

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Научная статья

УДК 621.313: 621.874

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-3-12

Дмитриева Валерия Валерьевна, Дзюин Дмитрий Владленович*

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина

*E-mail: dziouin@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ МНОГОМАССОВОЙ СИСТЕМЫ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА



Информация о статье

Поступила:

15 февраля 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 апреля 2024 г.

Принята к печати:

15 мая 2024 г.

Опубликована:

06 июня 2024 г.

Ключевые слова:

Ленточный конвейер, многодвигательный электропривод, электромеханическая система, многомассовая система, приводной барабан, редуктор, кусочно-линейная аппроксимация, моделирование, MATLAB/Simulink

Аннотация.

В данной статье рассматривается математическое и компьютерное моделирование многодвигательного электропривода ленточного конвейера с целью исследования работы электрической части схемы и динамических свойств многомассовой механической системы. Объект исследования – шахтный ленточный конвейер 2Л100У-01 с двухбарабанным трехдвигательным асинхронным редукторным электроприводом. Модель ленты конвейера получена методом кусочно-линейной аппроксимации, что позволяет перейти к системе из 7 дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода, соответствующих 7 сосредоточенным параметрам системы. Для получения подробной информации о работе электрической и механической части электропривода асинхронные двигатели и редукторы моделируются как многомассовая система. В графической среде Simulink программы MATLAB с применением библиотеки «Specialized Power Systems» для электротехнических компонентов создана компьютерная модель многодвигательной электромеханической системы, включающая питающую сеть, асинхронные двигатели, редукторы, приводные барабаны и ленту конвейера 2Л100У-01. Результаты моделирования иллюстрируют колебательный характер скорости ленты и момента привода в установившемся режиме, а также проскальзывание ленты в пусковом режиме. Сделаны выводы о необходимости применения системы регулируемого электропривода, включая плавный пуск и индивидуальное прямое управление моментом каждого приводного двигателя. Авторами поставлены дальнейшие задачи синтеза системы автоматического управления многодвигательным частотно-регулируемым электроприводом ленточного конвейера.

Для цитирования: Дмитриева В.В., Дзюин Д.В. Математическая и компьютерная модель многомассовой системы многодвигательного электропривода ленточного конвейера // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 2 (172). С. 3-12. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-3-12, EDN: AZBPUK

Введение

Согласно исследованиям рынка ленточных конвейеров в Российской Федерации за последнее десятилетие, суммарная доля ленточных конвейеров в угольной добывающей промышленности, черной и цветной металлургии составляет 71,7% по отношению ко всему парку эксплуатируемых ленточных

конвейеров [1]. В современных высокопроизводительных ленточных конвейерах с высокими нагрузками создание необходимого тягового усилия реализуется путем применения многобарабанного привода с несколькими отдельными электродвигателями на каждый приводной барабан, чтобы распределить суммарную мощность привода между

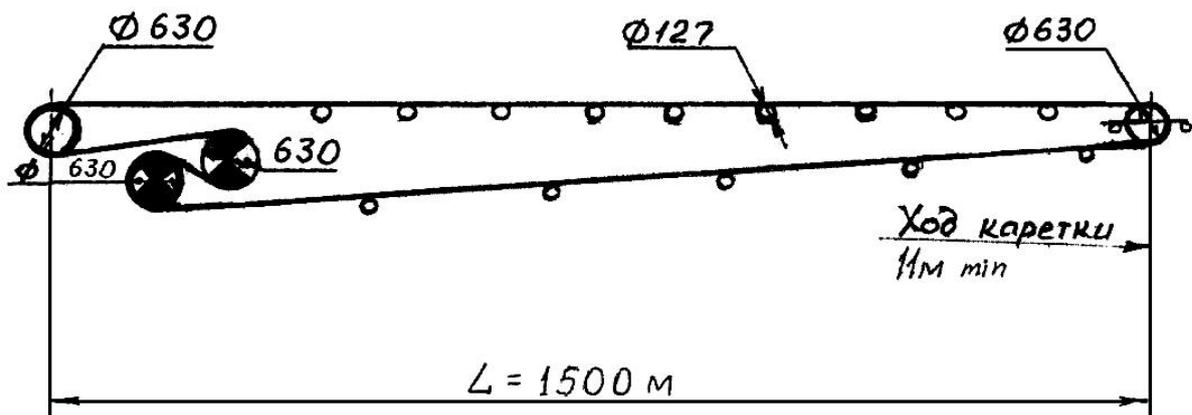


Рис. 1. Схема горизонтального ленточного конвейера 2Л100У-01
 Fig. 1. The schematic of the 2L100U-01 horizontal belt conveyor

барабанами и добиться допустимых значений натяжения ленты [2, 3]. Повышение технико-экономической эффективности шахтных конвейерных установок, в том числе улучшение энергетической эффективности их многодвигательного электропривода (ЭП), требует глубоких экспериментальных исследований электромеханических переходных процессов, что зачастую оказывается невозможным на практике из-за затрудненного доступа в шахты и недопущения вмешательства в текущие условия эксплуатации конвейеров. Поэтому детальное исследование динамических свойств электрической и механической частей системы многодвигательного ЭП ленточного конвейера может быть проведено методом математического и компьютерного моделирования [4, 5].

Цель данной работы – разработать математическую модель и соответствующую ей компьютерную модель в MATLAB/Simulink для рассматриваемого объекта с учетом электрической схемы многодвигательного электропривода и многомассовой механической части привода и ленты конвейера, чтобы получить объективное отображение переходных процессов по основным величинам в электроприводе и верно поставить задачи их регулирования.

Методы исследования

В настоящее время самым доступным методом исследования сложных динамических систем с возможностью проведения виртуальных экспери-

ментов, проверки гипотез и анализа полученных данных выступает математическое моделирование с применением компьютерных программных комплексов. Согласно [1–3], электромеханическая система «многодвигательный электропривод – ленточный конвейер» является системой с распределенными параметрами, в которой распространяются волны напряжений и деформаций ленты конвейера. Для изучения динамических свойств моделируемой системы электропривода достаточно учитывать лишь упругость ленты, поэтому при составлении уравнений движения этой системы допустимо перейти от системы с распределенными параметрами к системе с сосредоточенными параметрами, используя известный метод кусочно-линейной аппроксимации, как изложено в работах [3, 4, 6, 7]. В этом методе замкнутый контур ленты условно разбивается на некоторое число участков, на каждом из которых предполагается линейный закон изменения скорости деформации. В итоге лента аппроксимируется некоторым числом взаимосвязанных сосредоточенных масс с учетом изложенных в работе [7] допущений, которые не оказывают влияния на моделирование нагрузки на приводные электродвигатели со стороны ленты. Механическая связь между двумя соседними сосредоточенными массами реализуется через модель Кельвина – Фойгта (Фохта), состоящую из соединенных параллельно идеальной вязкой жидкости (ньютоновской жидкости) и идеальной упругой

Таблица 1. Технические характеристики ленточного конвейера 2Л100У-01
 Table 1. Technical characteristics of the 2L100U-01 belt conveyor

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Ширина ленты B , мм	1000
2	Скорость движения ленты v , м/с	2,5
3	Мощность привода, кВт	110х3
4	Максимальная производительность Q_{max} , т/ч	850
5	Угол установки, град.	0
6	Длина поставки конвейера L , м	1500
7	Тип става	жестк. напочв.
8	Тип ленты	РТЛШТВ(ТГ)-1000
9	Тип роlikоопор верхней ветви	трехроликовая
10	Угол наклона роlikоопор верхней ветви, град.	36
11	Масса комплекта без ленты, кг, не более	136000

пружины Гука, как приведено в работах [3, 4, 6, 7]. Для визуального моделирования переходных характеристик электромеханической системы «электропривод – ленточный конвейер» выбран пакет MATLAB с графической средой Simulink, так же, как в работах [5, 7–10]. Однако работы [5, 7, 8, 10] рассматривают только случай одноприводного конвейера, при этом в публикациях [7–10] отсутствует моделирование редукторов, а также в [7, 8, 10] не рассматривается влияние динамического момента нагрузки на электрические параметры приводных двигателей. Поэтому для наиболее точного моделирования электрической части асинхронного электропривода с двунаправленным обменом электрической энергией в разрабатываемой Simulink-модели используется библиотека Simscape Electrical, как в работе [10] для одноприводного конвейера и в [11, 12] для многодвигательных электроприводов горных машин.

Объект исследования

В рамках экспериментального исследования системы многодвигательного электропривода ленточного конвейера рассматривается следующий объект: горизонтальный ленточный конвейер 2Л100У-01 от производителя АО «Завод имени М. И. Платова». Конвейер предназначен для транспортирования горной массы с размером кусков угля до 500 мм и породы до 300 мм по прямолинейным в плане горным выработкам угольных шахт, опасных по газу и пыли. Схема конвейера приведена на Рис. 1, его основные технические характеристики – в Таблице 1. Двухбарабанный привод данного конвейера является трехдвигательным, первый по ходу

движения ленты барабан приводится в движение двумя асинхронными двигателями (АД) марки ВА280S4 номинальной мощностью по 110 кВт каждый, а второй приводной барабан – одним таким же АД.

Вал каждого электродвигателя соединен с приводным барабаном через одноступенчатый понижающий редуктор. Все 3 редуктора идентичны, их технические характеристики приведены в Таблице 2.

Для составления математической модели движения ленты конвейера требуется дополнительный набор данных, получаемых посредством уточненного тягового расчета согласно методике, изложенной в [2]. Все необходимые значения параметров, принятые по справочным таблицам и вычисленные в ходе тягового расчета, сведены в Таблицу 3.

Математическая модель конвейерной ленты с приводом

Система «лента конвейера с приводными барабанами и натяжным устройством» аппроксимируется 7 сосредоточенными массами, как показано на Рис. 2, где $q_i(t)$, $\dot{q}_i(t)$ – соответственно перемещения (м) и скорости (м/с) сосредоточенных масс во времени, $i = 1, \dots, 7$; $l_p = 0,5L$ (м) – длины соответственно грузеных и порожних участков ленты; $l_{pr1} = 5,2$ м, $l_{pr2} = 2,6$ м – длины промежуточных ветвей ленты; $M_{12}(t)$, $M_3(t)$ – движущие моменты соответственно первого привода (от первых двух двигателей) и второго привода (от третьего двигателя), приведенные к радиусу приводных барабанов.

Математическая модель движения ленты конвейера представляет собой систему нелинейных

Таблица 2. Параметры одноступенчатого редуктора привода ленточного конвейера 2Л100У-01
Table 2. Parameters of the single-stage gearbox of the 2L100U-01 belt conveyor drive

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Передачное отношение i_{red}	20
2	Момент инерции J_{red} , кг·м ²	0,0005
3	Жесткость ведущего вала C_{red} , Н·м	171900
4	Коэффициент внутреннего вязкого трения β_{red} , Н·м·с	600
5	Коэффициент полезного действия (КПД) η_{red}	0,95

Таблица 3. Параметры тягового расчета ленточного конвейера 2Л100У-01
Table 3. Parameters of traction calculation of the 2L100U-01 belt conveyor

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Погонный вес грузеной ветви ленты с роликами p_g , Н/м	1367
2	Погонный вес порожней ветви ленты с роликами p_p , Н/м	303
3	Коэффициент сопротивления движению грузеной ветви ленты w'_g	0,026
4	Коэффициент сопротивления движению порожней ветви ленты w'_p	0,012
5	Коэффициент сцепления ленты с барабаном μ	0,2
6	Угол обхвата лентой приводных барабанов α , град.	480
7	Суммарный тяговый фактор $e^{\mu\alpha}$	5,342
8	Сила сопротивления в месте загрузки конвейера W_{zag} , Н	36800
9	Сила сопротивления очистного устройства W_{och} , Н	300
10	Суммарное тяговое усилие привода W_0 , Н	101600
11	Вес натяжного устройства P_{nu} , Н	70000
12	Коэффициент сопротивления движению натяжного устройства f_{nu}	0,3
13	Жесткость ленты C_l , Н/м	150000
14	Жесткость канатов натяжного устройства C_k , Н/м	1500000
15	Коэффициент вязкого трения ленты ϑ , Н/м·с	1100
16	Масса приводного барабана m_b , кг	425

дифференциальных уравнений второго порядка, составленных согласно уравнению Лагранжа второго рода (1):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} T \right) + \frac{\partial}{\partial q_i} \Pi - \left(\frac{\partial}{\partial q_i} A_c \right) = Q_i \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия участка, Н·м; Π – потенциальная энергия участка, Н·м; A_c – работа сил сопротивления, Н·м; Q_i – непотенциальные силы в системе, Н; q_i, \dot{q}_i – обобщенные координаты (м) и их скорости (м/с) соответственно. Число уравнений в системе i равно числу обобщенных координат.

Математическая модель движения ленты, приводных барабанов и натяжного устройства конвей-

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;
 $m_g = p_g l_g / 6g$ (кг) – масса грузеного участка ветви ленты;

$m_p = p_p l_p / 6g$ (кг) – масса порожнего участка ветви ленты;

$m_{p1} = p_p l_{pr1} / 6g, m_{p2} = p_p l_{pr2} / 6g$ (кг) – масса соответственно первого и второго промежуточного участка ветви ленты;

$m_{12} = 1,2 \cdot m_b, m_3 = 1,1 \cdot m_b$ (кг) – масса соответственно первого и второго привода;

R_b (м) – радиус приводного барабана.

Модель одноступенчатого редуктора описывается системой уравнений (3) согласно [13]:

$$\left. \begin{aligned} 1) & m_g(2\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + m_{p1}(2\ddot{q}_1 + \ddot{q}_6) + C_l(2q_1 - q_2 - q_6) + 0,5(p_g l_g w'_g + p_p l_{pr1} w'_p) \cdot \text{sgn}(\dot{q}_1) + \\ & + \vartheta(2\dot{q}_1 - \dot{q}_2 - \dot{q}_6) = 0; \\ 2) & m_g(4\ddot{q}_2 + \ddot{q}_1 + \ddot{q}_3) + C_l(2q_2 - q_1 - q_3) + p_g l_g w'_g \cdot \text{sgn}(\dot{q}_2) + \vartheta(2\dot{q}_2 - \dot{q}_1 - \dot{q}_3) = 0; \\ 3) & m_g(2\ddot{q}_3 + \ddot{q}_2) + m_p(2\ddot{q}_3 + \ddot{q}_4) + C_l(2q_3 - q_2 - q_4) + 0,25C_k(q_3 - q_4 - 2q_7) + \\ & + 0,5(p_g l_g w'_g + p_p l_p w'_p) \cdot \text{sgn}(\dot{q}_3) + \vartheta(2\dot{q}_3 - \dot{q}_2 - \dot{q}_4) = 0; \\ 4) & m_p(4\ddot{q}_4 + \ddot{q}_3 + \ddot{q}_5) + C_l(2q_4 - q_3 - q_5) - 0,25C_k(q_3 - q_4 - 2q_7) + \\ & + p_p l_p w'_p \cdot \text{sgn}(\dot{q}_4) + \vartheta(2\dot{q}_4 - \dot{q}_3 - \dot{q}_5) = 0; \\ 5) & m_p(2\ddot{q}_5 + \ddot{q}_4) + m_{p2}(2\ddot{q}_5 + \ddot{q}_6) + m_3 \ddot{q}_5 + C_l(2q_5 - q_4 - q_6) + \\ & + 0,5p_p w'_p(l_p + l_{pr2}) \cdot \text{sgn}(\dot{q}_5) + \vartheta(2\dot{q}_5 - \dot{q}_4 - \dot{q}_6) = \frac{M_3(t)}{R_b}; \\ 6) & m_{p1}(2\ddot{q}_6 + \ddot{q}_1) + m_{p2}(2\ddot{q}_6 + \ddot{q}_5) + m_{12} \ddot{q}_6 + C_k(2q_6 - q_1 - q_5) + \\ & + 0,5p_p w'_p(l_{pr1} + l_{pr2}) \cdot \text{sgn}(\dot{q}_6) + \vartheta(2\dot{q}_6 - \dot{q}_1 - \dot{q}_5) = \frac{M_{12}(t)}{R_b}; \\ 7) & \frac{P_{nu}}{g} \ddot{q}_7 + 0,5C_k(q_4 - q_3 + 2q_7) + P_{nu} + P_{nu} \cdot f_{nu} \cdot \text{sgn}(\dot{q}_7) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

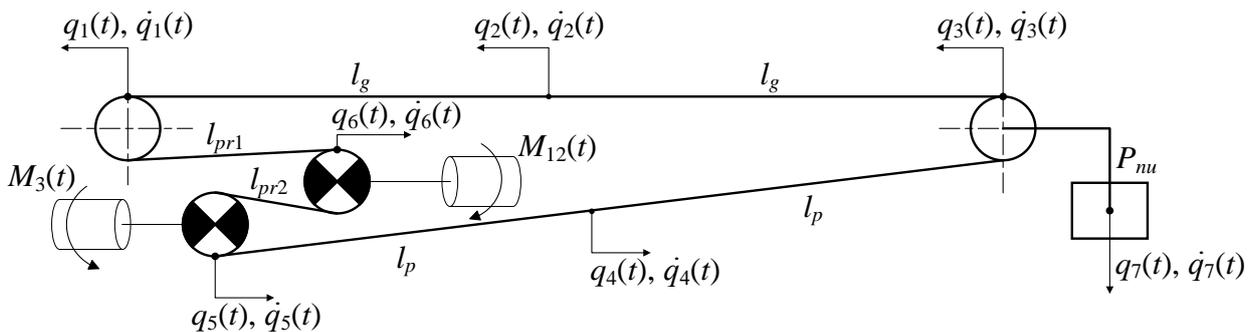


Рис. 2. Расчетная схема математической модели ленты конвейера 2Л100У-01
 Fig. 2. Calculation scheme of the mathematical model of the 2L100U-01 belt conveyor

ера (2) получена согласно [7, 9] путем подстановки частных производных по времени от частных производных кинетической энергии по обобщенным координатам, частных производных по обобщенным координатам от потенциальной энергии деформации ленты, частных производных по обобщенным координатам от работы сил сопротивления движению, сил внутреннего трения и работы движущей силы привода в уравнение (1) для каждой из 7 обобщенных координат.

В системе (2) приняты следующие обозначения:

$$\left\{ \begin{aligned} J_{red} \ddot{\varphi}_{red} &= M_h - \frac{M_l}{\eta_{red} i_{red}}; \\ M_h &= C_{red} \int (\omega_h - \dot{\varphi}_{red}) dt + \beta_{red} (\omega_h - \dot{\varphi}_{red}); \\ M_l &= C_{red} i_{red} \int \left(\frac{\dot{\varphi}_{red}}{i_{red}} - \omega_{load} \right) dt + \\ &+ \beta_{red} i_{red} \left(\frac{\dot{\varphi}_{red}}{i_{red}} - \omega_{load} \right); \end{aligned} \right. \quad (3)$$

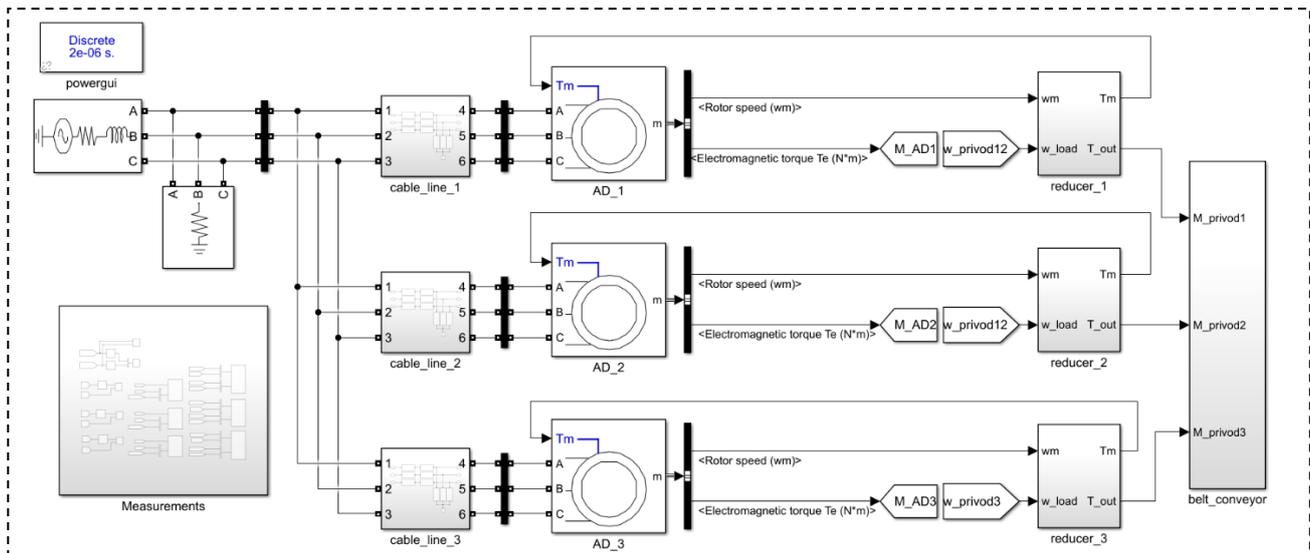


Рис. 3. Компьютерная модель многодвигательного электропривода ленточного конвейера в MATLAB/Simulink

Fig. 3. Computer model of a multi-motor electric drive of a belt conveyor in MATLAB/Simulink

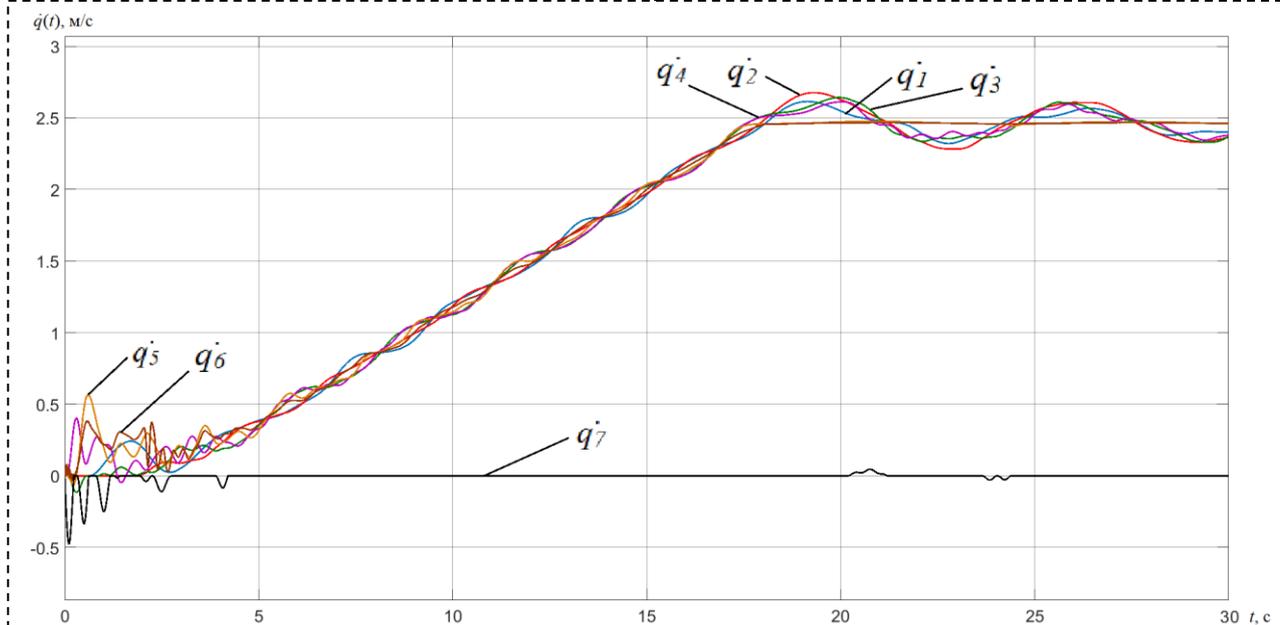


Рис. 4. Временная диаграмма линейных скоростей сосредоточенных масс модели ленточного конвейера

Fig. 4. Time scope of linear velocities of concentrated masses of a belt conveyor model

где φ_{red} (рад) – угол поворота редуктора; M_h (Н·м) – механический момент, развиваемый ведущим (быстроходным) валом; M_l (Н·м) – механический момент, развиваемый ведомым (тихоходным) валом; ω_h (рад/с) – угловая скорость ведущего вала (со стороны АД); ω_{load} (рад/с) – угловая скорость ведомого вала (со стороны приводного барабана).

Суммирование выходных моментов двух редукторов на первом приводном барабане производится аналогично [13]. Моделирование всей системы выполняется в именованных единицах, с учетом приведения всех механических величин через передаточное отношение к реальным значениям в каждой из рассматриваемых точек системы.

Компьютерная модель многомассовой электромеханической системы

На Рис. 3 представлена компьютерная модель многодвигательного электропривода ленточного

конвейера, созданная в MATLAB/Simulink R2021a. Трехфазная электрическая сеть 0,4 кВ, кабельные линии ВБШвнг-LS 3х70 длиной 0,02 км и асинхронные двигатели BA280S4 моделируются соответственно блоками «Three-Phase Source», «Series RLC Branch» и «Asynchronous Machine SI Units» из библиотеки «Specialized Power Systems». Подсистема ленточного конвейера «belt_conveyor» соответствует системе уравнений (2), подсистема «reducer» – системе уравнений (3).

Анализ методик расчета сопротивлений схемы замещения АД [14] показывает, что наибольшей точностью обладает методика с минимизацией целевой функции отклонений расчетных значений номинального и пускового момента и тока статора, максимального момента, критического скольжения от каталожных параметров. Поэтому расчет параметров модели АД выполняется по каталожным

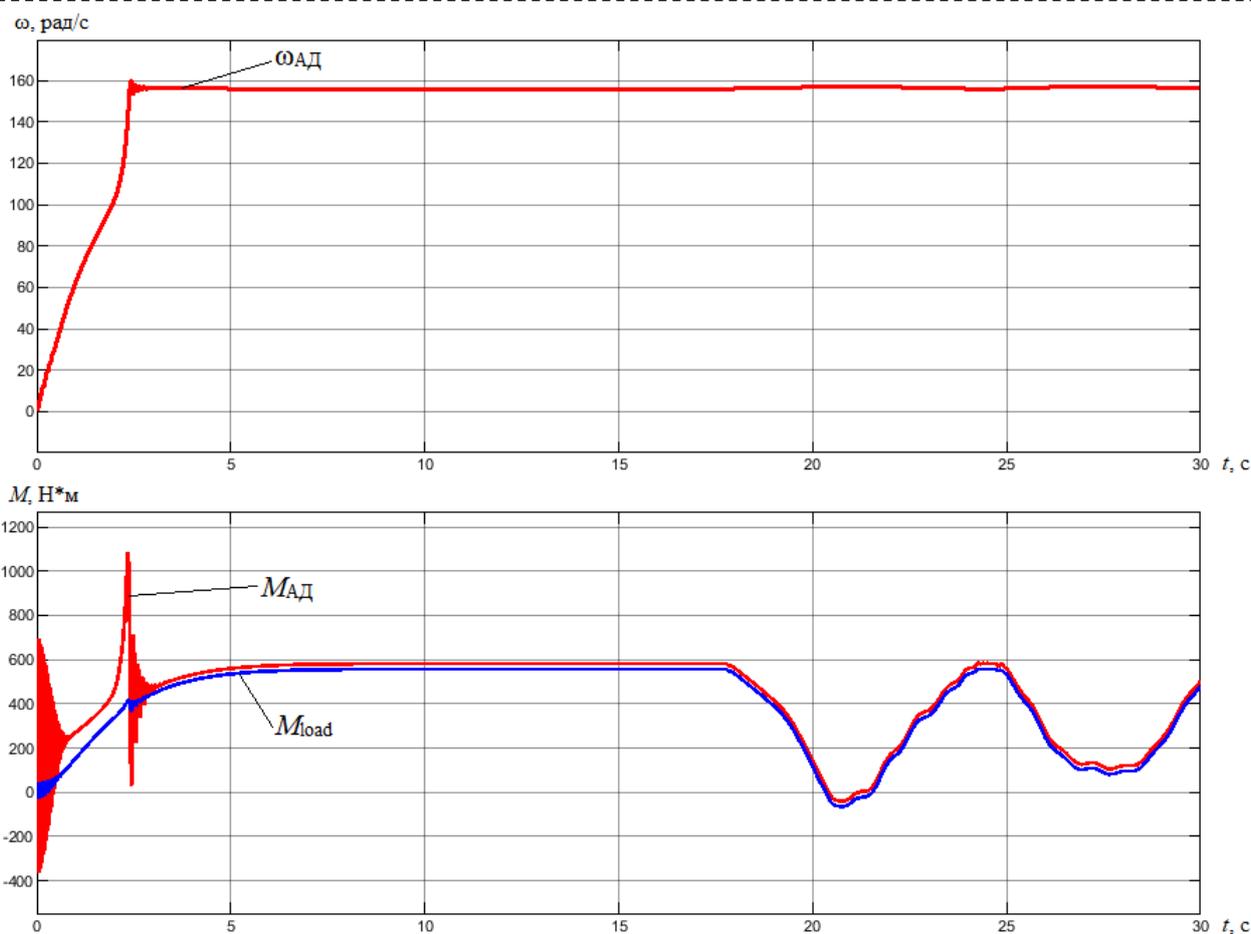


Рис. 5. Временные диаграммы угловой скорости и момента приводного асинхронного двигателя
 Fig. 5. Time scopes of angular velocity and torque of the asynchronous drive motor

данным ВА280S4 с применением компьютерной программы [15].

Результаты компьютерного моделирования

На Рис. 4 представлена временная диаграмма скоростей обобщенных координат сосредоточенных масс ленты, приводных барабанов и натяжного устройства конвейера как результат моделирования работы конвейера на заданной скорости 2,5 м/с. Установившиеся значения величин скоростей приводных барабанов \dot{q}_5, \dot{q}_6 равны 2,45 м/с, что свидетельствует о наличии в системе статической ошибки при отработке задания. Осциллограммы скоростей остальных сосредоточенных масс ленты $\dot{q}_1 - \dot{q}_4$ имеют колебательный характер с периодом 7 с. В установившемся режиме скорость движения натяжного устройства \dot{q}_7 не равна 0 в моменты завершения полупериода колебаний.

На Рис. 5 приведены временные диаграммы угловой скорости и момента одного из приводных АД (результаты моделирования всех трех АД идентичны). Механическая характеристика АД обладает достаточной жесткостью, поэтому значение угловой скорости АД $\omega_{АД}$ устойчиво, в то время как электромагнитный момент АД $M_{АД}$ подвергается сильным колебаниям от 0 до 0,85 номинального по причине передачи через редуктор соответствующих колебаний момента нагрузки M_{load} со стороны ленты.

Результаты моделирования подтверждают, что система многодвигательного многобарабанного привода ленточного конвейера является колебательной. Длительная работа в колебательном режиме недопустима, так как это приводит к повышенным нагрузкам валов, двигателей и ленты, их преждевременному износу, а также может вызвать явление резонанса, поломку редукторов и разрыв ленты.

На Рис. 6 представлена временная диаграмма угловых скоростей точки на ободе одного из приводных барабанов и соответствующей точки ленты на нем. В переходном режиме пуска конвейера в течение 17,5 с наблюдается пробуксовка (проскальзывание) ленты относительно приводного барабана, что должно быть устранено для сбережения ресурса ленты и футеровки барабана. Поэтому нерегулируемый ЭП конвейера целесообразно заменить на регулируемый ЭП в целях реализации плавного пуска и регулирования величины момента каждого АД.

Таким образом, для системы управления многодвигательным многобарабанным приводом ленточного конвейера встают задачи демпфирования или полного недопущения колебаний и проскальзывания ленты в переходных режимах путем установления зависимости и последующего регулирования соотношения между скоростями и моментами приводных барабанов.

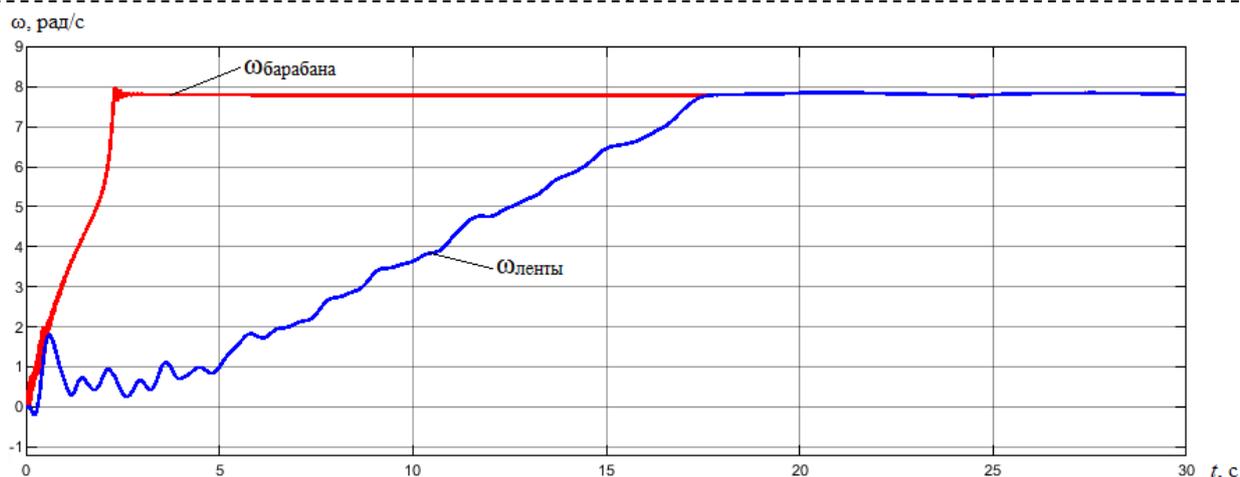


Рис. 6. Временная диаграмма угловых скоростей точки обода приводного барабана и ленты на нем
 Fig. 6. Time scope of angular velocities of the drive drum rim point and the tape on it

Выводы

В данной работе была смоделирована система нерегулируемого многодвигательного электропривода ленточного конвейера 2Л100У-01, исследована ее работа в пусковом и установившемся режиме. Исходя из результатов компьютерного моделирования, рассматриваемая система характеризуется большой амплитудой колебаний момента электропривода в установившемся режиме и длительным проскальзыванием ленты относительно точки соприкосновения с каждым приводным барабаном в переходном режиме пуска. Наблюдаемые динамические свойства системы способствуют ускорению износа оборудования. Для повышения технологической и энергетической эффективности существующей системы многодвигательного электропривода ленточного конвейера требуется автоматическое выравнивание величин динамического момента сопротивления и устранение проскальзывания ленты, что может быть достигнуто применением частотно-регулируемого электропривода с индивидуальным регулированием динамических нагрузок каждого приводного асинхронного двигателя методом прямого управления моментом. Одновременно с этим система автоматического управления скоростью конвейера может обеспечить устранение статической ошибки по скорости и регулирования скорости в зависимости от грузопотока.

На основании проведенного исследования сформулированы следующие задачи теоретического и прикладного характера, которые потребуются решить для повышения технической и энергетической эффективности системы многодвигательного электропривода ленточного конвейера:

1. Синтезировать систему прямого управления моментом каждого АД в многодвигательном частотно-регулируемом электроприводе, чтобы обеспечить минимально возможный уровень пульсаций момента, демпфирование колебаний скоростей сосредоточенных масс ленты и допустимые динамические нагрузки в приводе и ленте.

2. Разработать систему автоматического регулирования скорости конвейера в зависимости от ве-

личины поступающего грузопотока с синхронизацией скорости всех приводных двигателей и согласовать алгоритм регулирования скорости с алгоритмами регулирования динамических моментов и натяжения ленты.

3. Выполнить имитационное моделирование движения ленты конвейера с регулируемым многодвигательным электроприводом, оценить экономическую и энергетическую эффективность предлагаемого технического решения.

В соответствии с поставленными задачами и сделанными выводами в настоящее время авторами ведется разработка системы управления многодвигательным электроприводом ленточного конвейера 2Л100У-01.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаров К. А. Развитие элементов теории проектирования многоприводных ленточных конвейеров: дис. ... доктора технических наук: 2.5.2 / К. А. Гончаров. М., 2021. 293 с.
2. Дмитриев В. Г., Вержанский А.П. Основы теории ленточных конвейеров. М.: Горная книга, 2017. 572 с. ISBN 978-5-98672-457-7.
3. Yao Y., Zhang B. Influence of the elastic modulus of a conveyor belt on the power allocation of multi-drive conveyors // PLoS ONE. 2020. V. 15. №7. P. e0235768. DOI: 10.1371/journal.pone.0235768
4. Wang X., Mu D. Dynamic model research and Intelligent system development of belt conveyor // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019. V. 493. № 1. P. 012101. DOI: 10.1088/1757-899X/493/1/012101
5. Wang L., Li H., Huang J., Zeng J., Tang L., Wu W., Luo Y. Research on and Design of an Electric Drive Automatic Control System for Mine Belt Conveyors // Processes. 2023. V. 11. №6. P. 1762. DOI: https://doi.org/10.3390/pr11061762
6. Котин Д. А., Сухинин С. Е. Способы минимизации тягового фактора ленточного конвейера // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 1(165). С. 24–32. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-1-24-32

7. Дмитриева В. В. Разработка и исследование системы автоматической стабилизации погонной нагрузки магистрального конвейера: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.13.06 / В. В. Дмитриева. М., 2005. 162 с.

8. Дмитриев В. Г., Чередник П. Н. Программный комплекс для тягового расчета и анализа пусковых и тормозных режимов ленточных конвейеров // ГИАБ. 2016. №2. С. 25–35.

9. Dmitrieva V. V., Kaung Pyae Aung, Pevzner L. D., Win Zaw Htay. Development of a Mathematical Model of Belt Conveyor With Twin-Engine Drive // International Journal of Mechanical and Production Engineering (IJMPE)-IJMPE. 2016. V. 4. №12. P. 107–110.

10. Павлов В. Е. Исследование режимов пуска электропривода ленточного конвейера методом компьютерного моделирования // Вестник ИрГТУ. 2018. №4(135). С. 136–147. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-136-147>

11. Заголило С. А., Семенов А. С., Семенова М. Н., Якушев И. А. Компьютерное моделирование многодвигательной системы электропривода в пакете программ MATLAB // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8. № 2(29). С. 6–7. DOI: 10.26102/2310-6018/2020.29.2.012

12. Воронин В. А., Непша Ф. С. Имитационное моделирование электропривода очистного комбайна для оценки показателей энергоэффективности системы электроснабжения // Записки Горного института. 2020. Т. 246. С. 633–639. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.5

13. Большаков В. И., Буцукин В. В. Математическая модель многодвигательного электропривода с суммированием крутящих моментов на тихоходном валу // ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». 1999. №8. С. 96–100.

14. Пилаев С. Н., Афоничев Д. Н. Обоснование параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13. № 4(67). С. 129–138. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.4.129

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611993. Программа расчета параметров Т-образной схемы замещения трехфазного асинхронного электродвигателя / Д. В. Дзюин – Заявка № 2024611028. Дата поступления 22 января 2024 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 января 2024 г.

© 2024 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Дмитриева Валерия Валерьевна, кандидат техн. наук, доцент, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (119991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1)

Дзюин Дмитрий Владленович, аспирант, ассистент, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (119991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1)

Заявленный вклад авторов:

Дмитриева Валерия Валерьевна – постановка цели и задач, выбор методов исследования, анализ результатов, подведение итогов.

Дзюин Дмитрий Владленович – разработка математической и компьютерной модели, моделирование и анализ полученных результатов, определение направлений дальнейшего исследования, написание и оформление статьи, работа со списком литературы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-3-12

Valeria V. Dmitrieva, Dmitry V. Dzyuin *

National University of Oil and Gas “Gubkin University”

*E-mail: dziouin@mail.ru

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODEL OF A MULTI-MASS MULTI-MOTOR ELECTRIC DRIVE SYSTEM OF A BELT CONVEYOR



Article info

Received:

15 February 2024

Accepted for publication:

15 April 2024

Accepted:

15 May 2024

Published:

06 June 2024

Keywords: belt conveyor, multi-motor electric drive, electromechanical system, multi-mass system, drive pulley, reducer, piecewise linear approximation, modelling, MATLAB/Simulink.

Abstract.

This article is devoted to mathematical and computer modelling of a multi-motor electric drive of a belt conveyor in order to study the operation of the electrical circuit and the dynamic properties of a multi-mass mechanical system. The object of the research is a 2L100U-01 mine belt conveyor with a two-drum three-motor asynchronous reduced electric drive. The conveyor belt model is obtained by piecewise linear approximation, which results into a system of 7 the second kind Lagrange differential equations corresponding to 7 concentrated parameters of the system. To obtain detailed information about the operation of the electrical and mechanical parts of the electric drive, asynchronous motors and gearboxes are modeled as multi-mass system. In the Simulink graphic environment of the MATLAB application, using the Specialized Power Systems library for electrical components, a computer model of the multi-motor electromechanical system is designed, including a power supply network, asynchronous motors, gearboxes, drive drums and a 2L100U-01 conveyor belt. The simulation results illustrate the oscillatory nature of the belt speed and the drive torque in steady state, as well as the slip of the belt in starting mode. The paper concludes of the need to use controlled electric drive system, including smooth start and individual direct torque control of each drive motor. The authors set further tasks for the synthesis of an automatic control system for a multi-motor frequency-controlled electric drive of a belt conveyor.

For citation: Dmitrieva V.V., Dzyuin D.V. Mathematical and computer model of a multi-mass multi-motor electric drive system of a belt conveyor. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2024; 2(172):3-12 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-3-12, EDN: AZBPUK

REFERENCES

1. Goncharov K.A. Development of elements of the design theory of multi-drive belt conveyors: dissertation of the Doctor of Technical Sciences: 2.5.2 / K.A. Goncharov. M., 2021. 293 p.
2. Dmitriev V.G., Verzhansky A.P. Fundamentals of the theory of belt conveyors. M.: Gornaya kniga; 2017. 572 p. ISBN 978-5-98672-457-7.
3. Yao Y., Zhang B. Influence of the elastic modulus of a conveyor belt on the power allocation of multi-drive conveyors. *PLoS ONE*. 2020; 15(7):e0235768. DOI: 10.1371/journal.pone.0235768
4. Wang X., Mu D. Dynamic model research and Intelligent system development of belt conveyor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2019; 493(1):012101. DOI: 10.1088/1757-899X/493/1/012101
5. Wang L., Li H., Huang J., Zeng J., Tang L., Wu W., Luo Y. Research on and Design of an Electric Drive Automatic Control System for Mine Belt Conveyors. *Processes*. 2023; 11(6):1762. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11061762>
6. Kotin D.A., Sukhinin S.E. Methods of minimizing the traction factor of a belt conveyor. *Mining equipment and electromechanics*. 2023; 1(165):24-32. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-1-24-32
7. Dmitrieva V.V. Development and research of a system for automatic stabilization of the linear load of the main conveyor: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.13.06 / V.V. Dmitrieva. M., 2005. 162 p.
8. Dmitriev V.G., Cherednik P.N. A software package for traction calculation and analysis of starting and braking modes of belt conveyors. *GIAB*. 2016; 2:25-35.
9. Dmitrieva V.V., Kaung Pyae Aung, Pevzner L.D., Win Zaw Htay. Development of a Mathematical Model of Belt Conveyor With Twin-Engine Drive. *International Journal of Mechanical and Production Engineering (IJMPE)-IJMPE*. 2016; 4(12):107-110.
10. Pavlov V.E. Investigation of the start-up modes of the electric drive of the conveyor belt by computer modeling. *Bulletin of the IrSTU*. 2018; 4(135):136-147. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-136-147>
11. Zagolilo S.A., Semenov A.S., Semenova M.N., Yakushev I.A. Computer modeling of a multi-motor electric drive system in the MATLAB software package. *Modeling, optimization and information technology*. 2020; 2(29):6-7. DOI: 10.26102/2310-6018/2020.29.2.012
12. Voronin V.A., Nepsha F.S. Simulation of the electric drive of the shearer to assess the energy efficiency indicators of the power supply system. *Journal of Mining Institute*. 2020; 246:633-639. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.5
13. Bolshakov V.I., Butskun V.V. Mathematical model of a multi-motor electric drive with summation of torques on a slow-moving shaft. *State University of*

Azov "Priazovsky State Technical University". 1999; 8:96-100.

14. Pilyaev S.N., Afonichev D.N. Justification of the parameters of the asynchronous electric motor replacement circuit. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*. 2020; 4(67):129-138. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.4.129

15. Certificate of the computer program state registration No. 2024611993. The program for calculating the parameters of the T-shaped substitution circuit of a three-phase asynchronous electric motor / D.V. Dzyuin – Application No. 2024611028. Date of receipt January 22, 2024. Registered in the Computer Programs Registry on January 26, 2024.

© 2024 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Valeria V. Dmitrieva, C. Sc. (Engineering), Associate Professor, National University of Oil and Gas "Gubkin University", (119991, Russian Federation, Moscow, 65 Leninsky Prospekt, building 1)

Dmitry V. Dzyuin, Post-Graduate, Assistant, National University of Oil and Gas "Gubkin University", (119991, Russian Federation, Moscow, 65 Leninsky Prospekt, building 1)

Contribution of the authors:

Valeria V. Dmitrieva – setting the objective and tasks, selecting research methods, analyzing and summarizing results.

Dmitry V. Dzyuin – development of the mathematical and computer model, modelling and analyzing the obtained results, determination of further research directions, writing and designing the article, working with the list of references.

Authors have read and approved the final manuscript.

