ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(3):81-96
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 62-133.33 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_3_0_81

ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМА ЭКСКАВАТОРА-ДРАГЛАЙНА

В.В. Дмитриева[1], А.Э. Аринич[1], П.Е. Сизин[2]

[1] Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия
[2] НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: mstranger@list.ru

Аннотация: Целью исследования является повышение эффективности приводов экскаватора-драглайна на горнодобывающих предприятиях, снижение затрат на выемку и перевалку горной массы и уменьшение энергетических затрат. В качестве способа повышения эффективности предлагается заменить электропривод постоянного тока на частотно-регулируемый асинхронный электропривод с прямым управлением моментом. Основным инструментом исследования является разработанная математическая модель асинхронного частотно-управляемого электропривода, позволяющая рассмотреть переходные процессы асинхронных двигателей и подъемного механизма экскаватора, изменение скорости вращения двигателя при отработке технологического цикла, изменение крутящего момента двигателя и усилий в подъемных канатах. В работе подробно описана процедура разработки такой модели с использованием библиотек Matlab/Simulink и SimPowerSystem. Методы исследования основаны на современной теории электропривода, теории управления и методах математического моделирования. Авторы предлагают использовать метод частотного регулирования с прямым управлением моментом и рекомендуют его реализацию – алгоритмическую и техническую. Использование частотно-регулируемого привода с асинхронным двигателем позволяет более точно отрабатывать технологическую программу работы, существенно снизить затраты на разработку грунта и отгрузку горной массы в карьерах, уменьшить энергопотребление, снизить износ основных узлов. Практические результаты исследования заключаются в следующем: разработана математическая модель частотно-регулируемого привода подъема экскаватора-драглайна, опробован алгоритм отработки технологического цикла. Сделаны предложения по выбору отечественного оборудования для частотно-регулируемого привода.

Ключевые слова: повышение экономической эффективности, экскаватор-драглайн, асинхронный двигатель, частотно-регулируемый электропривод, прямое управление моментом, частотный преобразователь, математическая модель.

Для цитирования: *Дмитриева В. В., Аринич А. Э., Сизин П. Е.* Применение частотно-регулируемого асинхронного двигателя для электропривода подъема экскаватора-драглайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 3. – С. 81–96. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_3_0_81.

© В.В. Дмитриева, А.Э. Аринич, П.Е. Сизин. 2026.

The use of variable frequency induction motor for electric lifting actuator of dragline

V.V. Dmitrieva[1], A.E. Arinich[1], P.E. Sizin[2]

[1] Russian State University of Oil and Gas (Gubkin National Research University), Moscow, Russia
[2] NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: mstranger@list.ru

Abstract: The aim of the research is enhancement of efficiency of dragline drives in mines, cost saving in excavation and re-excavation of rocks and reduction of energy consumption. As a way of enhancing efficiency, it is proposed to replace DC drives by variable frequency induction motors with direct control of moment. The main tool of the research is the developed mathematical model of a variable frequency induction motor, which allows investigating transient processes in the motors and lifting actuators of draglines, as well as changes in rotation speed of the motors within a work cycle, in the torque of the motor and in the forces in the lift cables. The article offers a detailed description of the development of the model, using Matlab/Simulink and SimPowerSystem libraries. The research used the modern theory of electric motor drives, control science and mathematical modeling. The authors suggest to use the method of the direct moment and frequency control and recommend its implementation—algorithmic and technical. The use of the variable frequency induction motors leads to better functioning of the technology cycle, substantial saving of cost of rock excavation and haulage in open pit mines, reduction of energy consumption and wear of major assemblies. The working knowledge of the research includes the developed mathematical model of the variable frequency induction motor for lifting actuators of draglines and the approved algorithm of the technology work cycle. The authors make some proposals on selection of home equipment for variable frequency motors.

Key words: enhancement of economic efficiency, dragline, induction motor, variable frequency motor, direct control of moment, variable speed drive, mathematical model.

For citation: Dmitrieva V. V., Arinich A. E., Sizin P. E. The use of variable frequency induction motor for electric lifting actuator of dragline. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(3):81-96. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_3_0_81.

Введение

Мощные экскаваторы-драглайны являются основными машинами, обеспечивающими вскрышные работы при освоении месторождений угля. С их надежностью, производительностью и эффективностью напрямую связана и эффективность горнодобывающих предприятий. До недавнего времени приводы экскаваторов-драглайнов оснащались двигателями постоянного тока. Использование частотно-управляемого асинхронного двигателя (АД) является существенной модернизацией в управлении горными машинами [1]. Исполнительный механизм преобразователя частоты — асинхронного двигателя (ПЧ-АД) позволяет обеспечить высокую надежность и долговечность приводов, поскольку, в отличие от двигателей постоянного тока, асинхронные двигатели не имеют подвижных контактов, следовательно, значительно сокращается частота возникновения механических неисправностей, улучшается искробезопасность, снижаются расходы на обслуживание. Это особенно важно для экскаваторов, где простои из-за поломок электрооборудования могут достигать 30% [2]. Система ПЧ-АД обеспечивает плавное и

точное регулирование скорости и момента, что улучшает управляемость экскаватора в различных технологических режимах [3]. Используя электрическое торможение асинхронного двигателя, реализуемое в системе, можно обеспечить надежную и безопасную остановку машины в случае аварии.

Характеристика горных машин

Проведя анализ основных характеристик горных машин, можно выявить следующие особенности, которые определяют дальнейший выбор принципов управления:

- интенсивный повторно-кратковременный режим работы;
- резко изменяющийся момент нагрузки на валу двигателя, способный создать стопорный режим;
- наличие в составе горной машины механических элементов, обладающих низкой жесткостью;
- влияние на характер нагрузки электропривода случайных факторов, возникающих из-за неопределенности внешних условий эксплуатации горной машины.

Выбор системы управления

Рассмотрим основные системы управления асинхронными двигателями. Как известно, для АД может использоваться скалярное управление, векторное и прямое управление моментом [4].

Скалярное управление скоростью АД, которое реализуется за счет одновременного изменения частоты и модуля напряжения статора, применяется для тех рабочих механизмов, для которых важно поддерживать скорость вращения двигателя, от которой зависят технологические параметры процесса, например напор и подача у насосов, скорость движения полотна ленточного конвейера и т.д.

При использовании векторного управления происходит независимое управление магнитным потоком и моментом двигателя. В отличие от скалярного управления, где регулируется только частота и амплитуда напряжения, векторное управление оперирует токами статора в их векторной форме. При векторном управлении можно работать как без датчика скорости, вычисляя скорость вращения по математической модели АД и данных о мгновенных значениях тока и напряжения, так и используя обратную связь, которая обеспечит большую точность управления двигателем. Векторное управление обеспечивает стабильную работу двигателя и высокий КПД даже при значительных изменениях нагрузки.

Таблица 1

Сравнение различных систем управления
Comparison of different control systems

Показатели	Скалярное управление без датчика скорости	Векторное управление с широтно-импульсной модуляцией и датчиком скорости	Система DTC	
			с датчиком скорости	без датчика скорости
Линейность, %	±12	±4	±3	±4
Время реакции, мс	150	12 — 20	1 — 2	1 — 2
Статистическая точность, %	±(1 — 3)	±0,01	±0,01	±(0,01 — 0,05)
Динамическая точность, %	3	0,3	0,1	0,3
Сложность обработки	низкий	высокий	низкий	низкий
Время цикла контроля, мкс	10 — 30	100 — 500	10 — 30	10 — 30

И, наконец, прямое управление моментом (DTC) — метод, который позволяет мгновенно управлять магнитным потоком двигателя и электромагнитным моментом. Идея заключается в формировании заданного электромагнитного момента путем прямого воздействия вектора напряжения статора на вектор потока статора [5, 6].

Эффективность подобного управления утверждалась ранее [7]. Подтвердим это, используя такие показатели, как время реакции, точность и т.д. Для наглядности основные показатели сведем в табл. 1.

Попробуем применить для решения задачи управления приводами экскаватора-драглайна систему DTC, так как эта система обладает быстрым откликом на изменения, а также низкими требованиями к сложности обработки сигнала. Далее рассмотрим основной принцип работы данной системы

Метод прямого управления моментом

Математической моделью системы DTC (прямое управление моментом) являются два уравнения для обобщенной электрической машины в неподвижной системе координат и выражения для электромагнитного момента *M* через потокосцепления ψ_1 и ψ_2 статора и ротора [8, 9]:

$$\dot{U}_{1\alpha\beta} = R_s \dot{I}_{\alpha\beta} + \frac{d}{dt}\dot{\Psi}_{\alpha\beta}, \qquad (1)$$

$$M = \frac{3}{2} p \frac{K_1}{\sigma L_2}\left(\psi_{1\beta}\psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha}\psi_{2\beta}\right), \qquad (2)$$

где $K_1 = \frac{L_m}{L_1}$ — безразмерный коэффициент; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}$ — коэффициент рассеяния машины.

Выразим из (1) и (2) проекции Ψ_1 и Ψ_2 и момента *M* на неподвижные оси системы координат α и β:

$$\psi_{1\alpha} = \psi_{1\alpha\,нач} + \Delta\psi_{1\alpha} = \\ = \psi_{1\alpha\,нач} + U_{1\alpha}\Delta t, \qquad (3)$$

$$\psi_{1\beta} = \psi_{1\beta\,нач} + \Delta\psi_{1\beta} = \\ = \psi_{1\beta\,нач} + U_{1\beta}\Delta t \qquad (4)$$

Таблица 2

Таблица переключения
Switching table

Изменение параметра		№ сектора					
		1 [0, π/3]	**2 [π/3, 2π/3]**	**3 [2π/3, π]**	**4 [–π, –2π/3]**	**5 [2π/3, –π/3]**	**6 [–π/3, 0]**
Увеличение потока Ψ_1	увеличение момента M	$\dot{U}_{(110)}^{12}$	$\dot{U}_{(010)}^{13}$	$\dot{U}_{(011)}^{14}$	$\dot{U}_{(001)}^{15}$	$\dot{U}_{(101)}^{16}$	$\dot{U}_{(100)}^{11}$
	уменьшение момента M	$\dot{U}_{(101)}^{16}$	$\dot{U}_{(100)}^{11}$	$\dot{U}_{(110)}^{12}$	$\dot{U}_{(010)}^{13}$	$\dot{U}_{(011)}^{14}$	$\dot{U}_{(001)}^{12}$
Уменьшение потока Ψ_1	увеличение момента M	$\dot{U}_{(110)}^{13}$	$\dot{U}_{(011)}^{14}$	$\dot{U}_{(001)}^{15}$	$\dot{U}_{(101)}^{16}$	$\dot{U}_{(100)}^{11}$	$\dot{U}_{(110)}^{12}$
	уменьшение момента M	$\dot{U}_{(100)}^{15}$	$\dot{U}_{(101)}^{16}$	$\dot{U}_{(100)}^{11}$	$\dot{U}_{(110)}^{12}$	$\dot{U}_{(010)}^{13}$	$\dot{U}_{(011)}^{14}$

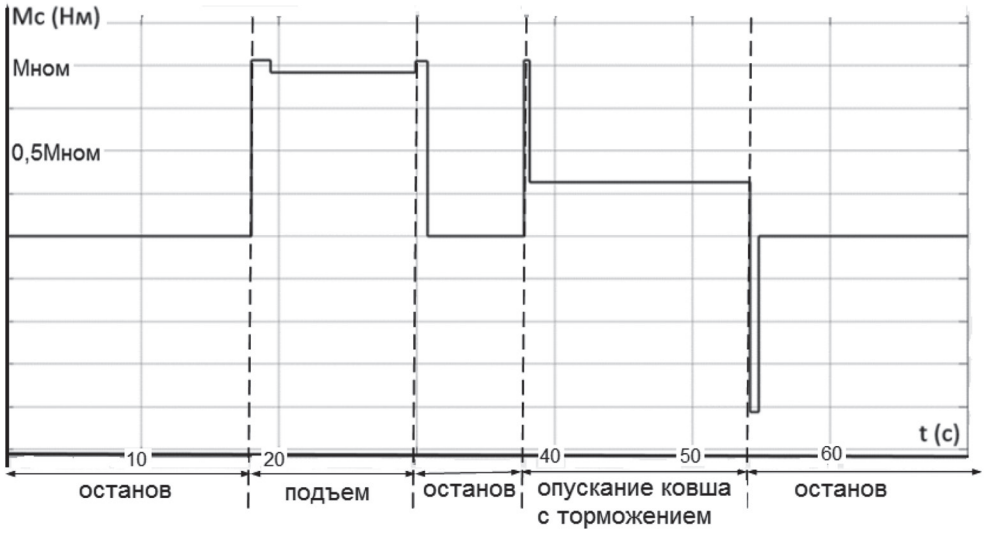

Рис. 1. Нагрузочная диаграмма привода подъема ЭШ 10-70
Fig. 1. Loading diagram of the 10-70 excavator dragline lifting drive

$$M = \frac{3}{2} p \frac{U_1}{\sigma L_2} |\dot{\psi}_1| |\dot{\psi}_2| \sin\theta, \qquad (5)$$

где $\psi_{1\alpha нач}$, $\psi_{1\beta нач}$ — начальные значения проекций вектора потокосцепления, до изменения вектора $\dot{U}_1$; Δt — интервал времени действия нового вектора напряжения $\dot{U}_1$; Θ — угол между ψ_1 и ψ_2.

Из (3) — (5) видно, что воздействуя на значение вектора $\dot{U}_1$, можно изменять значение вектора ψ_1 и угол Θ. При этом будет соответствующим образом изменяться момент M.

Результат различных вариаций параметров можно свести в табл. 2.

Выбор двигателя

Для исследования был взят драглайн ЭШ 11/75. Его назначение — вскрышные работы с укладкой породы в выработанное пространство или на борт карьера. Вместимость ковша этой модификации 11 м^3, длина стрелы 75 м, максимальная концевая нагрузка 330 кН, продолжительность рабочего цикла 54 с.

На рис. 1 построен пример нагрузочной диаграммы привода подъема при выполнении одного производственного цикла, включающего операции подъема ковша–останова–спуска.

Будем рассматривать электропривод подъема (ЭПП). Электропривод двухдвигательный, мощность ЭПП 2×500 кВт, используются двигатели постоянного тока, управляемые по схеме «генератор — двигатель» ГД. Для замены выберем асинхронные двигатели, опираясь на требуемую мощность.

Таким образом был выбран асинхронный двигатель AFD-630. Основные характеристики двигателя приведем в табл. 3.

Таблица 3

Технологические параметры двигателя AFD-630
Technological parameters of the AFD-630 engine

Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток, А	Движущий момент, Нм	Диапазон скоростей, об/мин	КПД, %	Взрывозащита	Момент инерции, кг*м^2
630	660	653	6056	0-1800	96	есть	36,24

Таблица 4

Сравнение результатов работы разных методик расчета
Comparison of the results of different calculation methods

Основные характеристики двигателя в относительных единицах		$i_п$ (о.е)	$i_н$ (о.е)	$m_п$ (о.е.)	$m_{макс}$ (о.е)	$m_н$ (о.е)
МЕТОДИКА	Многокритериальная с учетом вытеснения тока	5,4	1,0	1,0	2,09	1,0
	Итерационная многокритериальная	4,6	1,0	0,38	2,4	1,13
	Усольцев А.А.	3,8	1,0	0,29	2,0	1,0
	Терехин В.Б.	5,6	1,0	1,0	2,82	0,86
	Герман-Галкин С.Г.	10	1,0	1,92	4,87	1,13

Определение параметров модели двигателя

Для моделирования необходимо определить параметры двигателя, для этого воспользуемся несколькими существующими методиками [9] и выберем из этих методик самую точную. Для удобства анализа сведем данные в табл. 4. Величины $i_п$ (пусковой ток, А), $i_н$ (номинальный ток, А), $m_п$, $m_{макс}$, $m_н$ (пусковой, максимальный и номинальный моменты, Нм) приводятся в относительных единицах.

Из таблицы видим, что многокритериальная с учетом вытеснения тока методика дает наилучший результат. Полученные по этой методике результаты показывают преимущество многокритериальной с учетом вытеснением тока методики: расхождение для двигателей большой мощности не превышает 2% для механических и электромеханических характеристик, что допустимо по заводскому разбросу характеристик.

Приведем параметры моделирования, полученные по этой методике: сопро-

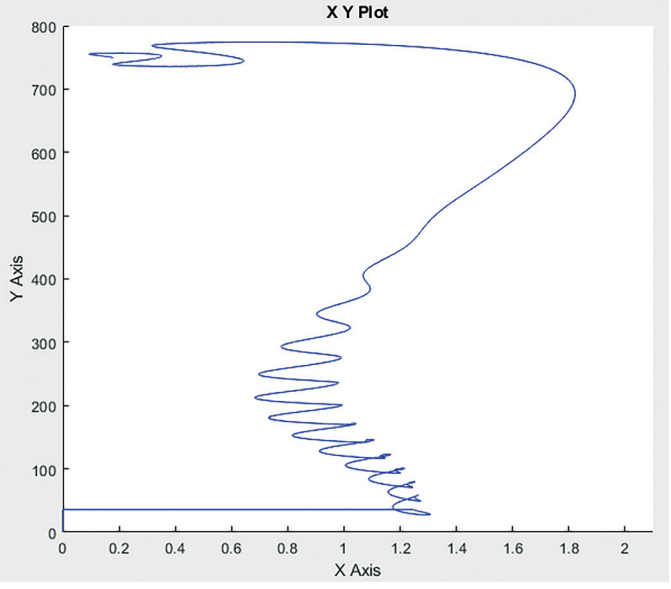

Рис. 2. Механическая характеристика выбранного АД, построенная в Simulink
Fig. 2. Mechanical characteristic of the selected asynchronous motor, built in Simulink

тивление статора r_S = 0,0194 Ом, сопротивление ротора r_R = 0,0084 Ом, индуктивность ротора x_R = 0,0632 Гн, индуктивность статора x_S = 0.0632 Гн, взаимная индуктивность x_m = 19,398 Гн. Механическая характеристика АД приведена на рис. 2. Результаты моделирования позволяют видеть, что модель соответствует выбранной электрической машине.

Моделирование частотно-управляемого асинхронного двигателя с DTC

Перейдем к основной части работы — к моделированию ЧП-АД с DTC. Цель моделирования системы с DTC — предварительная проверка целесообразности и эффективности алгоритма управления на виртуальной модели перед внедрением в реальную систему, что позволяет снизить риски, затраты и время разработки [10, 11].

Предлагаемая схема моделирования приведена на рис. 3.

Для моделирования будем использовать пакет SimPowerSystems, который содержит набор блоков виртуальных моделей электротехнических устройств и устройств силовой электроники. Несомненным достоинством этого пакета является возможность совместного использования функциональных и виртуальных моделей [12, 13]. Асинхронный двигатель, частотный преобразователь будем моделировать виртуальными блоками SimPowerSystems, а систему управления и приводимый механизм (подъемный механизм ковша, включающий лебедку, канаты, ковш) — с помощью функциональных блоков и структурных схем Simulink. Функциональные блоки отражают только преобразования сигналов в объекте без механического или электрического воплощения. Такой подход позволяет упростить модель, сократить время моделирования, опустить необходимость согласования сигналов различной физической природы, а также значительно снижает критичность модели к параметрам процедуры моделирования: методу и величине шага. Единственное, что следует учитывать при разработке моделей, это то, что непосредственное соединение друг с другом блоков Simulink и блоков SimPowerSystems недопустимо. Передавать сигнал от функционального блока к виртуаль-

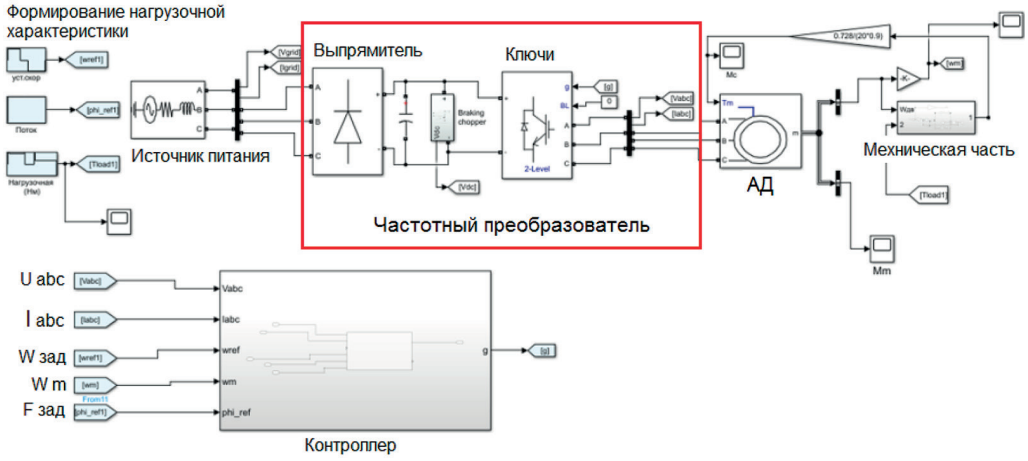

Рис. 3. Модель ЧП-АД в Simulink

Fig. 3. Frequency converter — asynchronous motor model in Simulink

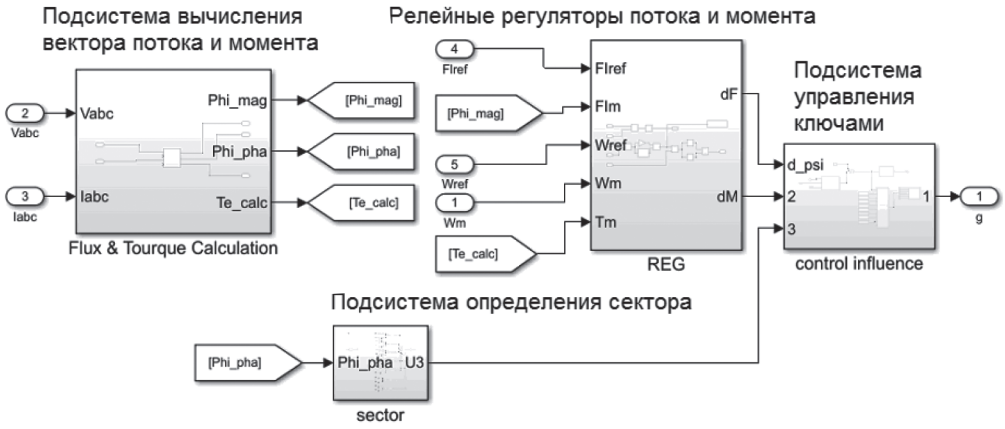

Рис. 4. Функциональная схема блока «Контроллер»
Fig. 4. Functional diagram of the Controller unit

ному можно через управляемые источники тока или напряжения, а от виртуального к функциональному — через измерители тока или напряжения.

В основу моделирования положена известная схема (см. рис. 3). Основными блоками здесь являются асинхронный двигатель (блок Asynchronous Machine), источник трехфазного переменного напряжения (3-Phase-Sourse), частотный преобразователь, состоящий из основных элементов — выпрямителя, полупроводниковых ключей, тормозного резистора. Эти элементы реализуются виртуальными моделями, как это видно на рисунке. Система управления реализована в блоке «Контроллер», а подъемный механизм — в подсистеме «Механическая часть». Сигнал задания формируется в блоке «Формирование нагрузочной характеристики».

Механическая система подъема, которая формирует момент сопротивления, и система управления, названная «Контроллер», собраны в виде функциональных моделей. Соединение моделей системы управления и схемы ПЧ-АД происходит следующим образом: в управляющий блок поступают снятые с виртуальных моделей сигналы — напряжение U_{abc}, скорость АД W_m, а также полученные в блоке «Формирование

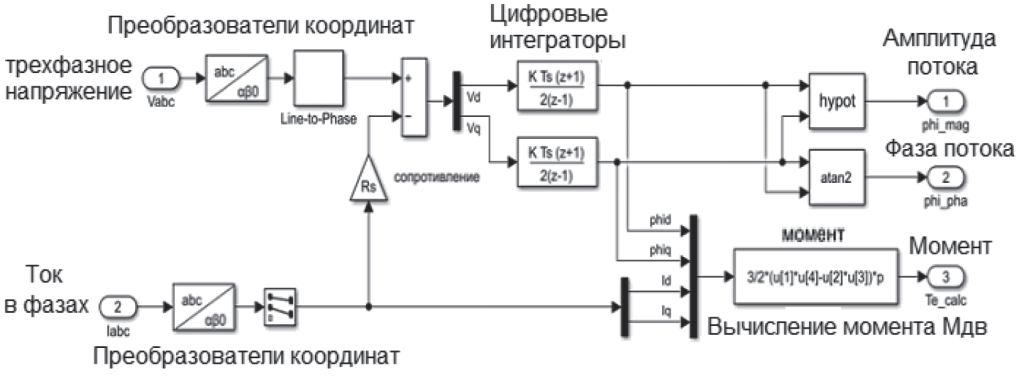

Рис. 5. Подсистема расчета потока и момента и ее структурная схема
Fig. 5. Subsystem for calculating magnetic flux and moment and its block diagram

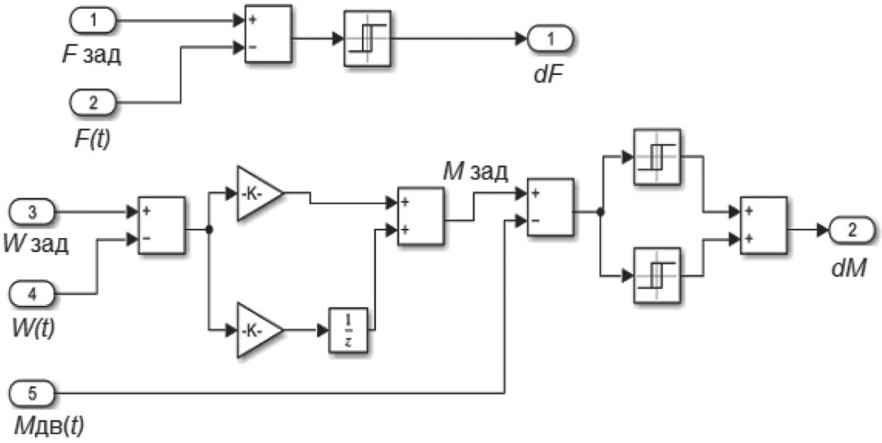

Рис. 6. Релейные регуляторы
Fig. 6. Relay regulators

нагрузочной характеристики» сигнал задания скорости $W_{зад}$ и вычисленного для этого требуемого значения магнитного потока $F_{зад}$. В свою очередь в блоке «Контроллер» формируется сигнал задания $g(t)$ для ПЧ, который подается на тиристорные ключи, заставляя их переключаться нужным образом. Теперь

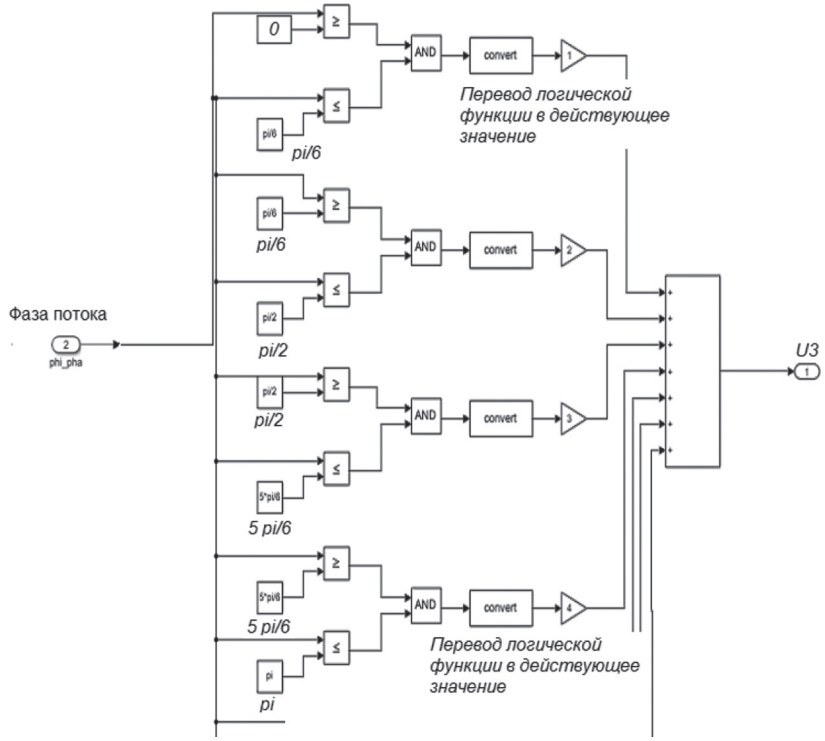

Рис. 7. Блок определения сектора
Fig. 7. Sector definition block

рассмотрим детально наполнение подсистемы «Контроллер», что и является основной работой авторов. Функциональная схема блока «Контроллер» представлена на рис. 4. Здесь тоже можно выделить несколько функциональных блоков. Модель управляющего устройства для компактности и демонстрации логики функционирования реализована в виде совокупности подсистем. Эти подсистемы соединяются элементами «GO-TO», чтобы не загромождать схему большим количеством проводов и соединений. Рассмотрим подробнее моделирование «Контроллера», поскольку это центральная часть данной работы.

«Контроллер» управления состоит из вычислительной подсистемы, релейных регуляторов, блока вычисления сектора, в котором должен находиться вектор потокосцепления, и подсистемы, управляющей ключами. На рис. 5 — 9 подробно представлены схемы этих подсистем. Как уже было сказано, система управления выполняется структурными схемами Simulink.

```
function y = fcn(n,d_psi,dm)
y=0;
% сектор 1
if (n==1)&&(d_psi==1)&&(dm==1)
    y = 2;
end
if (n==1)&&(d_psi==1)&&(dm==0)
    y = 7;
end
if (n==1)&&(d_psi==1)&&(dm==-1)
    y = 6;
end
 if (n==1)&&(d_psi==0)&&(dm==1)
    y = 3;
end
if (n==1)&&(d_psi==0)&&(dm==0)
    y =0;
end
if (n==1)&&(d_psi==0)&&(dm==-1)
    y = 5;
end
% сектор 2
if (n==2)&&(d_psi==1)&&(dm==1)
    y = 3;
end
if (n==2)&&(d_psi==1)&&(dm==0)
    y =0;
end
if (n==2)&&(d_psi==1)&&(dm==-1)
    y = 1;
```

Рис. 8. Скрипт для таблицы переключения
Fig. 8. Script for the switching table

Подсистема расчета

Функциональная схема подсистемы расчета представлена на рис. 5. В виртуальной модели АД происходит измерение токов I_{abc} и напряжений U_{abc} фаз статора. Трехфазная система токов и напряжений преобразуется в двумерную неподвижную систему координат, в которой вычисляются проекции векторов U_α, U_β, I_α, I_β. По (3) и (4) вычисляются проекции вектора потокосцепления статора Ψ_α и Ψ_β. По этим вычисленным проекциям получаем вектор потока статора в показательной форме

$$\Psi_S = |\Psi_S| \exp\left(\arg(\Psi_S)\right).$$

Величина позволяет определить номер сектора.

Третьим выходным сигналом этого блока является вычисленный момент $M_{дв.}$, определяемый по (3). Вычисленные в предыдущем блоке значения электромагнитного момента $M_{дв}(t)$ и амплитуды вектора потока статора Ψ_S и снятая с виртуальной модели АД величина скорости вращения ротора $\omega(t)$ сравниваются с заданными значениями $M_{зад}$ и $\Psi_{зад}$. Расхождения между заданными и текущими значениями подаются на входы релейных регуляторов: пропорциональный регулятор потока и цифровой ПИ-регулятор скорости, схемы которых представлены на рис. 6.

Полученное значение $\arg(\Psi_S)$ поступает на вход подсистемы определения сектора (см. рис. 7). При помощи элементов сравнения и логических функций здесь происходит сравнение текущего значения с границами шести сек-

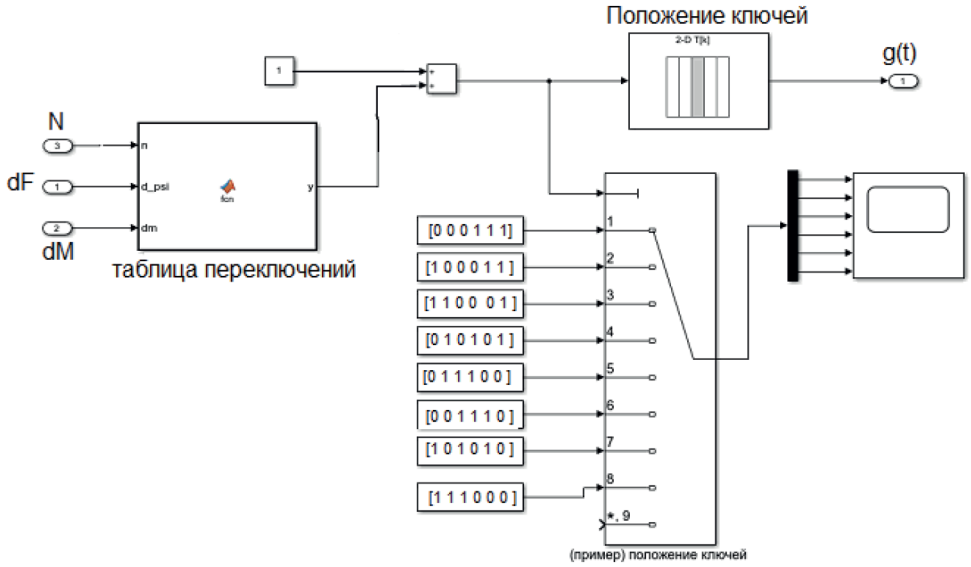

Рис. 9. Управляющее воздействие ключей
Fig. 9. The control effect of the keys

торов, в которых может располагаться вектор потока статора. После определения сектора по двум условиям происходит перевод выходного сигнала логической функции в действующее значение.

И наконец после определения сектора следует по таблице переключений выбрать соответствующую комбинацию сигналов управления ключами. Таблица переключений задается программой в Matlab (см. рис. 8). Схема формирования управляющего сигнала $g(t)$ представлена на рис. 9. Сгенерированный сигнал $g(t)$ подается в ЧП, который задает вектор напряжения.

В качестве ПЧ предлагается использовать частотный преобразователь Веспер Е4-9400. Это продукция отечественного производства, обладающая такими достоинствами, как наличие скалярного и векторного управления, возможность управления моментом двигателя, встроенный ПИД-регулятор, за счет которого реализуется поддержание параметров технологического процесса, интерфейс связи RS-485. Технологические параметры ПЧ авторы приводят в табл. 5.

Проведем моделирование, имитируя рабочий цикл экскаватора (рис. 10), включающий в себя подъем ковша, останов, опускание ковша с торможением и подъем [14]. По результатам моделирования видно, что система отрабатывает пробуемое задание, но наблюдается большая колебательность момента (рис. 11). Требуется обеспечить пуль-

Таблица 5

Технологические параметры преобразователя Веспер Е4-9400
Technological parameters of the converter motor Vesper E4-9400

Мощность двигателя, кВт	Полная мощность преобразователя, кВА	Номинальный ток, А	Выходная частота, Гц	Диапазон управления скоростью	Точность управления скоростью	Напряжение, В	Степень защиты
630	800	1185	0 – 400	1:100	±0,2%	380	IP20

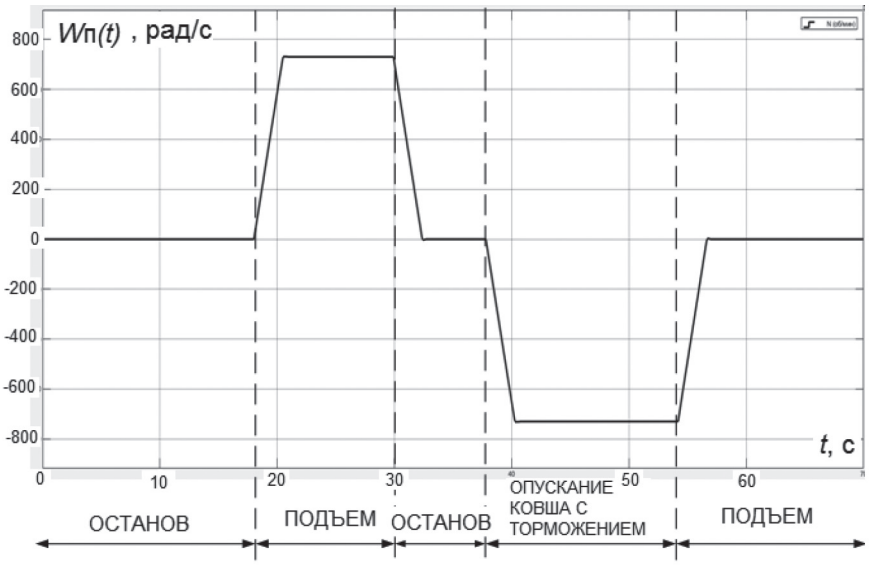

Рис. 10. График изменения скорости за рабочий цикл привода подъема
Fig. 10. Graph of speed changes during the working cycle of the lifting drive

сации момента, что позволит повысить энергосбережение, увеличить общий срок службы асинхронного двигателя и, соответственно, существенно сократить издержки промышленных предприятий.

Итак, метод прямого управления моментом может быть положен в основу современных автоматических систем управления электроприводом. Он может быть успешно реализован в регуляторах с нечеткой логикой [15], сетевых систем управления [16], адаптивных и оптимальных.

Однако следует обратить внимание не только на электрическую, но и на механическую часть драглайна [17, 18]. Многочисленные исследования эксплуатационной надежности экскаваторов-драглайнов показывают, что 50 — 70%

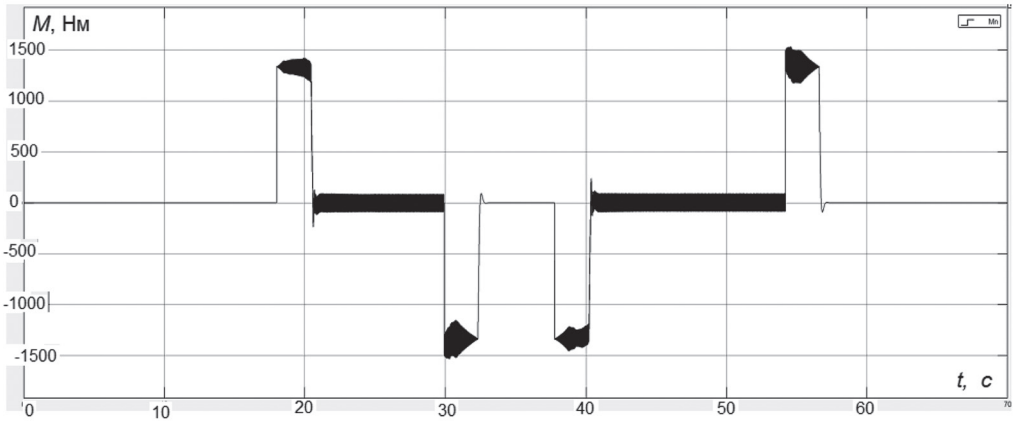

Рис. 11. График изменения момента за рабочий цикл привода подъема
Fig. 11. Graph of the torque change during the working cycle of the lifting drive

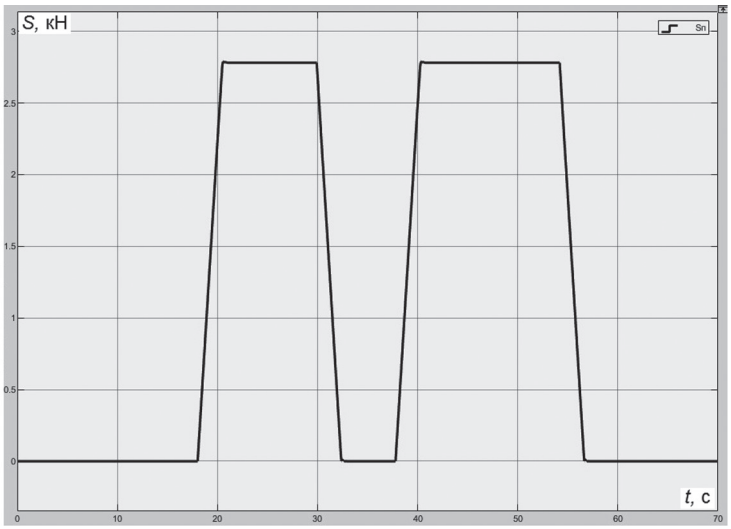

Рис. 12. Изменение усилий в подъемных канатах
Fig. 12. Change of forces in lifting ropes

отказов связаны с выходом из строя механического оборудования [19, 20]. На механическую часть действуют большие динамические нагрузки, ведущие к упругим деформациям редукторов и чрезмерным напряжениям конструкций. Это приводит к ускоренному износу тягового и подъемного механизмов, к снижению работоспособности и сокращению сроков службы. Все это снижает рентабельность и производительность экскаватора. Уменьшение этих нагрузок в переходных режимах позволит повысить эффективность работы драглайна.

Усилия в подъемных канатах можно определить как

$$S_n = C_k \, l \,, \qquad (6)$$

где $C_к$ — жесткость канатов; l — растяжение.

Поскольку , то

$$l = \int_0^t v_{мех} dt \,, \qquad (7)$$

где ρ — передаточное число редуктора.

Дополнив представленную на рис. 3 схему моделирования ЧП-АД моделью механической части, мы сможем определять усилия в подъемных канатах и в дальнейшем ограничивать и регулировать их. Приведем пример изменения усилий в канатах при изменении скорости — так, как показано на рис. 12.

Выводы

Моделирование системы с прямым управлением моментом (DTC) подтвердило ее высокую динамику и эффективность в поддержании заданных момента и скорости при различных режимах работы. Предварительный анализ показал, что данная система перспективна для применения в горной промышленности, где требуются точное управление и надежность.

Для дальнейшего внедрения необходимо:

- уточнить модель с учетом реальных условий эксплуатации,
- провести испытания на физическом прототипе.

Это позволит окончательно подтвердить работоспособность системы и адаптировать ее к промышленным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Enache S., Enache M.-A., Vlad I.* Considerations regarding the middle power asynchronous motors for railway electrical traction // MDPI Energies. 2024, vol. 17, no. 17, article 4327. DOI: 10.3390/en17174327.

2. *Ravikumar Lakkana, Somesh Bhambi* Overview of line excavator (dragline) role in optimization of production in surface mines // International Journal of Technology and Engineering (URTE). 2025, vol. 14, no. 2, pp. 23 — 31. DOI: 10.35940/ijrte.B8279.14020725.

3. *Певзнер Л. Д., Киселев Н. А.* Система автоматического управления шагающим драглайном // Горные науки и технологии. — 2022. — № 7(1). — С. 57 — 65. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-57-65.

4. *Xinjian Zhou, Jinzhen Fan, Yunoing Chang* Comparative analytical study of asynchronous motor control methods for straddle mounted monorail vehicle test stands // Journal of Physics Conference Series. 2025, vol. 3034, no. 1, article 012086. DOI: 10.1088/1742-6596/3004/1/012086.

5. *Григорьев А. В.* Обзор вариантов прямого управления моментом асинхронных электродвигателей (часть 1) // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2012. — № 2 (90). — С. 53 — 58.

6. *Григорьев А. В.* Обзор вариантов прямого управления моментом асинхронных электродвигателей (часть 2) // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2012. — № 3 (91). — С. 136 — 138.

7. *Васильев Б. Ю., Козярук А. Е.* Повышение эффективности асинхронных электроприводов с прямым управлением моментом // Электромеханические системы. — 2013. — Т. 13. — № 2. — С. 75 — 82.

8. *Hitendra Kumar Singh, Anil Kumar, Munendra Kumar* Overview of direct torque control (DTC) techique to improve dynamic performance in induction motor drives // Journal of Indian Institute for Engineering, Management and Science. 2025, vol. 4, pp. 32 — 36.

9. *Дзюин Д. В., Дмитриева В. В.* Система частотно-регулируемого многодвигательного электропривода шахтного ленточного конвейера с прямым управлением моментом // Горное оборудование и электромеханика. — 2025. — № 3 (179). — С. 3 — 13. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-3-13.

10. *Thi Thuy Nguyen* Research and simulating electric drive system of EKG-10 excavator by matlab simulink software // International Journal on Advanced Science Engineering and Information. 2022, vol. 12, no. 1, article 187. DOI: 10.18517/ijaseit.12.1.14417.

11. *Jun Rong, Yuejiao Ding, Xi Chen, Li Wan, Yiming Li* Modeling and simulation of voltage frequency ratio control system for asynchronous motor / Proceedings of the 2012 2nd International Conference on Computer and Information Application (ICCIA 2012). 2012, pp. 993 — 996. DOI: 10.2991/iccia.2012.243.

12. *Guanghui Ma* Design and simulation of a three-phase asynchronous motor control system for civil aircraft // Journal of Physics Conference Series. 2025, vol. 3033, no. 1, article 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/3033/1/012022.

13. *Ankit Kumar Jain, Gutta Krishna Chaitanya, Vaddi Ajay Kumar* Modeling and simulation of frequency converter used in speed control of asynchronous motor // International Journal of Scientific and Research Publications. 2013, vol. 3, no. 4, pp. 1 — 6.

14. *Певзнер Л. Д., Сулейменов Т. О., Югай И. П.* Автоматизированная система нечеткого правления движением ковша драглайна // Горное оборудование и электромеханика. — 2010. — № 8. — С. 23 — 28.

15. *Данилова М. Г., Серов М. Ю., Богадевич Д. И., Черемных И. С., Князев И. С.* Моделирование системы прямого управления моментом асинхронного двигателя с регулятором на основе нечеткой логики в Simulink // Инженерный вестник Дона. — 2017. — № 2. — С. 83.

16. *Щелков П. Ю.* Имитационная модель сетевой системы управления электрооборудованием мощного шагающего экскаватора-драглайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 2. — С. 137 — 147.

17. *Дунаев М. П., Довудов С. У.* Моделирование системы управления электроприводом шагающего экскаватора // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2023. — № 3(31). — С. 117 — 123. DOI: 10.25729/ESI.2023.31.3.011.

18. *Дунаев М. П., Довудов С. У.* Моделирование подсистемы управления механизмом подъема ковша шагающего экскаватора // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2024. — № 4(36). — С. 57 — 64. DOI: 10.25729/ESI.2024.36.4.006.

19. *Сорокин А. В.* Моделирование системы управления электроприводом подъема экскаватора ЭШ 20.90 при работе в тяжелых горнотехнических условиях // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. — 2019. — Т. 42. — № 2. — С. 185—193. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-185-193.

20. *Сорокин А. В., Иов И. А., Леоненко А. С.* Исследование системы управления электроприводом тяги экскаватора ЭШ 20.90 при работе в тяжелых горнотехнических условиях // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2015. — № 7 (102). — С. 91—96. ГИАБ

REFERENCES

1. Enache S., Enache M.-A., Vlad I. Considerations regarding the middle power asynchronous motors for railway electrical traction. *MDPI Energies*. 2024, vol. 17, no. 17, article 4327. DOI: 10.3390/en17174327.

2. Ravikumar Lakkana, Somesh Bhambi Overview of line excavator (dragline) role in optimization of production in surface mines. *International Journal of Technology and Engineering (URTE)*. 2025, vol. 14, no. 2, pp. 23—31. DOI: 10.35940/ijrte.B8279.14020725.

3. Pevzner L. D., Kiselyov N. A. Automatic control system for walking dragline. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, no. 7(1), pp. 57—65. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-57-65.

4. Xinjian Zhou, Jinzhen Fan, Yunoing Chang Comparative analytical study of asynchronous motor control methods for straddle mounted monorail vehicle test stands. *Journal of Physics Conference Series*. 2025, vol. 3034, no. 1, article 012086. DOI: 10.1088/1742-6596/3004/1/012086.

5. Grigoriev A. V. Overview of direct torque control options for asynchronous electric motors (part 1). *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2012, no. 2 (90), pp. 53—58. [In Russ].

6. Grigoriev A. V. Overview of direct torque control options for asynchronous electric motors (part 2). *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2012, no. 3 (91), pp. 136—138. [In Russ].

7. Vasiliev B. Y., Kozyaruk A. E. Improving the efficiency of asynchronous electric drives with direct torque control. *Elektromekhanicheskie sistemy*. 2013, vol. 13, no. 2, pp. 75—82. [In Russ].

8. Hitendra Kumar Singh, Anil Kumar, Munendra Kumar Overview of direct torque control (DTC) techique to improve dynamic performance in induction motor drives. *Journal of Indian Institute for Engineering, Management and Science*. 2025, vol. 4, pp. 32—36.

9. Dzyuin D. V., Dmitrieva V. V. A system of frequency-controlled multi-motor electric drive of a mine belt conveyor with direct torque control. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2025, no. 3(179), pp. 3—13. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-3-13.

10. Thi Thuy Nguyen Research and simulating electric drive system of EKG-10 excavator by matlab simulink software. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information*. 2022, vol. 12, no. 1, article 187. DOI: 10.18517/ijaseit.12.1.14417.

11. Jun Rong, Yuejiao Ding, Xi Chen, Li Wan, Yiming Li Modeling and simulation of voltage frequency ratio control system for asynchronous motor. *Proceedings of the 2012 2nd International Conference on Computer and Information Application (ICCIA 2012)*. 2012, pp. 993—996. DOI: 10.2991/iccia.2012.243.

12. Guanghui Ma Design and simulation of a three-phase asynchronous motor control system for civil aircraft. *Journal of Physics Conference Series*. 2025, vol. 3033, no. 1, article 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/3033/1/012022.

13. Ankit Kumar Jain, Gutta Krishna Chaitanya, Vaddi Ajay Kumar Modeling and simulation of frequency converter used in speed control of asynchronous motor. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2013, vol. 3, no. 4, pp. 1—6.

14. Pevzner L. D., Suleimenov T. O., Yugai I. P. Automated system of fuzzy control of dragline bucket movement. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2010, no. 8, pp. 23—28. [In Russ].

15. Danilova M. G., Serov M. Y., Bogadevich D. I., Cheremnykh I. S., Knyazev I. S. Simulation of the direct torque control system of an asynchronous motor with a regulator based on fuzzy logic in Simulink. *Inzhenerniy vestnik Dona*. 2017, no. 2, pp. 83. [In Russ].

16. Shchelkov P. Y. Simulation model of a network control system for electrical equipment of a powerful walking dragline excavator. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. 2, pp. 137—147. [In Russ].

17. Dunaev M. P., Dovudov S. U. Modeling of the electric drive control system of a walking excavator. *Information and mathematical technologies in science and management*. 2023, no. 3(31), pp. 117—123. [In Russ]. DOI: 10.25729/ESI.2023.31.3.011.

18. Dunaev M. P., Dovudov S. U. Modeling of the subsystem of control of the mechanism of lifting the bucket of a walking excavator. *Information and mathematical technologies in science and management*. 2024, no. 4(36), pp. 57—64. [In Russ]. DOI: 10.25729/ESI.2024.36.4.006.

19. Sorokin A. V. Modeling of the control system for the electric lifting drive of the ASH 20.90 excavator when working in harsh mining conditions. *Proceedings of the Siberian department of the Section of Earth sciences of the Russian academy of natural sciences. Geology exploration and development of mineral deposits*. 2019, vol. 42, no. 2, pp. 185—193. [In Russ]. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-185-193.

20. Sorokin A. V., Iov I. A., Leonenko A. S. Investigation of the electric traction drive control system of the ASH 20.90 excavator when working in harsh mining conditions. *Vestnik of Irkutsk state technical university*. 2015, no. 7 (102), pp. 91—96. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитриева Валерия Валерьевна[1] — канд. техн. наук, доцент, доцент, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-8740-9380,
Аринич Александр Эдуардович[1] — магистрант, e-mail: arinicsasa726@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-0803-6046,
Сизин Павел Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, НИТУ МИСИС, e-mail: mstranger@list.ru, ORCID ID: 0000-0001-8156-4972.2,
[1] Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина.
Для контактов: Сизин П.Е., e-mail: mstranger@list.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.V. Dmitrieva[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-8740-9380,
A.E. Arinich[1], Master's Student, e-mail: arinicsasa726@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-0803-6046,
P.E. Sizin, Cand. Sci. (Phys. Mathem.), Assistant Professor, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: mstranger@list.ru, ORCID ID: 0000-0001-8156-4972.2,
[1] Russian State University of Oil and Gas (Gubkin National Research University), 119991, Moscow, Russia.
Corresponding author: P.E. Sizin, e-mail: mstranger@list.ru.

Получена редакцией 17.10.2025; получена после рецензии 28.11.2025; принята к печати 10.02.2026.
Received by the editors 17.10.2025; received after the review 28.11.2025; accepted for printing 10.02.2026.