

**DESIGN AND TESTING OF ELECTROPHYSICAL MODELS
FOR TYPICAL TECHNOLOGICAL INSTALLATIONS
OF A DIAMOND MINING UNDERGROUND MINE**

*Mariya Nikolaevna Semenova ^{1a}, Erchim Dmitrievich Gurinov ¹,
Aytal Alekseevich Popov ¹, Alexander Sergeevich Semenov ^{1, 2}*

¹ Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny Polytechnic Institute, 14 Oyunsky st., 678174, Mirny, Russia

² Western Yakut Scientific Center, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), 5/1 Tikhonov st., 678175, Mirny, Russia

^a mariya_semyonova86@mail.ru

ABSTRACT

Industrial production in our country is the main consumer of electric energy. Currently, electric power systems of industrial enterprises are becoming more complex and energy-intensive. Therefore, the development and design of their electric power systems is difficult without the use of computer and simulation modeling programs. The paper considers issues related to the modeling of electric power and electrical engineering systems. The MatLab package was selected as a modeling program. The calculation of the parameters required for modeling was performed. As a result of the study, electrophysical models of typical technological installations of an underground diamond mine were designed, developed and tested, namely, the following problems were solved: the theoretical foundations of the electric drive were studied; the corresponding blocks were selected from the modeling library; electrophysical models of three types of engines were developed; the obtained results were analyzed and modeling errors were determined. The most effective electric drive systems for use in process units of industrial enterprises are designated.

KEYWORDS

Modeling; MatLab; error; electric drive; electric motor; technological installations; underground mine.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И АПРОБАЦИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕГО ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА**

*Мария Николаевна Семёнова ^{1a}, Эрчим Дмитриевич Гуринов ¹,
Айтал Алексеевич Попов ¹, Александр Сергеевич Семёнов ^{1, 2}*

¹ Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном, ул. Ойунского, 14, 678174, Мирный, Россия

² Западно-Якутский научный центр Академии наук Республики Саха (Якутия), ул. Тихонова, 5/1, 678175, Мирный, Россия

^a mariya_semyonova86@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Промышленное производство в нашей стране является основным потребителем электрической энергии. В настоящее время электроэнергетические системы промышленных предприятий становятся более сложными и энергоемкими, поэтому разработка и проектирование их электроэнергетических систем является затруднительной без применения программ компьютерного и имитационного моделирования. В работе рассмотрены вопросы, связанные с моделированием электроэнергетических и электротехнических систем. В качестве программы моделирования выбран пакет MatLab. Произведен расчет необходимых параметров для моделирования. В результате исследования спроектированы, разработаны и апробированы электрофизические модели типовых технологических установок алмазодобывающего подземного рудника, а именно решались следующие задачи: были изучены теоретические основы электропривода; выбраны соответствующие блоки из библиотеки моделирования; разработаны электрофизические модели трех типов двигателей; проанализированы полученные результаты и определены погрешности при моделировании. Обозначены наиболее эффективные системы электропривода для использования в технологических установках промышленных предприятий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Моделирование; MatLab; погрешность; электропривод; электродвигатель; технологическая установка; подземный рудник.

Введение

Алмазодобывающее производство России сосредоточено в двух регионах: Республике Саха (Якутия) и Архангельской области. Крупнейшие месторождения (кимберлитовые трубки) расположены в Западной Якутии, где в настоящее время идет добыча алмазосодержащих пород подземным способом. К таким месторождениям в том числе относится подземный рудник «Интернациональный» [1–3].

В целом промышленное производство в нашей стране является основным потребителем электрической энергии. На промышленность приходится около 65% всей вырабатываемой ее доли [4]. Электроэнергетические системы (системы электроснабжения и системы электропривода) промышленных предприятий становятся все более сложными и энергоемкими [5]. На некоторых, например горнодобывающих, предприятиях установленная мощность потребителей может достигать 50 МВт, а мощность единичного потребителя может превышать 2 МВт [6]. В связи с этим проектирование, разработка и внедрение электроэнергетических систем на промышленных предприятиях за-

труднительно без использования программ компьютерного и имитационного моделирования [7]. Такое моделирование в последнее время все чаще называют разработкой цифрового двойника той или иной системы предприятия [8]. Однако разработка цифрового двойника электроэнергетической системы невозможна без изучения фундаментальных основ и разработки электрофизических моделей. Такие модели позволяют смело экспериментировать с различными параметрами электрооборудования для выбора оптимального технологического процесса с точки зрения управления и регулирования входными и выходными показателями [9, 10].

К числу программного обеспечения, позволяющего проектировать и создавать такие электрофизические модели, относится пакет программ MatLab [11–13]. В состав MatLab входит библиотека блоков Simulink, содержащая много дополнительных подкаталогов, в том числе SimPowerSystems, который ориентирован на моделирование электромеханических и электроэнергетических систем и устройств. SimPowerSystems содержит набор блоков для моделирования электротехнических устройств, включая мо-

дели пассивных и активных электрических элементов, источников энергии, электродвигателей, трансформаторов, линий электропередачи и другого оборудования. Также имеется раздел, содержащий блоки для моделирования устройств силовой электроники, в том числе систем управления ими. Используя специальные возможности Simulink и SimPowerSystems, можно не только моделировать работу устройств во временной области, но и выполнять различные виды анализа таких устройств. В частности, имеется возможность рассчитать установившийся режим работы системы на переменном токе, рассчитать полное сопротивление участка цепи, получить частотные характеристики, проанализировать устойчивость, а также выполнить гармонический анализ токов и напряжений [14, 15].

Проблематика. При разработке электрофизических моделей систем электропривода или систем электроснабжения технологических установок горнодобывающих предприятий могут возникать некоторые проблемы, которые рассматриваются и решаются в настоящей работе:

- сложность математических моделей – некоторые из них являются многоконтурными или многоканальными, содержат большое количество перекрестных связей, что затрудняет или делает невозможным их использование при разработке систем управления: решается путем перехода от структурного к имитационному (физическому) моделированию;

- учет динамических свойств электропривода – некоторые модели не учитывают динамические свойства электропривода, а другие представляют собой упрощенные модели механической части системы: решается с использованием программного пакета MatLab, который хорошо моделирует динамические системы;

- обеспечение плавного пуска и торможения – система электропривода должна обеспечивать плавный пуск и торможение с ограничением ускорения, меньшие колебания момента и ограничение тока электродвигателя при пуске: решается с исполь-

зованием систем частотно-регулируемого электропривода [16–18], в данной работе не используется;

- учет качества электроэнергии – в процессе частого переключения (включения/выключения) электрооборудования могут возникать переходные процессы, влияющие на качество электроэнергии, также мощное силовое оборудование может генерировать гармонические искажения в системах электроснабжения: решается с использованием в моделях идеальных ключей (выключателей), а также с использованием компенсационных устройств.

Объект и предмет исследования. Исследованием охвачены системы электропривода основных технологических установок алмазодобывающего рудника, таких как вентилятор, насос, компрессор, скиповые и клетевые подъемные установки, а также добычной комбайн. Эти шесть агрегатов являются одними из самых мощных единичных потребителей рудника. Они используют все виды электроприводов: асинхронные, синхронные и постоянного тока. Внешний вид вышеперечисленных технологических установок подземного рудника представлен на рис. 1.

Дадим небольшие описания рассматриваемым технологическим установкам подземного рудника:

1. Главная вентиляторная установка необходима для непрерывного проветривания горных выработок и создания в них нормальных атмосферных условий.

2. Насосная установка необходима для откачки накопившейся воды, которая представляет опасность для оборудования и персонала, повышает риск возникновения аварий и снижает производительность.

3. Компрессорная установка предназначена для подачи сжатого воздуха к рабочим органам пневматических машин и механизмов.

4. Скиповая подъемная установка необходима для транспортировки полезного ископаемого или породы в скипах по рельсовым путям с горизонтов карьера.

5. Клетевая подъемная установка предназначена для перемещения полезно-

го ископаемого, породы, людей, материалов и оборудования в клетях по стволу шахты.

6. Добычный комбайн предназначен для отделения полезного ископаемого от горного массива с одновременной погрузкой его на

забойный конвейер и дальнейшей транспортировки.

Приведем основные электрофизические характеристики перечисленных технологических установок применительно к руднику «Интернациональный» в табл. 1.

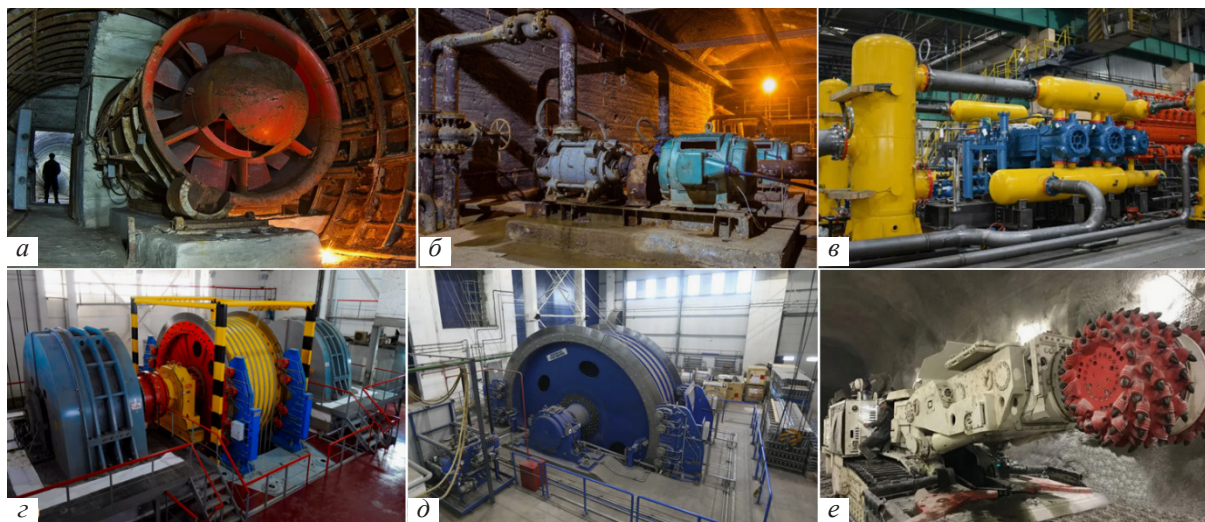


Рис. 1. Внешний вид технологических установок: а – вентиляторная; б – насосная; в – компрессорная; г – скиповая подъемная; д – клетевая подъемная; е – добычной комбайн

Fig. 1. External view of technological installations:
а – fan; б – pump; в – compressor; г – skip; д – cage; е – mining combine

Таблица 1. Характеристики технологических установок, где: ГВУ – главная вентиляторная установка, НУ – насосная установка, КУ – компрессорная установка, СПУ – скиповая подъемная установка, КПУ – клетевая подъемная установка, ДК – добычной комбайн, АД – асинхронный двигатель, СД – синхронный двигатель, ДПТ – двигатель постоянного тока

Table 1. Characteristics of technological installations, where: MFU – main fan unit, PU – pump unit, CU – compressor unit, SHU – skip hoisting unit, CHU – cage hoisting unit, MC – mining combine, AM – asynchronous motor, SM – synchronous motor, DC – direct current motor

Параметр / Parameter	Технологическая установка / Technological installation					
	ГВУ / MFU	НУ / PU	КУ / CU	СПУ / SHU	КПУ / CHU	ДК / MC
Тип двигателя / Motor Type	АД / AM	АД / AM	СД / SM	ДПТ / DC	АД* / AM*	АД / AM
Мощность, кВт / Power, kW	2000	1600	750	2000	600	350
Напряжение, В / Voltage, V	6000	6000	6000	930** / 220***	6000# / 850##	1140
Частота вращения, об/мин / Rotation speed, rpm	750	500	3000	71	250	1500
Ток, А / Current, A	233	197	125	1930	560	307

*с фазным ротором / with phase rotor

**для цепи якоря / for anchor circuit

***для цепи обмотки возбуждения / for the excitation winding circuit

#для цепи статора / for stator circuit

##для цепи ротора / for rotor circuit

Таким образом, целью настоящей работы будет являться проектирование, разработка и апробация электрофизических моделей для типовых технологических установок алмазодобывающего подземного рудника для поиска наиболее эффективных систем электропривода. В рамках достижения данной цели можно сформулировать следующие задачи: изучение теоретических основ электропривода; проектирование электрофизической модели с выбором соответствующих блоков из библиотеки моделирования; разработка электрофизических моделей двигателей: асинхронного, синхронного и постоянного тока; апробация моделей и получение результатов при моделировании реальной технологической установки.

1. Краткая теоретическая часть

Системы электропривода по роду тока делятся на системы переменного тока, где используются асинхронные и синхронные двигатели, и постоянного, где применяются двигатели постоянного тока. Среди асинхронных двигателей чаще применения находят двигатели с короткозамкнутым ротором, среди синхронных двигателей – с постоянными магнитами, среди двигателей постоянного тока – с независимой обмоткой возбуждения [19, 20].

Электродвигатели переменного тока конструктивно состоят из двух электрических частей (цепей): статора и ротора. Все электромеханические процессы, протекающие в цепях статора и ротора, можно записать в виде системы уравнений (1):

$$\begin{cases} \frac{d(i_2)}{dt} = \frac{U - i_2 \cdot (R_s + R_r) \cdot \frac{1-s}{s}}{L_s + L_r} \\ \frac{d(i_m)}{dt} = \frac{U}{L_m} \\ \frac{d(\omega)}{dt} = \frac{M - M_s}{J} \end{cases}, \quad (1)$$

где U – приложенное напряжение, В; L_m – индуктивность магнитопровода, Гн; R_s и R_r – сопротивления статора и ротора, Ом; L_s и L_r – индуктивности статора и ротора, Гн; s – скольжение; M – момент, создаваемый двигателем, Н·м; M_s – момент сопротивления (нагрузка), Н·м; J – момент инерции ротора, кг·м².

Первое и второе уравнения описывают изменения тока ротора и магнитного потока в магнитопроводе во времени соответственно. Третье уравнение отражает динамику изменения угловой скорости ротора.

Электродвигатели постоянного тока также состоят из двух цепей – якоря и обмотки возбуждения. Системы электропривода с двигателем постоянного тока имеют три основных свойства: высокую скорость, надежность и высокую производительность. Однако конструктивно они сложнее и более металлоемкие в производстве. Для мгновенных значений электродвижущей силы, токов и напряжений можно записать дифференциальные уравнения на основании второго закона Кирхгофа для цепей якоря и обмотки возбуждения, а если дополнить их уравнением движения, то получим систему уравнений (2):

$$\begin{cases} \frac{d(i_a)}{dt} = \frac{U_a - i_a \cdot R_a - e}{L_a} \\ \frac{d(i_f)}{dt} = \frac{U_f - i_f \cdot R_f}{L_f} \\ \frac{d(\omega)}{dt} = \frac{M - M_s}{J} \end{cases}, \quad (2)$$

где U_a и U_f – напряжение на якоре и на обмотке возбуждения, В; R_a и R_f – сопротивления якоря и обмотки возбуждения, Ом; L_a и L_f – индуктивности якоря и обмотки возбуждения, Гн; e – ЭДС, индуцируемая в цепи якоря, В; M – момент, создаваемый двигателем, Н·м; M_s – момент сопротивления (нагрузка), Н·м; J – момент инерции, кг·м².

Первое и второе уравнения описывают изменение тока якоря и обмотки возбужде-

ния во времени соответственно. Третье уравнение отражает динамику изменения угловой скорости двигателя постоянного тока. ЭДС якоря можно определить как $e = k_{\phi} \cdot \omega$, где k_{ϕ} – это конструктивный параметр двигателя, который определяется по его номинальным данным.

Таким образом, эти основные уравнения будем применять для определения основных параметров систем электропривода для дальнейшего моделирования. Некоторые параметры, как правило, представлены в паспортных данных двигателя или справочной литературе, а остальные будем рассчитывать по хорошо апробированной методике профессора И. В. Чёрных [21].

2. Методы и методики

Как уже отмечалось ранее, для проектирования и разработки электрофизических моде-

лей систем электропривода технологических установок, а именно асинхронного, синхронного и двигателя постоянного тока, будем использовать подкаталог SimPowerSystems библиотеки Simulink пакета программ MatLab.

Модели будут разрабатываться по схожему алгоритму: выбор необходимых блоков, соединение их в модель, задание начальных параметров для моделирования, получение искомых величин. Будем использовать принципиально простые модели прямого запуска, которые схематично будут состоять из блоков источника напряжения (электропитания), блока двигателя, блока датчиков (измерителей), блоков для отображения измеренных величин [22].

Окно библиотеки Simulink с подкаталогом SimPowerSystems, а также обобщенная структурная модель двигателей показаны на рис. 2.

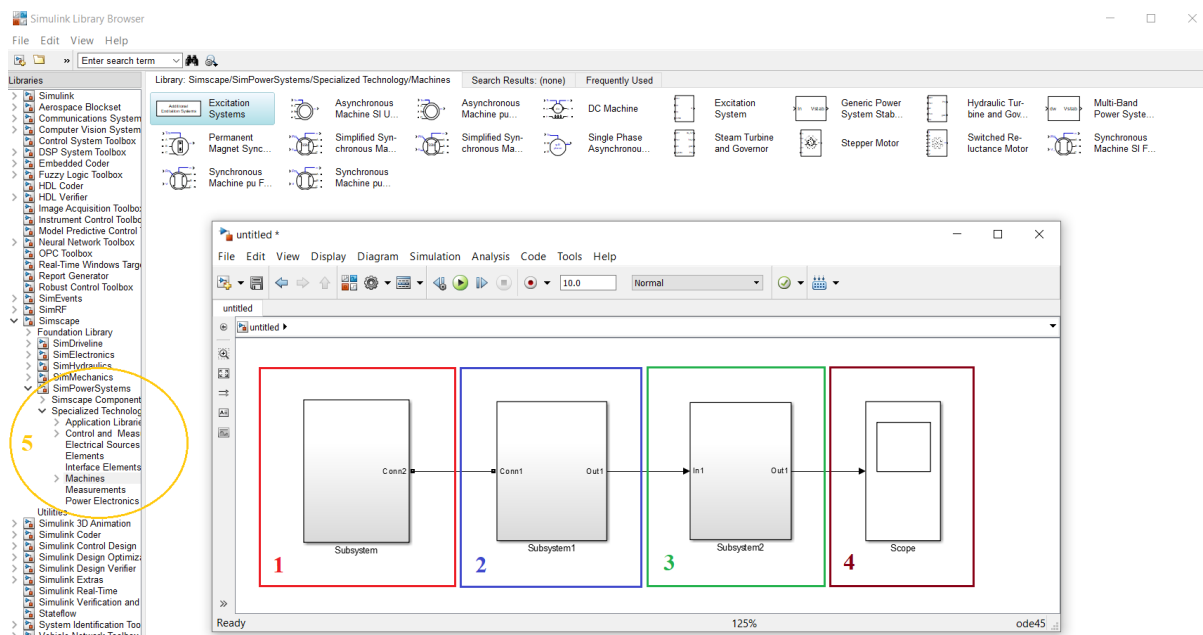


Рис. 2. Процесс разработки модели с открытой библиотекой блоков Simulink:
1 – подсистема источников питания; 2 – подсистема двигателей; 3 – подсистема измерителей и преобразователей; 4 – осциллограф для отображения результатов моделирования;
5 – подкаталогу SimPowerSystems

Fig. 2. The process of design a model with an open library of Simulink blocks:
1 – power supply subsystem; 2 – motor subsystem; 3 – subsystem of meters and converters;
4 – oscilloscope for displaying simulation results;
5 – SimPowerSystems subdirectories

Для задания корректных параметров для дальнейшего моделирования необходимо произвести расчет дополнительных параметров двигателей, отсутствующих в справочных данных, к которым относятся, как правило, сопротивления и индуктивности обмоток различных типов двигателей. Сведем необходимые для моделирования данные в табл. 2, где покажем, какие данные можно найти в паспорте двигателя или справочниках, а какие необходимо будет рассчитать по одной из методик для соответствующего типа двигателя.

Перейдем к проектированию и реализации моделей, а также к результатам моделирования.

3. Результаты исследования

Разработка моделей. Основным блоком в модели системы электропривода на базе двигателя постоянного тока является блок «DC Machine», который обеспечивает набор заданных электрических и механических параметров, таких как мощность, напряжение постоянного тока, номинальная частота вращения и напряжение возбуждения [27].

Таблица 2. Сводная таблица для выбора или расчета основных параметров электродвигателей, необходимых для моделирования, с указанием источника и таблицы или формулы

Table 2. Summary table for selecting or calculating the main parameters of electric motors required for modeling, indicating the source and the table or formula

Параметр / Parameter	Тип двигателя / Motor Type	
	Переменного тока / AC-motor	Постоянного тока / DC-motor
Мощность / Power	[23] (7.6.1)	[23] (8.1.6)
Напряжение / Voltage	[23] (7.6.1)	[23] (8.1.6)
Ток / Current	[24] (2)	[23] (8.1.6)
Коэффициент полезного действия (КПД) / Efficiency	[23] (7.6.1)	[23] (8.1.6)
Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) / Power factor	[23] (7.6.1)	–
Частота вращения / Rotation speed	[23] (7.6.1)	[23] (8.1.6)
Скольжение / Sliding	[23] (7.6.1)	–
Электромагнитный момент / Electromagnetic moment	[25] (7)	[23] (8.1.6)
Момент инерции / Moment of inertia	[23] (7.6.1)	[23] (8.1.6)
Сопротивление статора или якоря / Resistance of the stator or armature	[24] (4)	[26] (1)
Сопротивление ротора или обмотки возбуждения / Resistance of the rotor or field winding	[24] (3)	[26] (3)
Индуктивность статора или якоря / Inductance of the stator or armature	[24] (5, 6)	[26] (2)
Индуктивность ротора или обмотки возбуждения / Inductance of the rotor or field winding	[24] (5, 6)	[26] (4)
Взаимоиндукция между обмотками / Mutual induction between windings	[24] (8)	[26] (5)

В модели системы электропривода на базе синхронного двигателя главным является блок синхронной машины с постоянными магнитами «Permanent Magnet Synchronous Machine», который работает либо в режиме генератора, либо в режиме двигателя, исходя из знака механического момента (положительный – для режима двигателя, отрицательный – для режима генератора) [28].

Для модели системы электропривода на базе асинхронного двигателя блок «Asynchronous Machine» реализует трех-

фазную асинхронную машину (с фазным и одиночным или двойным короткозамкнутым ротором). Для двигателей с одиночным короткозамкнутым ротором предусмотрен набор заданных электрических и механических параметров для различных номинальных значений мощности, межфазного напряжения, частоты питающей сети и номинальной частоты вращения [29].

Разработанные модели для представленных типов двигателей с учетом вышеописанной методики показаны на рис. 3.

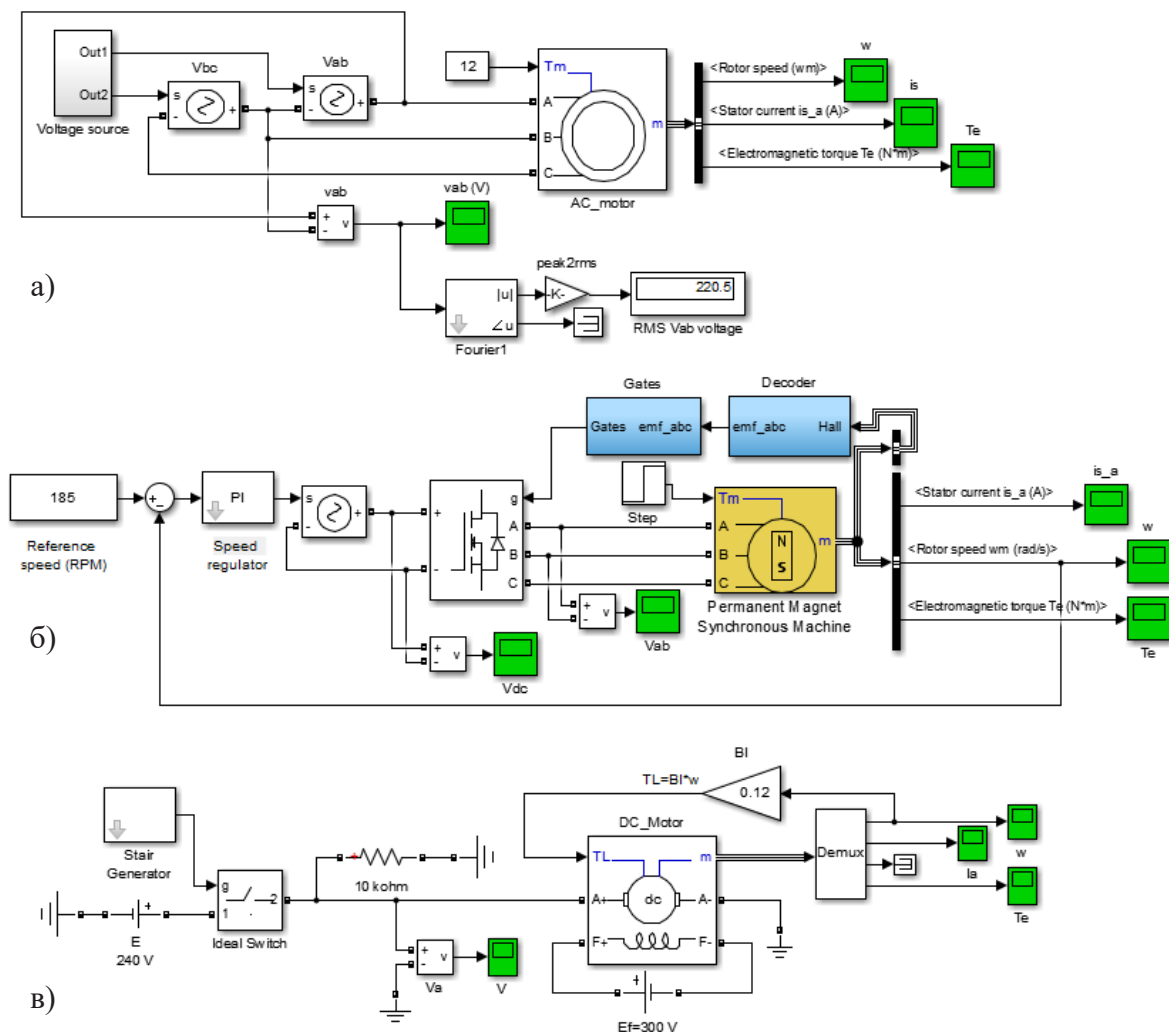


Рис. 3. Электрофизические модели систем электропривода на базе следующих типов двигателей:
а – асинхронный; б – синхронный; в – постоянного тока

Fig. 3. Electrophysical models of electric drive systems based on the following types of motors:
а – asynchronous; б – synchronous; в – direct current

В моделях электродвигатели получают питание от соответствующих источников напряжения. Для асинхронного двигателя – это управляемые источники переменного напряжения, где формируется синусоидальный сигнал; для синхронного двигателя – это управляемый универсальный диодный мост, управляемый импульсами; для двигателя постоянного тока – это независимые источники постоянного напряжения для раздельного питания обмотки якоря и обмотки возбуждения.

Параметры для моделирования. Поскольку все технологические установки имеют разные технические характеристики и паспортные данные своих электродвигателей, для моделирования будем использовать практически одинаковые электрические двигатели по мощности ($3 \div 3,5$ кВт), напряжению ($220 \div 240$ В) и частоте вращения (1750 об/мин), что позволит более адекватно оценить преимущества и недостатки той или иной системы электропривода.

На рис. 4 представлены рассчитанные и подставленные в модель параметры

соответствующих блоков электродвигателей.

Как видно из рис. 4 и как уже отмечалось ранее, основными параметрами, которые подлежали расчету, являются обмоточные данные, т.е. сопротивления и индуктивности обмоток соответствующих типов двигателей.

Результаты моделирования. В качестве результатов моделирования будут оцениваться полученные значения величин частоты вращения, тока и электромагнитного момента, изменяющиеся во времени. Для получения графиков в моделях использовался блок Scope – осциллограф. В качестве типа моделирования бы выбран «Variable step» переменный шаг, в качестве метода моделирования применен ode23tb – решатель систем обыкновенных дифференциальных уравнений, который в начале решения использует неявный метод Рунге-Кутты, а затем применяет формулы обратного дифференцирования 2-го порядка. Несмотря на сравнительно невысокую точность ($85 \div 90\%$), этот метод является более эффективным, чем остальные.

The figure displays three screenshots of motor parameter configuration windows from a simulation software. Each window has tabs for 'Configuration', 'Parameters', 'Advanced', and 'Load Flow'.

- Window (a) - Asynchronous Machine (mask) (link):** Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. Parameters include: Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]: [3*746, 220, 60]; Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Ls(H)]: [0.435 2*2.0e-3]; Rotor resistance and inductance [Rr(ohm) Lr(H)]: [0.816 2.0e-3]; Mutual inductance Lm (H): [69.31e-3]; Inertia, friction factor, pole pairs [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]: [0.089 0 2]; Initial conditions [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0]; Simulate saturation checkbox; Plot button.
- Window (b) - Permanent Magnet Synchronous Machine (mask) (link):** Implements a three-phase or a five-phase permanent magnet synchronous machine. The stator windings are connected in wye to an internal neutral point. Parameters include: Stator phase resistance Rs (ohm): [2.8750]; Stator phase inductance Ls (H): [8.5e-3]; Machine constant Specify: Flux linkage established by magnets (Vs); Flux linkage: [0.175]; Voltage constant: [146.6077]; Torque constant: [1.4]; Back EMF flat area (degrees): [120]; Inertia, viscous damping, pole pairs, static friction [J(kg.m^2) F(N.m.s) p() Tf(N.m)]: [0.8e-3, 1e-3 4]; Initial conditions [wm(rad/s) thetam(deg) ia,ib(A)]: [0, 0, 0, 0];
- Window (v) - DC machine (mask) (link):** Implements a (wound-field or permanent magnet) DC machine. For the wound-field DC machine, access is provided to the field connections so that the machine can be used as a separately excited, shunt-connected or a series-connected DC machine. Parameters include: Armature resistance and inductance [Ra (ohms) La (H)]: [2.581 0.028]; Field resistance and inductance [Rf (ohms) Lf (H)]: [281.3 156]; Field-armature mutual inductance Laf (H): [0.9483]; Total inertia J (kg.m^2): [0.02215]; Viscous friction coefficient Bm (N.m.s): [0.002953]; Coulomb friction torque Tf (N.m): [0.5161]; Initial speed (rad/s): [1]; Initial field current: [1];

Рис. 4. Параметры, используемые для моделирования следующих типов двигателей:

а – асинхронный; б – синхронный; в – постоянного тока

Fig. 4. Parameters used to model the following types of electric motors:

а – asynchronous; б – synchronous; в – direct current

Время моделирования для всех моделей устанавливалось в течение 1 секунды, этого достаточно, чтобы двигатель после подачи питания запустился и вышел на свои номинальные рабочие параметры. На рис. 5 представлены графические результаты моделирования, которые для удобства последующего анализа интерпретированы в виде

табл. 3 с точными полученными параметрами.

На рис. 5 красными маркерами дополнительно показаны максимальные и номинальные параметры, а также время установления переходного процесса при запуске электродвигателей. Сведем эти параметры в табл. 3 для последующей их оценки.

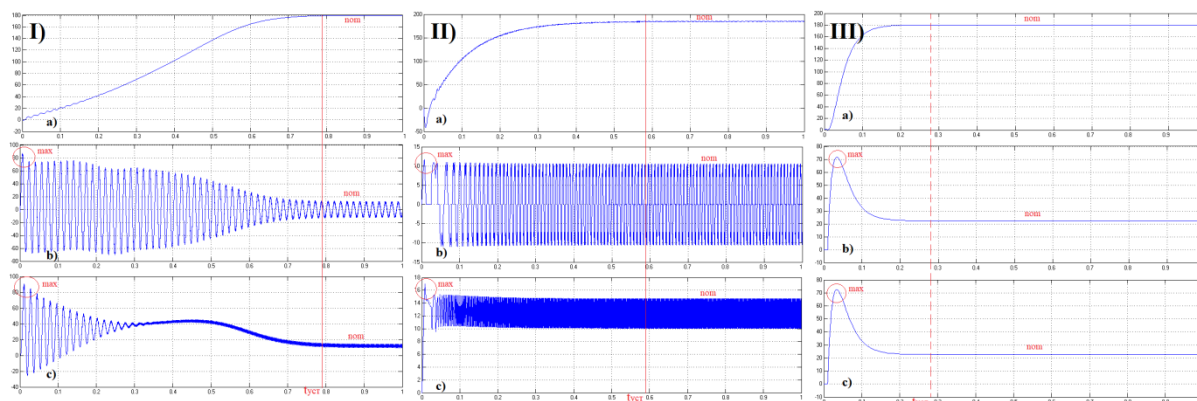


Рис. 5. Результаты моделирования:

а – частоты вращения; б – тока; в – электромагнитного момента, для соответствующего типа электродвигателя: I – асинхронного; II – синхронного; III – постоянного тока

Fig. 5. Simulation results:

a – rotational speed; б – current; в – electromagnetic torque, for the corresponding type of electric motor: I – asynchronous; II – synchronous; III – direct current

Таблица 3. Параметры электродвигателей, полученные в результате моделирования

Table 3. Parameters of electric motors obtained as a result of simulation

Параметр / Parameter	Тип двигателя / Motor Type		
	АД / AM	СД / SM	ДПТ / DC
Частота вращения, рад/с / Rotation speed, rad/s	179,83	185,5	180,15
Время установления переходного процесса, с / The time of establishment of the transition process, sec	0,795	0,584	0,275
Пусковой ток, А / Starting current, A	87	11,7	71,5
Номинальный ток, А / Nominal current, A	12	10,55	22,4
Пусковой электромагнитный момент, Н·м / Starting electromagnetic moment, N·m	90,5	17	72,4
Номинальный электромагнитный момент, Н·м / Nominal electromagnetic moment, N·m	14,5	14,7	22,66

Из полученных результатов видно, что быстрее всего запуск (выход на номинальную частоту вращения) происходит у двигателя постоянного тока, однако наиболее стабильную работу и наименьшую погрешность (1,2%) по показателю «частота вращения» показывает синхронный двигатель. Также синхронный двигатель показывает наименьшие значения по отношениям кратности пусковых к номинальным току и моменту, которая составляет 1,1 и 1,15 соответственно, тогда как у асинхронного двигателя этот показатель равен 7,2 и 6,2 соответственно. В тоже время стоит отметить, что для асинхронного двигателя такие пусковые характеристики являются допустимыми, хотя и, несомненно, они оказывают пагубное воздействие на обмотки двигателя, приводя к их чрезмерному нагреву и старению изоляции.

Обсуждение результатов. Чтобы более детально количественно и качественно оценить результаты моделирования и определить наиболее эффективную систему электропривода для использования в технологических установках горных предприятий, сопоставим их с расчетными данными и определим погрешности в результатах.

Во время сопоставления вычислим абсолютную и относительную погрешности результатов произведенного моделирования для частоты вращения, тока и электромагнитного момента. Абсолютной погрешностью числа называют разницу между полученным числом и его точным значением. Относительной погрешностью называют отношение абсолютной погрешности числа к самому этому числу.

Для определения абсолютной погрешности воспользуемся формулой $\Delta i = i - i_n$. Тогда относительная погрешность будет определяться по формуле $\varepsilon = \frac{\Delta i}{i} \cdot 100\%$, где i – исследуемый параметр; i_n – номинальное значение параметра. Номинальные значения определим, исходя из паспортных данных, по следующим формулам: номинальная частота вращения $\omega_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60}$, номинальный ток $I_n = \frac{P_n}{U}$, номинальный электромагнитный момент $M_n = \frac{P_n}{\omega_n}$. Результаты сопоставления и определения погрешностей представим в табл. 4.

Таблица 4. Результаты сопоставления данных и определения погрешностей, где в соответствующих столбцах обозначены: 1 – данные полученные при моделировании, 2 – расчетные значения, 3 – относительная погрешность в %

Table 4. The results of data comparison and error determination, where the corresponding columns indicate: 1 – data obtained during modeling, 2 – calculated values, 3 – relative error in %

Параметр / Parameter	Тип двигателя / Motor Type								
	АД / AM			СД / SM			ДПТ / DC		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Номинальная частота вращения, рад/с / Nominal rotation speed, rad/s	179,83	183,2	1,9	185,5	183,2	1,2	180,15	183,2	1,7
Номинальный ток, А / Nominal current, A	12	13,6	13,3	10,55	13,6	28,9	22,4	18,2	18,7
Номинальный электромагнитный момент, Н·м / Nominal electromagnetic moment, N·m	14,5	16,37	12,9	14,7	16,37	11,3	22,66	19,1	15,7

Как видно из таблицы, только для асинхронного двигателя результаты моделирования по сравнению с расчетными параметрами не превышают погрешности в 15%.

Такая погрешность может обуславливаться как относительно невысокой точностью метода моделирования ode23tb, так и определенными погрешностями и допущениями при расчете параметров двигателей для моделирования. В этом случае погрешность можно уменьшить, применив автоматизированную систему расчета параметров все в том же пакете программ MatLab, написав для этого специальные программы с помощью встроенных инструментов [30].

По энергетическим показателям, полученным в результате моделирования, можно сказать, что оптимальным для использования в системах электропривода технологических установок горных предприятий является синхронный двигатель, и на самом деле такой тип двигателя все больше находит применение в различных технологических установках. Однако более простая конструкция асинхронного двигателя, возможность его прямого пуска и широкий ряд мощностей делают его в данный момент самым распространенным типом двигателя в промышленности. Двигатель постоянного тока применяется все реже, несмотря на его явные преимущества при управлении частотой вращения, так как он не может быть включен напрямую в сеть переменного напряжения и требует дополнительных устройств для запуска.

Выводы

В заключение стоит отметить, что были спроектированы, разработаны и апробированы электрофизические модели для типовых технологических установок алмазодобывающего подземного рудника для поиска наиболее эффективных систем электропривода. В работе были рассмотрены такие технологические установки, как вентиляторная установка, насосная установка, компрессор-

ная установка, скиповая и клетевая подъемные установки, а также добычной комбайн. Для достижения цели работы были решены следующие задачи: изучены теоретические основы электропривода; спроектированы и разработаны электрофизические модели асинхронного двигателя, синхронного двигателя и двигателя постоянного тока с выбором соответствующих блоков из библиотеки моделирования Simulink/MatLab; произведена апробация моделей практически одинаковых электрических двигателей для удобства и объективности анализа полученных результатов; получены результаты моделирования, а также оценены погрешности. В результате исследования сделаны следующие выводы:

1. Быстрее всего запуск (выход на номинальную частоту вращения) происходит у двигателя постоянного тока – за 0,275 с;
2. Наиболее стабильную работу и наименьшую погрешность (1,2%) по показателю «частота вращения» показывает синхронный двигатель;
3. Синхронный двигатель показывает наименьшие значения по отношениям кратности пусковых к номинальным току и моменту, которые составляют 1,1 и 1,15 соответственно;
4. Только у асинхронного двигателя результаты моделирования по сравнению с расчетными параметрами для всех параметров не превышают погрешности в 15%.

Таким образом, более частое применение асинхронного двигателя для приведения в движение технологических установок в промышленности является обоснованным и подтверждается нашими результатами моделирования. Однако другие типы двигателей также имеют некоторые преимущества и находят применение в характерных для них установках, учитывающих особенности режима и продолжительности работы.

Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена при поддержке проекта «Сириус.Лето: Начни свой проект. Сезон

2024/2025», заявка №732820, руководитель А.С. Семёнов.

The work was carried out with the support of program “Sirius.Summer: Start your project”. Season 2024/2025, application No.732820, head A.S. Semenov.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Govorov Z.N., Petrova L.V. ON the technology of stowing operations at the “International” mine // Vestnik of North-Eastern Federal University. Series “Earth Sciences”. 3(19), 5–10 (2020). (In Russian) [Говоров З.Н., Петрова Л.В. К вопросу технологии закладочных работ на руднике «Интернациональный» // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. 3(19), 5–10 (2020)]. DOI: 10.25587/SVFU.2020.19.3.001
2. Kopin S.V. THE substantiation of fresh air flow rate for lower horizons of the “International” mine of ALROSA diamond-mining company (PJSC) // Occupational Safety in Industry. 2, 76–81 (2024). (In Russian) [Копин С.В. Обоснование дебита свежего воздуха для нижних горизонтов рудника «Интернациональный» АК «АЛРОСА» (ПАО) // Безопасность труда в промышленности. 2, 76–81 (2024)]. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-2-76-81
3. Nikiforov A.V., Zolotin V.G., Vyunikov A.A., Vorozhtsov S.G. Analysis of the results of adaptation of the current method of forecasting the risk of emissions in the conditions of the Internatsionalny mine of ALROSA (PJSC) // Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth. 1, 759–772 (2025). (In Russian) [Никифоров А.В., Золотин В.Г., Вьюников А.А., Ворожцов С.Г. Анализ результатов адаптации текущего способа прогноза выбросоопасности в условиях рудника «Интернациональный» АК АЛРОСА (ПАО) // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 1, 759–772 (2025)].
4. Ryabchitskii M.V., Vorontsov K.K. Advantages of digital power supply monitoring systems // Energy Systems. 1, 46–51 (2022). (In Russian) [Рябчицкий М.В., Воронцов К.К. Преимущества систем цифрового мониторинга электроснабжения // Энергетические системы. 1, 46–51 (2022)]. DOI: 10.34031/ES.2022.1.005
5. Sapsalev A.V., Brovanov S.V., Kharitonov A.S. To the question of energy saving in electromechanical systems // Modern High Technologies. 1, 85–90 (2022). (In Russian) [Сапсалева А.В., Брованов С.В., Харитонов А.С. К вопросу энергосбережения в электромеханических системах // Современные наукоемкие технологии. 1, 85–90 (2022)]. DOI: 10.17513/snt.39014
6. Petrov V.L., Kuznetsov N.M., Morozov I.N. Electric energy demand management in mining industry using smart power grids // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2, 169–180 (2022). (In Russian) [Петров В.Л., Кузнецов Н.М., Морозов И.Н. Управление спросом на электроэнергию в горнопромышленном секторе на основе интеллектуальных электроэнергетических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2, 169–180 (2022)]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_169
7. Semenov A.S., Bebikhov Yu.V., Vasilyev P.F., Kharitonov Ya.S. Evaluation of the simulation results of various electric drive systems of a mining enterprise // Vestnik Chuvashskogo universiteta. 3, 113–122 (2021). (In Russian) [Семёнов А.С., Бебихов Ю.В., Васильев П.Ф., Харитонов Я.С. Оценка результатов моделирования различных систем электропривода технологической установки горного предприятия // Вестник Чувашиского университета. 3, 113–122 (2021)]. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-113-122
8. Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Sokolov D.V., Mayorov G.S. Design of integrated energy systems based on their digital twins // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics. 1, 13–30 (2025). (In Russian) [Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В., Майоров Г.С. Проектирование интегрированных энергетических систем на основе их цифровых двойников // Известия Российской академии наук. Энергетика. 1, 13–30 (2025)]. DOI: 10.31857/S0002331025010021
9. Vishnyakov D.D., Solodky E.M., Petrochenkov A.B., Yudin R.Yu., Salnikov S.V. An optimum control method to improve the power efficiency of an electrically driven centrifugal pump // Russian Electrical Engineering. 93(11), 728–731 (2022).
10. Yudin R.Y., Petrochenkov A.B., Solodkiy E.M., Vishnyakov D.D., Salnikov S.V. A study of finite control systems for permanent-magnet synchronous motors // Russian Electrical Engineering. 94(11), 779–785 (2023).
11. Iudin R., Petrochenkov A., Solodkiy E., Vishnyakov D., Krause B., Salnikov S. Software complex for sensorless control of an electrical submersible pump // IEEE Sensors Journal. 24(1), 830–843 (2024).
12. Semenov A., Semenova M., Bebikhov Y., Egorov A., Vasilyev P., Kharitonov Y. Vibrating feeder electromagnetic drive model implemented in MatLab/Simulink // Proceedings – ICOECS 2021: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. 88–92 (2021).
13. Semenov A.S., Bebikhov Yu.V., Yakushev I.A., Fedorov O.V. Implementation of pi-speed controller of dc motor by mathematical modeling // Omsk Scientific Bulletin. 4(184), 75–81 (2022). (In Russian) [Семёнов А.С., Бебихов Ю.В., Якушев И.А., Федоров О.В.

Реализация PI-регулятора скорости двигателя постоянного тока методом математического моделирования // Омский научный вестник. 4(184), 75–81 (2022)]. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-75-81

14. Bebikhov Yu.V., Semenov A.S., Semenova M.N., Yakushev I.A. Application of mathematical modeling for solving linear algebraic and ordinary differential equations // Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Natural and Technical Sciences. 4, 29–36 (2019). (In Russian) [Бebихов Ю.В., Семёнов А.С., Семёнова М.Н., Якушев И.А. Применение математического моделирования для решения линейных алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 4, 29–36 (2019)].

15. Semenov A.S., Yakushev I.A., Egorov A.N. Mathematical modelling of technical systems in the MatLab // Modern High Technologies. 8, 56–64 (2017). (In Russian) [Семёнов А.С., Якушев И.А., Егоров А.Н. Математическое моделирование технических систем в среде MatLab // Современные наукоемкие технологии. 8, 56–64 (2017)].

16. Gulyaev I.V., Pogodina S.A., Mikhailov V.V., Gruzdev V.V., Kryukov O.V. System and method of optimal powerful control ac electric drives // Automation and IT in Energy Industry. 12(149), 20–25 (2021). (In Russian) [Гуляев И.В., Погодина С.А., Михайлов В.В., Груздев В.В., Крюков О.В. Система и метод оптимального управления мощными электроприводами переменного тока // Автоматизация и ИТ в энергетике, 12(149), 20–25 (2021)].

17. Petrov V.L., Pichuev A.V. Assessing the efficiency of measures to enhance electric power quality in variable-frequency drive for scraper conveyors // Mining Science and Technology. 9(1), 60–69 (2024). (In Russian) [Петров В.Л., Пичуев А.В. Оценка эффективности средств повышения качества электроэнергии в системе частотно-регулируемого электропривода скребковых конвейеров // Горные науки и технологии. 9(1), 60–69 (2024)]. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-01-198

18. Ganjavi A., Kumar D., Zare F., Abbosh A.M., Rathnayake H., Davari P. Effect of choke placement on common-mode noise in three-phase variable speed drives // IEEE Transactions on Industry Applications. 58(5), 6253–6265 (2022).

19. Kaplun V., Chuenko R., Makarevych S. Investigation of energy parameters of a compensated asynchronous motor in the mode of repeated short-term starts // Machinery & Energetics. 13(3), 25–33 (2022).

20. Chung J., Hofmann H. Brushless self-excited synchronous field-winding machine with five- and higher-

phase design using independently controlled spatial harmonics // IEEE Transactions on Energy Conversion. 39(1), 533–543 (2024).

21. Zhivoglyadov E.V., Chernykh I.V. Dynamic calculation of a linear induction motor using FEMLAB software // Russian Electrical Engineering. 77(1), 46–52 (2006).

22. Semyonov A.S. Simulation of operating modes of the asynchronous motor in MATLAB software package // Vestnik of North-Eastern Federal University. 11(1), 51–59 (2014). (In Russian) [Семёнов А.С. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя в пакете программ MATLAB // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 11(1), 51–59 (2014)].

23. Aliyev I.I. Handbook of Electrical Engineering and Electrical Equipment: Textbook for Universities. 3rd. ed., corr. (In Russian) [Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: учебн. пособие для вузов. 3-е изд., испр. М.: Высш. шк., 2002. 255 с.].

24. Zagolilo S.A., Semenov A.S., Semenova M.N., Yakushev I.A. Computer modeling of multi-motor electric drive system in MATLAB software // Modeling, Optimization and Information Technology. 8(2), 1–18 (2020). (In Russian) [Заголило С.А., Семёнов А.С., Семёнова М.Н., Якушев И.А. Компьютерное моделирование многодвигательной системы электропривода в пакете программ MATLAB // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 8(2), 1–18 (2020)]. DOI: 10.26102/2310-6018/2020.29.2.012

25. Semenov A., Yakushev I., Kharitonov Y., Shevchuk V., Gracheva E., Ilyashenko S. Calculation of load diagrams and static characteristics of multimotor electric drive systems using the methods of equivalent forces and reduced moments // International Journal of Technology. 11(8), 1537–1546 (2020).

26. Bebikhov Y.V., Semenov A.S., Semenova M.N., Yakushev I.A. Analysis of methods of modeling technical systems in MATLAB // Modeling, Optimization and Information Technology. 7(3), 12 (2019). (In Russian) [Бebихов Ю.В., Семёнов А.С., Семёнова М.Н., Якушев И.А. Анализ методов моделирования технических систем в среде MATLAB // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 7(3), 12 (2019)].

27. Alotaibi A., Alzuabi R. Power analysis and speed control of dc motor drive using MatLab simulation // International Journal of Current Engineering and Technology. 12(3), 218–222 (2022).

28. Tuan Ph.V., Huy N.Q., Long N.T., Cong Ha.H., Ha Vo.T. Direct torque control of an interior permanent

magnet synchronous motor // International Journal of Electrical and Electronics Engineering. 9(7), 1–5 (2022).

29. Khanahmedova S., Jeyhun A. Modeling of the main asynchronous motor parameters // Science Bulletin. 2(1), 1131–1134 (2025).

30. Semenova M.N., Yakushev I.A., Zarovnyaeva S.S. The choice of the optimal method for modeling electric drive systems // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. 9271233 (2020).