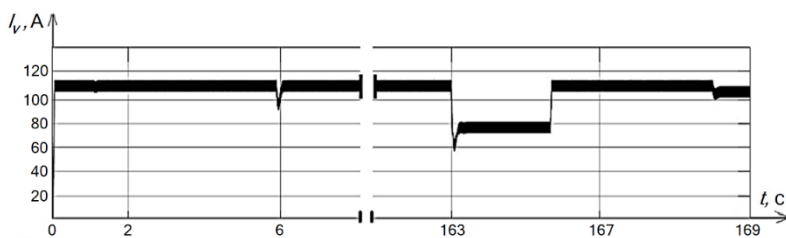


Рис. 16. Осциллограмма имитационного моделирования возбуждения

Сравнение результатов экспериментального измерения и моделирования в программном пакете MATLAB представлено в табл. 2.

Снятые результаты экспериментального измерения выполнены с помощью диспетчерского управления. Диспетчер с помощью персонального компьютера мониторит параметры (рис. 17).

Таблица 2

Результаты измерений

Показатель	Экспериментальное измерение					Имитационное моделирование				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Скорость движения (V , м/с)	1,1	4,4	5,5	4,4	1,1	1,09	4,41	5,5	4,41	1,09
Ток нагрузки ($I_{я}$, А)	5920	5150	3900	2300	2700	5915	5140	3905	2300	2701
Ток возбуждения ($I_{в}$, А)	120	104	78	47	74	119	103,5	78,2	46,6	74
Временной участок диаграммы (t_i , с)	1,53	5,98	162,47	167,54	169,94	1,5	6	162,5	167,5	170

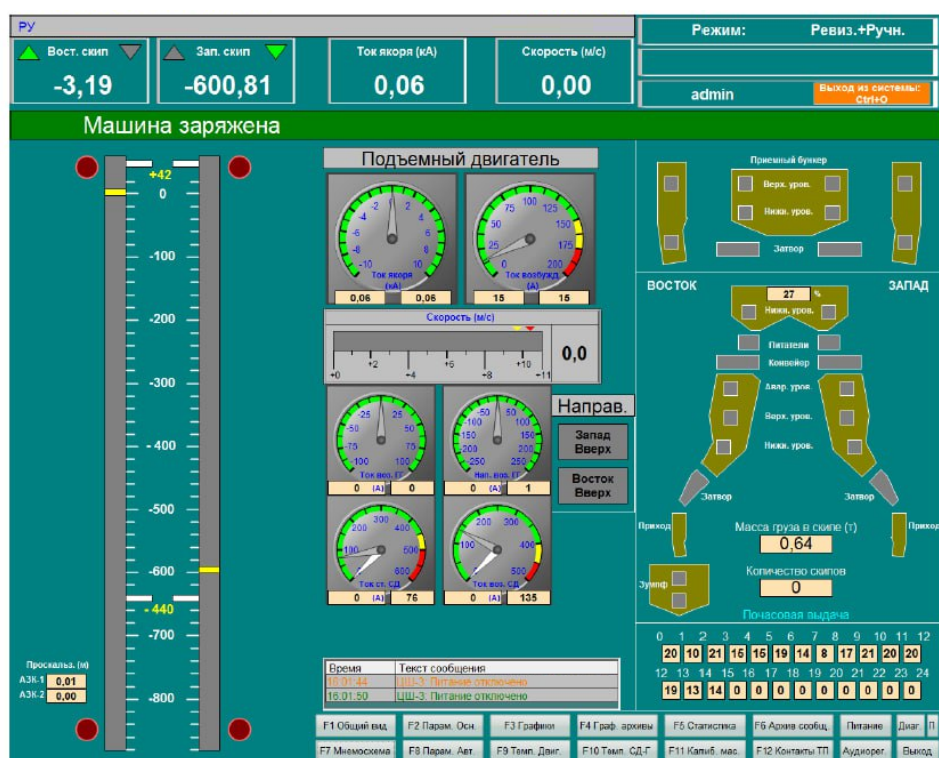


Рис. 17. Пример экрана просмотра мониторинга параметров

Из результатов моделирования видно, что спроектированная система обрабатывает заданную тахограмму. Данные, снятые с осциллограмм, соответствуют исходным:

- время моделирования соответствует рассчитанному:

$$t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 = 170 \text{ с};$$

- скорость движения подъемного сосуда практически полностью повторяет заданную скорость:

$$v_{\text{уст}} = 5,5 \text{ м/с}; v_1 = 1,1 \text{ м/с}; v_5 = 1,1 \text{ м/с};$$

- при пуске и торможении происходит бросок тока якоря двигателя от нуля до 6000 А;
- ток возбуждения достигает исходного значения 120 А.

Выводы. Моделирование динамических процессов электропривода подъемной установки рудничной сети в программном пакете MATLAB позволяет осуществить анализ работы системы подъема груза и оценить эффективность ее функционирования. Полученные результаты подтверждают правильность выбора параметров регуляторов (тока возбуждения, тока якорной цепи, скорости) и оптимальность работы системы управления действующего электропривода скиповой подъемной установки. С помощью моделирования можно дать предварительную оценку возможным проблемам и недочетам в работе системы, что помогает избежать непредвиденных ситуаций в реальной эксплуатации.

Литература

1. Моделирование привода постоянного тока рудничного подъемно-транспортного оборудования / А.М. Беляев, Т.С. Беляева, А.А. Пецык, А.Ю. Фролова // Уголь. 2024. Т. 1177, № 2. С. 52–57.
2. Нгуен Т.З. Моделирование системы управления электроприводом с двигателем постоянного тока // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы V Междунар. науч. практ. конф. Комсомольск-на-Амуре, 2022. С. 60–63.
3. Пат. 2743485 С1 РФ, МПК H02P 7/18, H02P 3/14, H02P 1/18. Система управления двигателем постоянного тока / Кулимов Н.П., Марголин Ю.Я., Найдено В.Н. [и др.]; заявитель Конструкторское бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова; № 2020116336; заявл. 21.04.2020; опубл. 19.02.2021.
4. Попов С.А., Кривченков В.И. Идентификация постоянной времени якорной цепи двигателя постоянного тока // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 33. С. 115–128.
5. Пути повышения энергетической эффективности подземных электрических сетей высокопроизводительных угольных шахт / С.С. Кубрин, А.А. Моисеевский, И. М. Закоришменный, С.Н. Решетняк, Ю.М. Максименко // Уголь. 2022. № 2(1151). С. 4-9.
6. Пыхтеев Н.А. Моделирование автоматизированного электрического привода постоянного тока в программном комплексе MATLAB // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых – 2022: сб. науч. ст. 11-й Междунар. молодежной науч. конф. Курск, 2022. Т. 5. С. 126–128.
7. Разработка имитационной модели торможения шахтной подъемной установки в системе MATLAB / С. Гылымлы, Ж.А. Туагалиева, О.В. Белянкина, А.М. Беляев // Уголь. 2022. № 10(1159). С. 50–54.
8. Роцук Р.Д. Система управления оборотами двигателя постоянного тока на основе обратной связи по току якоря // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвящ. 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова. Белгород, 2023. Ч. 12. С. 331–337.
9. Труднев С.Ю. Компьютерное моделирование системы регулирования двигателя постоянного тока на примере электропривода траловой лебедки // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2020. № 51. С. 12–18.
10. Шиллерт Д.М., Безгин А.С. Системы управления электроприводом // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всерос. науч. метод. конф. Оренбург, 2024. С. 1319–1322.

ФАЛЬКОВ ГЕОРГИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ – аспирант кафедры высшей математики, Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, Россия, Белгород (falkov.ga@bstu.ru).

ПОПОВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ – аспирант кафедры высшей математики, Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, Россия, Белгород (popov_seal@edu.bstu.ru).

ГОРЛОВ АЛЕКСАНДР СЕМЕНОВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, Россия, Белгород (belgoras@mail.ru).

Georgy A. FALKOV, Sergey A. POPOV, Alexander S. GORLOV
MATHEMATICAL MODELING OF A DIGITAL CONTROL SYSTEM FOR A
DIRECT CURRENT ELECTRIC DRIVE OF A MINING NETWORK

Key words: control system, electric drive, power quality, MATLAB Simulink, control system modeling, mathematical modeling, simulation modeling.

The development of a control system for the electric drive of the mine network is a promising area of research that allows precise control over the parameters of the electric drive

(the speed of movement of the lifting vessel, the force of the cargo winch, the excitation current).

The study purpose is to create a model of dynamic processes of an electric drive for studying the functioning of a skip lifting unit in a mine network.

Materials and methods. Modeling of dynamic processes in the electric drive of the lifting unit during the movement of the lifting vessel according to a given tachogram was performed in the MATLAB environment. Mathematical modeling methods were used to study the behavior of the electric drive control system under the specified control loop settings, as well as reconfiguration of the circuits to obtain the required transients. The modeling was carried out taking into account the assumption that all elements of the model are represented by the corresponding transfer functions.

Results. The calculation and adjustment of the main transfer functions of the excitation current regulator, the current of the anchor circuit, and the speed control of the electric drive were performed. The results of experimental measurement and modeling are compared in the MATLAB software package.

Conclusions. As part of the study, dynamic processes of the electric drive of the mine network lifting unit were simulated in the MATLAB software package and a control system was developed that allows you to control the operation of a DC electric drive.

References

1. Belyaev A.M., Belyaeva T.S., Petsyk A.A., Frolova A.Yu. *Modelirovanie privoda postoyan-nogo toka rudnichnogo pod»emno-transportnogo oboru-dovaniya* [Modeling of DC drive of mine handling equipment]. *Ugol'*, 2024, vol. 1177, no. 2, pp. 52–57.
2. Nguen T.Z. *Modelirovanie sistemy upravleniya elektroprivodom s dvigatelem postoyannogo toka* [Modeling of a control system for an electric drive with a DC motor]. In: *Proizvodstvennye tekhnologii budushchego: ot sozdaniya k vnedreniyu: Materialy V Mezhdunar. nauch. prakt. konf* [Proc. of the 5th Int. Sci. Pract. Conf. «Production technologies of the future: from creation to implementation»]. Komsomolsk-on-Amur, 2022, pp. 60–63.
3. Kulimov N.P., Margolin Yu.Ya., Naidenko V.N. et al. *Sistema pareunia ditantalum postoyannogo toka* [DC motor control system]. Patent RF, no. 2743485, 2021.
4. Popov S.A., Krivchenkov V.I. *Identifikatsiya postoyannoi vremeni yakornoj tsepi dviga-telya postoyannogo toka* [Identification of the time constant of the anchor circuit of a DC motor]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*, 2020, no. 33, pp. 115–128.
5. Kubrin S.S., Moiseevsky A.A., Zakorshmennyy I.M., Reshetnyak S.N., Maksimenko Yu.M. *Puti povysheniya ehnergeticheskoi ehffektivnosti podzemnykh ehlektricheskikh setei vysokoproizvoditel'nykh ugot'nykh shakht* [Ways to increase the energy efficiency of underground electric networks of high-performance coal mines]. *Ugol'*, 2022, no. 2 (1151), pp. 4–9.
6. Pykhteev N.A. *Modelirovanie avtomatizirovannogo elektricheskogo privoda postoyanno-go toka v programmnom komplekse Matlab* [Simulation of an automated DC electric drive in the MATLAB software package]. In: *Pokolenie budushchego: Vzglyad molodykh uchenykh – 2022: sb. nauch. st. 11-i Mezhdunar. molodezhnoi nauch. konf* [Proc. of 11th Int. Sci. Conf. «The generation of the future: The view of young scientists – 2022»]. Kursk, 2022, vol. 5, pp. 126–128.
7. Tiagalieva Zh.A., Belyankina O.V., Belyaev A.M. *Razrabotka imitatsionnoi modeli tormo-zheniya shakhtnoi pod»emnoi ustanovki v sisteme Matlab* [Development of a simulation model of braking of a mine lifting installation in the MATLAB system]. *Ugol'*, 2022, no. 10(1159), pp. 50–54.
8. Roshchuk R.D. *Sistema upravleniya oborotami dvigatelya postoyannogo toka na osnove obratnoi svyazi po toku yakorya* [DC motor speed control system based on armature current feedback]. In: *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh BGTU im. V.G. Shukhova, posvyashch. 170-letiyu so dnya rozhdeniya V.G. Shukhova* [Int. Sci. and Tech. Conf. of young scientists of V.G. Shukhov BSTU, dedicated to the 170th anniversary of the birth of V.G. Shukhov]. Belgorod, 2023, pp. 331–337.
9. Trudnev S.Yu. *Komp'yuternoe modelirovanie sistemy regulirovaniya dvigatelya postoyan-nogo toka na primere elektroprivoda tralovoi lebedki* [Computer simulation of a DC motor control

system using the example of an electric drive of a trawl winch]. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, no. 51, pp. 12–18.

10. Shillert D.M., Bezgin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodom* [Electric drive control systems]. In: *Universitetskii kompleks kak regional'nyi tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vseros. nauch. metod. konf.* [Proc. of Russ. Sci. Conf. «The University complex as a regional center of education, science and culture»]. Orenburg, 2024, pp. 1319–1322.

GEORGY A. FALKOV – Post-Graduate Student, Department of Higher Mathematics, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, Belgorod (falkov.ga@bstu.ru).

SERGEY A. POPOV – Post-Graduate Student, Department of Higher Mathematics, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, Belgorod (popov_seal@edu.bstu.ru).

ALEXANDER S. GORLOV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department Higher Mathematics, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, Belgorod (belgoras@mail.ru).

Формат цитирования: *Фальков Г.А., Попов С.А., Горлов А.С.* Математическое и имитационное моделирование динамических процессов в электроприводе постоянного тока рудничной сети // Вестник Чувашиского университета. 2025. № 2. С. 124–135. DOI: 10.47026/1810-1909-2025-2-124-135.