

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ АККУМУЛЯТОРНЫХ ГОРНОТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Нгуен Тхе Хиен¹, Ле Ван Тунг²

¹ Технический университет Ле Куи Дон, Ханой, Вьетнам,
e-mail: thehiennnguyen1607@lqdtu.edu.vn

² Университет Тхань Донг, Хайфон, Вьетнам

Аннотация: В условиях модернизации горнодобывающей отрасли Вьетнама одной из ключевых задач является создание энергоэффективных и экологически безопасных электрических горнотранспортных машин. В данной работе исследуется автоматизированный асинхронный электропривод с аккумуляторным источником питания, особенностью которого является нестабильность выходного напряжения. Цель исследования заключается в повышении динамических и энергетических показателей асинхронного электропривода за счет применения системы прямого управления моментом, включающей шестипозиционный регулятор момента и двухпозиционный регулятор потокосцепления статора. В качестве силового преобразователя используется трехуровневый автономный инвертор с фиксированной нейтралью. Моделирование системы выполнено в среде Matlab/Simulink. Проведен сравнительный анализ систем прямого управления моментом при использовании одного и двух аккумуляторных источников питания с применением разработанной автором таблицы управления инвертором. Результаты исследования показали, что использование двух аккумуляторов обеспечивает более стабильное выходное напряжение, снижает пульсации электромагнитного момента и потокосцепления статора, а также улучшает динамические характеристики электропривода. Предложенные решения способствуют повышению энергоэффективности системы и могут быть применены при разработке перспективных электрических горнотранспортных машин.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, аккумуляторный источник питания, система прямого управления моментом, трехуровневый инвертор с фиксированной нейтралью, гармоники, электрические горнотранспортные машины, Matlab/ Simulink.

Для цитирования: Нгуен Тхе Хиен, Ле Ван Тунг Модернизация системы прямого управления момента и исследование его влияния на энергоэффективность асинхронных электроприводов аккумуляторных горнотранспортных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10. – С. 169–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_169.

Modernization of direct torque control and its influence on energy efficiency of asynchronous motors of battery-powered mining hauling machines

Nguyen The Hien¹, Le Van Tung²

¹ Le Quy Don Technical University, Ha Noi, Viet Nam, e-mail: thehiennguyen1607@lqdtu.edu.vnu

² Thanh Dong University, Hai Phong, Viet Nam

Abstract: In the conditions of modernization of the mining sector in Vietnam, one of the key challenges is creation of energy-efficient and environmentally safe mining hauling machines. This study analyzes an automated asynchronous motor with the battery power supply featuring variable output voltage. The aim of the study is to enhance the dynamic and energy performance of the asynchronous motors through the system of the direct torque control including a six-position torque limiter and a two-position stator flux-linkage regulator. The power converter is a three-level neutral point clamped inverter. Modeling is performed in Matlab/Simulink. The comparative analysis of the direct torque control is carried out with one and two battery power supplies using the inverter control table developed by the author. The research findings show that the use of two batteries ensures more stable output voltage, decreases pulsation of torque and stator flux-linkage, and improves dynamic performance of the motor. The proposed solutions enhance the energy efficiency of the test system and are applicable to design of advanced mining hauling machines.

Key words: asynchronous motor, battery power supply, direct moment control, three-level neutral point clamped inverter, harmonics, electric mining hauling machines, Matlab/ Simulink.

For citation: Nguyen The Hien¹, Le Van Tung Modernization of direct torque control and its influence on energy efficiency of asynchronous motors of battery-powered mining hauling machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10):169-181. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_169.

Введение

Современное развитие горнодобывающей промышленности Вьетнама сопровождается необходимостью решения ряда стратегически важных задач, среди которых — повышение производительной эффективности, обеспечение безопасности труда и снижение негативного воздействия на окружающую среду [1]. Ключевую роль в развитии угледобывающей отрасли играет провинция Куангнинь — крупнейший угледобывающий регион страны, где сосредоточены основные шахты и объекты транспортной инфраструктуры.

На шахте «Мао Кхе» для перевозки угля и вскрышных пород используются карьерные самосвалы, обеспечивающие

повышение производительности и сокращение объемов ручного труда. В районе Уонг Би функционирует конвейерная система транспортирования угля, позволяющая повысить эффективность доставки сырья и одновременно снизить экологическую нагрузку. На шахте «Нуй Бео» применяется специализированная железнодорожная система доставки угля от мест добычи к пунктам хранения и переработки, что обеспечивает непрерывность производственного процесса [2].

Однако эксплуатация подобных транспортных систем имеет ряд существенных недостатков, включая выбросы вредных веществ, повышенную пожаро- и взрывоопасность, высокий уровень шума и значительные эксплуатационные

расходы. Дополнительными факторами, стимулирующими переход к электрическим транспортным системам, являются сокращение запасов ископаемого топлива и нестабильность цен на энергоресурсы [3].

В связи с этим применение электрических транспортных средств, в частности аккумуляторных электросамосвалов, оснащенных асинхронными электроприводами (АЭП), рассматривается как перспективное направление повы-

Таблица 1

Сравнительная таблица методов снижения гармоник и повышения эффективности электроприводов

Comparative table of methods for harmonic reduction and improving the efficiency of electric drives

Метод	Вариант решений	Основной принцип	Преимущества	Недостатки
Активные фильтры (шунтирующий активный силовой фильтр, отслеживание точки максимальной мощности)	снижение гармоник	введение компенсирующего тока для подавления гармоник	- существенное улучшение качества электроэнергии; - высокая эффективность снижения искажений	- высокая стоимость; - сложная структура управления
Многоуровневые преобразователи	конструкция преобразователя частоты	формирование многоуровневого выходного напряжения	- снижение коэффициента гармонических искажений; - подходит для средних и высоких мощностей; - высокая эффективность	- сложность конструкции; - большое количество компонентов и алгоритмов
Модификации системы управления	способ управления	комбинация прямого управления моментом и векторной широтно-импульсной модуляции	- быстрая реакция; - высокая точность управления; - повышенная эффективность	- сложность алгоритма; - требует настройки
Система прямого управления с трехуровневым инвертором	расширенные применения	комбинация многоуровневой структуры и современного управления	- эффективное снижение гармоник; - высокая эффективность; - перспективность применения	- требует глубоких исследований; - сложность интеграции
Искусственная нейронная сеть, нечеткая логика	интеллектуальное управление	оптимизация управления на основе AI/эвристических алгоритмов	- оптимизация работы системы; - эффективное снижение гармоник	- сложность практической реализации; - высокие вычислительные требования
Предиктивная и адаптивная система с эталонной моделью	адаптивное управление	автоматическая настройка параметров на основе обратной связи	- повышение устойчивости; - хорошая адаптация к изменяющейся нагрузке	- сложность разработки; - чувствительность к помехам

шения эффективности добычи полезных ископаемых и снижения эксплуатационных затрат [4, 5]. Асинхронные электроприводы обеспечивают гибкое регулирование режимов работы и рациональное распределение мощности в соответствии с производственными потребностями.

Применение преобразователей частоты в системах асинхронного электропривода приводит к появлению гармонических и интергармонических составляющих тока и напряжения, оказывающих негативное влияние на качество электроэнергии, энергетическую эффективность и тепловой режим асинхронных двигателей [6–8]. Для устранения указанных недостатков предложены различные технические решения, включая использование активных фильтров [9, 10], многоуровневых преобразователей [11], модификацию алгоритмов управления [12–14], а также интеллектуальные методы управления на основе искусственных нейронных сетей [15], нечеткой логики и алгоритмов оптимизации [16, 17].

Несмотря на высокую эффективность существующих решений, их практическое применение нередко ограничивается высокой стоимостью, сложностью реализации и эксплуатации. В табл. 1 представлен сравнительный анализ рассмотренных подходов. На основании проведенного анализа в качестве наиболее перспективного направления выбрано сочетание усовершенствованных алгоритмов управления с применением трехуровневого инвертора с фиксированной нейтралью в системе асинхронного электропривода аккумуляторного электросамосвала.

Постановка задачи исследования

Традиционные транспортные системы, основанные на использовании дизельных двигателей, обладают рядом

существенных недостатков, включая высокий уровень вредных выбросов, значительные эксплуатационные затраты и недостаточную надежность. В связи с этим возрастает необходимость перехода к электрическому транспорту и применения регулируемых асинхронных электроприводов.

Вместе с тем внедрение литий-ионных аккумуляторных батарей в сочетании с асинхронными электроприводами сопровождается рядом технических проблем [18]. К ним относятся снижение и нестабильность напряжения источника питания, что может отрицательно влиять на устойчивость и безопасность функционирования системы. Кроме того, использование преобразователей частоты приводит к возникновению гармонических искажений, ухудшающих качество электроэнергии, снижающих энергетическую эффективность и сокращающих срок службы как аккумуляторных батарей, так и асинхронных электроприводов.

Для решения указанных проблем в работе [19] предложено усовершенствование метода прямого управления моментом путем его сочетания со случайной широтно-импульсной модуляцией для трехуровневого инвертора с фиксированной нейтральной точкой. Предложенный подход обеспечивает снижение пульсаций электромагнитного момента, уменьшение гармонических искажений и оптимизацию коммутационных потерь, что способствует более плавной и стабильной работе электроприводной системы.

Проведенный анализ показал, что наиболее перспективным направлением является объединение двух подходов: модификации системы управления на основе прямого управления моментом со случайной широтно-импульсной модуляцией и применения трехуровневого инвертора с фиксированной нейтралью

в структуре асинхронного электропривода. Такой комплексный подход позволяет обеспечить высокую динамику и точность регулирования, снизить пульсации момента и уровень гармонических искажений, а также повысить энергетическую эффективность системы.

Несмотря на возрастание сложности алгоритмов управления и аппаратной реализации, сочетание современных методов управления с многоуровневой структурой преобразователя обладает значительным потенциалом для практического применения. В связи с этим целью настоящего исследования является оценка эффективности асинхронного электропривода, построенного на основе трехуровневого инвертора и усовершенствованного алгоритма прямого управления моментом со случайной широтно-импульсной модуляцией, при питании от реальной литий-ионной аккумуляторной батареи. Для достижения поставленной цели предполагается выполнить моделирование системы в среде Matlab/Simulink и провести анализ ее энергетических и динамических характеристик.

Теоретические исследования

Система прямого управления моментом на основе трехуровневого автономного инвертора с фиксированной нейтралью представляет собой передовой метод в области автоматизированного асинхронного привода, обеспечивая его высокую производительность и точность.

Для трехуровневого инвертора необходимо учитывать изменение крутящего момента M при проектировании таблицы управления, которое определяется по формуле

$$M = -\frac{3}{2} \frac{k_s k_r}{\sigma L_m} |\Psi_s| |\Psi_r| \sin \theta, \quad (1)$$

где k_s , k_r — постоянные значения статора и ротора; l_s и l_r — индуктивности статора и ротора; L_m — взаимная индуктивность; Ψ_s и Ψ_r — потоки статора и ротора; θ — угол между векторами потокосцепления статора и ротора.

Статическая характеристика регулятора потокосцепления статора описывается следующим уравнением, где a' — зона нечувствительности регулятора потокосцепления статора:

Таблица 2

Выбор напряжения для трехуровневого инвертора с фиксированной нейтралью [19]
Voltage selection for a three-level Neutral-Point-Clamped inverter [19]

dΨ	dM	Сектор											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
+1	+3	15	21	16	22	17	23	18	24	19	25	14	20
	+2	20	15	21	16	22	17	23	18	24	19	25	14
	+1	9	9	10	10	11	11	12	12	13	13	8	8
	-1	6	6	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
	-2	25	14	20	15	21	16	11	17	23	18	24	06
	-3	19	25	14	20	15	21	16	22	17	23	18	24
0	+3	16	22	17	23	18	24	19	25	14	20	15	21
	+2	21	16	22	17	23	18	24	19	25	14	20	15
	+1	10	10	11	11	12	12	13	13	8	8	9	9
	-1	5	5	6	6	1	1	2	2	3	3	4	4
	-2	24	19	25	14	20	15	21	16	22	17	23	18
	-3	18	24	19	25	14	20	15	21	16	22	17	23

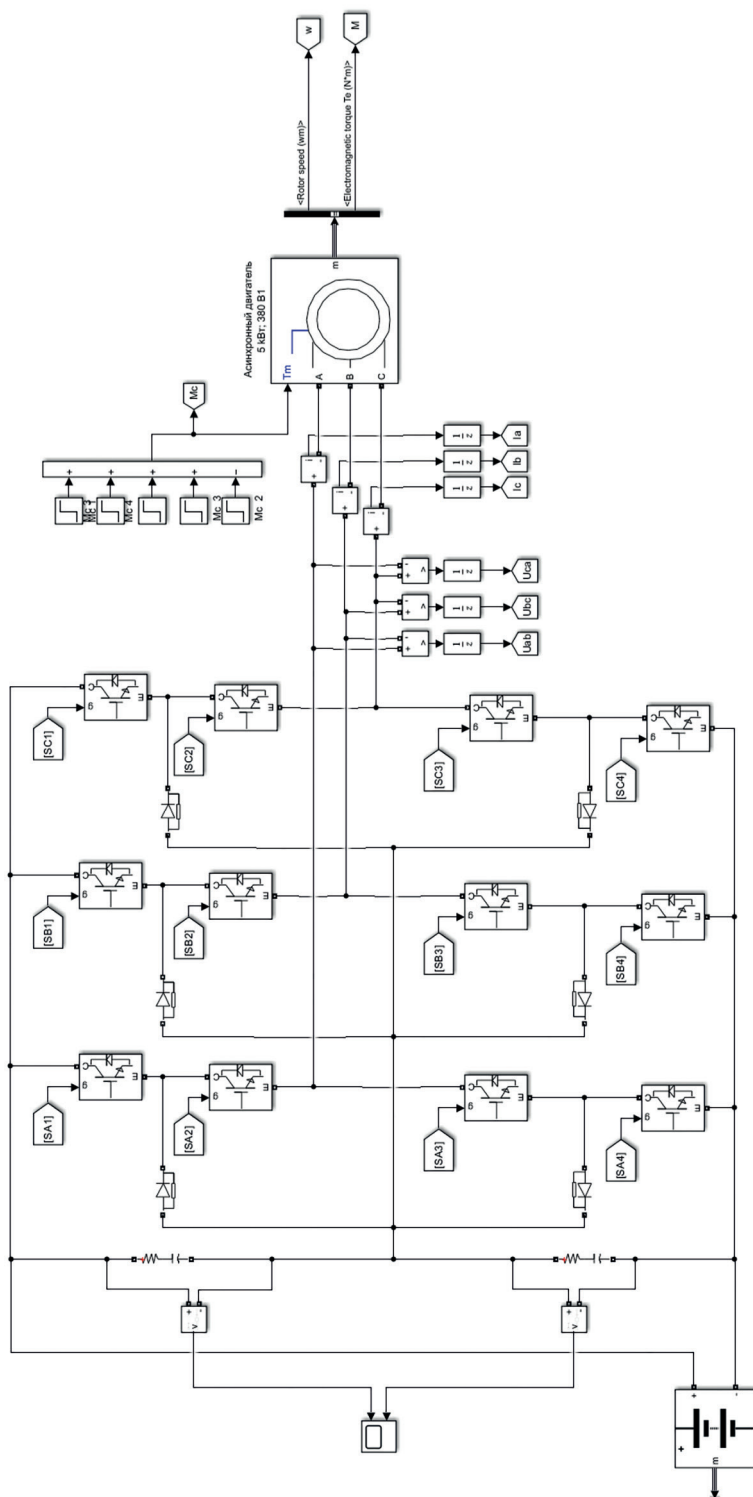


Рис. 1. Имитационное моделирование асинхронного электропривода при питании от одной аккумуляторной батареи [составлено авторами]
 Fig. 1. Simulation modeling of an asynchronous electric drive powered by a single battery

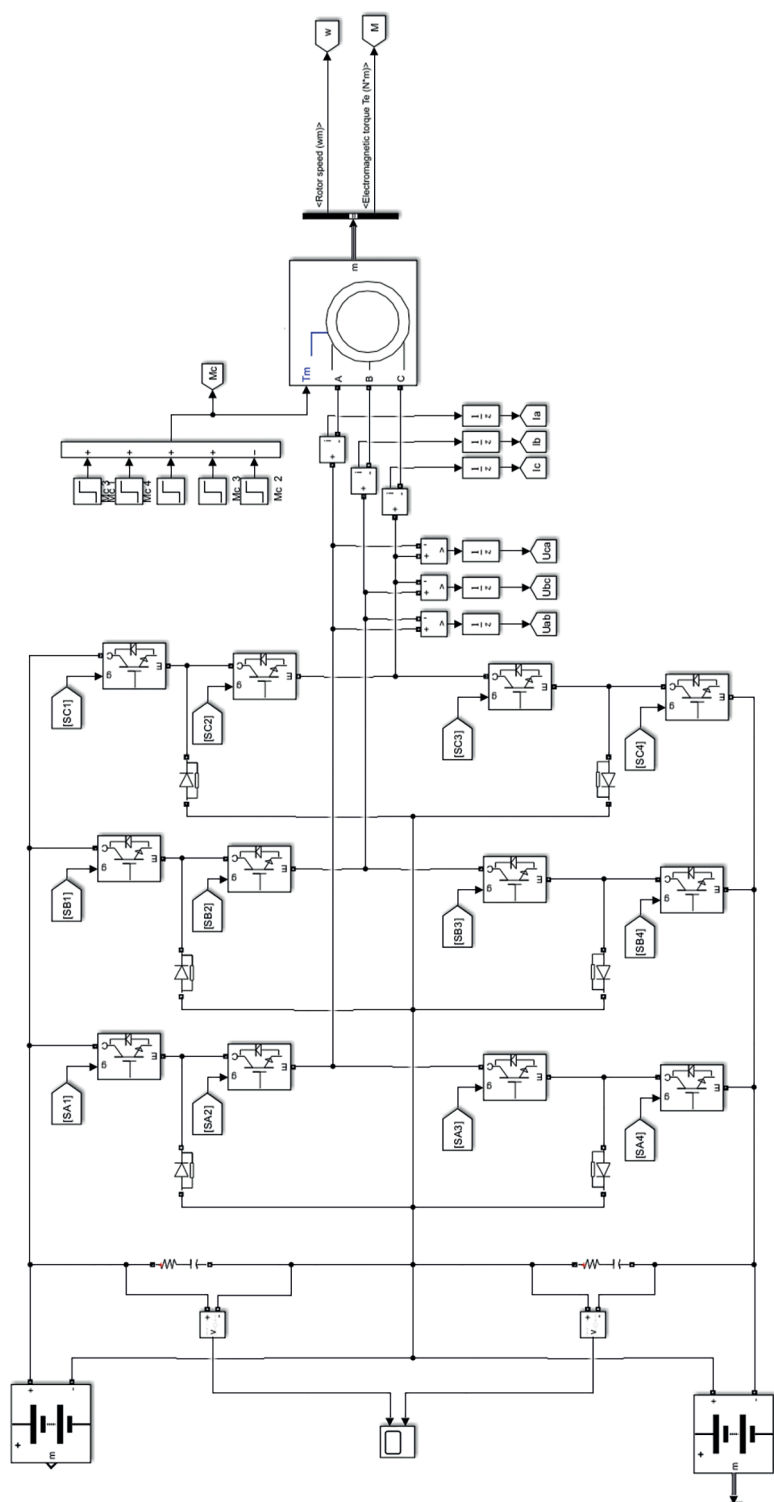


Рис. 2. Имитационное моделирование асинхронного электропривода при питании от двойной аккумуляторной батареи [составлено авторами]
 Fig. 2. Simulation modeling of an asynchronous electric drive powered by a double battery

$$d\Psi = \begin{cases} +1, \text{ если } \varepsilon_{\Psi_s}(p) > a', \text{ если } \frac{d[\varepsilon_{\Psi_s}(p)]}{dt} > 0; \\ 0, \text{ если } \varepsilon_{\Psi_s}(p) < -a', \text{ если } \frac{d[\varepsilon_{\Psi_s}(p)]}{dt} < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Статическая характеристика шестипозиционного регулятора момента описывается уравнением, где a , b и c — зоны нечувствительности для регулятора момента:

$$dM = \begin{cases} \begin{cases} +3, \text{ если } \varepsilon_M(p) > c; \\ +2, \text{ если } \varepsilon_M(p) > b; \\ +1, \text{ если } \varepsilon_M(p) > a; \\ -2, \text{ если } \varepsilon_M(p) < -a; \\ -1, \text{ если } \varepsilon_M(p) < -0; \\ -3, \text{ если } \varepsilon_M(p) < -b; \end{cases} & \left. \varepsilon_M(p) \right\} \text{ если } \frac{d[\varepsilon_M(p)]}{dt} > 0; \\ \begin{cases} +3, \text{ если } \varepsilon_M(p) > b; \\ +2, \text{ если } \varepsilon_M(p) > a; \\ +1, \text{ если } \varepsilon_M(p) > 0; \\ -1, \text{ если } \varepsilon_M(p) < -a; \\ -2, \text{ если } \varepsilon_M(p) < -b; \\ -3, \text{ если } \varepsilon_M(p) < -c; \end{cases} & \left. \varepsilon_M(p) \right\} \text{ если } \frac{d[\varepsilon_M(p)]}{dt} < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Метод выбора векторов напряжения для трехуровневого инвертора с фиксированной нейтральной точкой представлен в табл. 2. Основным преимуществом данного метода является эффективное использование доступных векторов напряжения трехуровневого инвертора, что позволяет снизить частоту коммутации силовых ключей и уменьшить дисбаланс напряжения нейтральной точки. Это способствует повышению качества выходного напряжения, снижению коммутационных потерь и повышению общей эффективности работы преобразовательной системы.

Экспериментальные исследования в сфере Matlab/Simulink

На основе математических моделей и параметров, представленных в табл. 1 — 2, были разработаны имитационные модели асинхронного электропривода, питаемого от одной аккумуляторной батареи (см. рис. 1) и от двух аккумуляторных батарей (см. рис. 2), в среде Matlab/Simulink. Технические характеристики асинхронного двигателя и литий-ионной аккумуляторной батареи приняты в соответствии с данными, приведенными в работе [20]. Полученные модели используются для исследования динамических и энергетических характеристик электропривода при различных режимах работы.

Выполнено сциллографирование следующих переменных: частоты вращения, электромагнитного момента, потокоцепления статора (рис. 3) и напряжения на

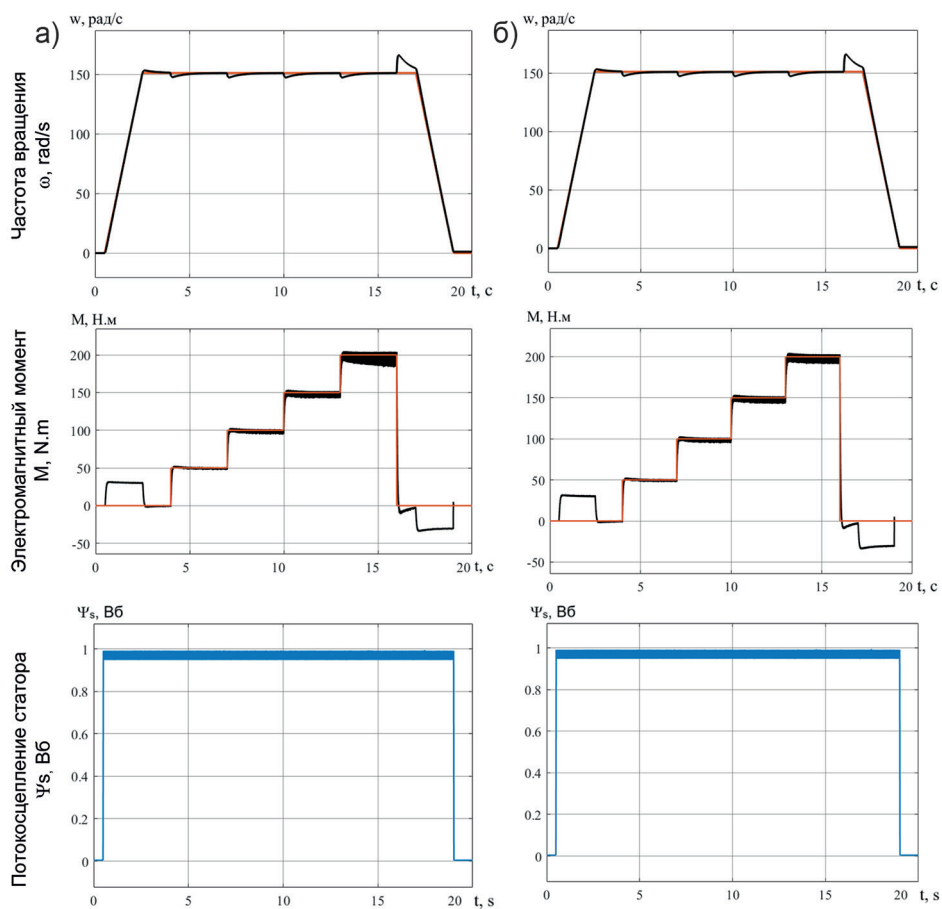


Рис. 3. Характеристики асинхронного двигателя: вариант 1 (а); вариант 2 (б) [составлено авторами]
 Fig. 3. Characteristics of an asynchronous motor: option 1 (a); option 2 (b) [compiled by the authors]

конденсаторах (рис. 4), где а — асинхронный электропривод при питании от одной аккумуляторной батареи (вариант 1), б — асинхронный электропривод при питании от двойной аккумуляторной батареи (вариант 2).

Анализ исследуемых переменных асинхронного электропривода проводился в трех характерных интервалах работы: пуск двигателя без нагрузки (1–4 с), работа двигателя под нагрузкой (4–16 с) и торможение двигателя под нагрузкой (16–19 с).

Исследование характеристик частоты вращения показало, что применение алгоритма прямого управления момен-

том с шестипозиционным регулятором момента и двухпозиционным регулятором потоко сцепления статора обеспечивает устойчивое функционирование асинхронного электропривода с аккумуляторным источником питания во всех рассматриваемых режимах работы.

Анализ электромагнитного момента и потоко сцепления статора свидетельствует о том, что во втором варианте питания амплитуда их колебаний, как в установившемся режиме, так и в режиме торможения под нагрузкой, ниже по сравнению с вариантом 1. При этом в обоих вариантах обеспечивается эффективное поддержание заданного зна-

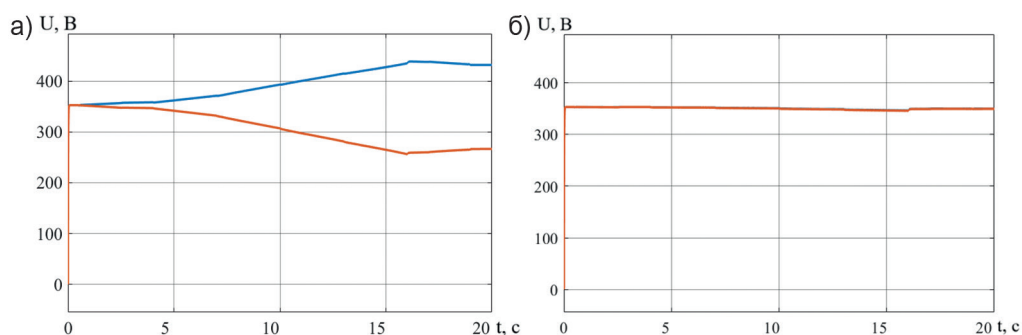


Рис. 4. Напряжения на конденсаторах U_{PO} , U_{ON} : вариант 1 (а); вариант 2 (б) [составлено авторами]
 Fig. 4. Voltages on capacitors U_{PO} , U_{ON} : option 1 (a); option 2 (b) [compiled by the authors]

чения потокосцепления статора, что подтверждает эффективность используемых двухпозиционного и шестипозиционного регуляторов.

Сопоставление осциллограмм частоты вращения, электромагнитного момента и потокосцепления статора показывает, что применение двух аккумуляторных батарей (вариант 2) обеспечивает лучшие динамические характеристики электропривода по сравнению с питанием от одной батареи (вариант 1).

Результаты анализа напряжений на конденсаторах (см. рис. 4) показывают, что во втором варианте схемы наблюдается существенное снижение амплитуды колебаний напряжения нейтральной точки до уровня порядка 0,1 В. Уменьшение пульсаций напряжения способствует стабилизации режимов работы преобразовательной части системы и повышению надежности функционирования асинхронного электропривода.

Использование двух аккумуляторных батарей обеспечивает более равномерное распределение энергии, уменьшение пульсаций напряжения и повышение качества электропитания, что положительно влияет на энергетические показатели системы в целом.

Таким образом, применение автоматизированного асинхронного электропривода с двухаккумуляторным источником питания, реализующего алгоритм

прямого управления моментом с шестипозиционным регулятором момента и двухпозиционным регулятором потокосцепления статора, позволяет улучшить динамические характеристики привода, повысить его энергетическую эффективность и надежность работы в различных режимах эксплуатации.

Дополнительно следует отметить, что снижение колебаний напряжения способствует уменьшению тепловых и электрических нагрузок на элементы системы, что в перспективе может привести к увеличению срока их службы и снижению вероятности отказов.

Заключение

Одним из ключевых направлений развития электрических горнотранспортных машин с аккумуляторным источником питания является разработка и внедрение новых структур преобразовательных устройств и алгоритмов управления, направленных на повышение динамических характеристик, энергетической эффективности и надежности асинхронного электропривода (АЭП).

В работе разработаны имитационные модели автоматизированного асинхронного электропривода с аккумуляторным источником питания и выполнена оценка эффективности системы прямого управления моментом с шестипозиционным регулятором момента и двухпозицион-

ным регулятором потокосцепления статора.

Результаты моделирования показали, что применение двух аккумуляторных батарей обеспечивает снижение колебаний электромагнитного момента и потокосцепления статора как в установившемся режиме работы, так и в режиме торможения при нагрузке $M_c = 250 \text{ Н} \cdot \text{м}$ по сравнению с вариантом питания от одной аккумуляторной батареи. Кроме того, использование двухаккумуляторной системы способствует уменьшению амплитуды колебаний напряжения нейтральной точки, повышению качества

электропитания и улучшению динамических характеристик АЭП.

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной структуры электропривода и выбранного алгоритма управления, а также их перспективность для применения в электрических транспортных системах горнодобывающей промышленности. Предложенные технические решения могут быть использованы в качестве основы для дальнейших исследований и разработки высокоэффективных электроприводов горнотранспортных машин с аккумуляторным питанием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nguyen M. P., Ponomarenko T., Nguyen N.* Energy transition in Vietnam: A strategic analysis and forecast // *Sustainability*. 2024, vol. 16, article 1969. DOI: 10.3390/su16051969.
2. *Que C. T., Nevskaya M., Marinina O.* Coal mines in Vietnam: Geological conditions and their influence on production sustainability indicators // *Sustainability*. 2021, vol. 13, article 11800. DOI: 10.3390/su132111800.
3. *Thuy Thanh Thi Tran, Huy Khanh Pham, Hoa Mai Nguyen, Hai Thi Do* Assessment of the air environment in open-pit coal mining area in Cam Pha Region, Quang Ninh Province // *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, July – December, 2025. DOI: 10.29227/JM-2025-02-57.
4. *Zhang Q., Liu W., Jia A., Sun S., Li X., Song X.* Mining scraper conveyors chain drive system lightweight design: Based on DEM and topology optimization // *Computation*. 2025, no. 13, article 225. DOI: 10.3390/computation13090225.
5. *Bao H., Knights P., Kizil M., Nehring M.* Performance evaluation of alternative configurations of battery electric mining haul trucks // *IEEE Access*. 2025, vol. 13, pp. 129331 – 129347. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3588871.
6. *Arranz-Gimon A., Zorita-Lamadrid A., Morinigo-Sotelo D., Duque-Perez O.* A review of total harmonic distortion factors for the measurement of harmonic and interharmonic pollution in modern power systems // *Energies*. 2021, vol. 14, article 6467. DOI: 10.3390/en14206467.
7. *Donolo P., Bossio G., De Angelo C., Garci G., Donolo M.* Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations // *Electric Power Systems Research*. 2016, vol. 140, pp. 866 – 873. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.04.018.
8. *Siostrzonek T., Wójcik J., Dutka M., Siostrzonek W.* Impact of power quality on the efficiency of the mining process // *Energies*. 2024, vol. 17, article 5675. DOI: 10.3390/en17225675.
9. *Derradji Bakria, Abdelkader Azzeddine Laouid, Belkacem Korich, Abdelkader Beladel, Ali Teta, Ridha Djamel Mohammedi, Salah K. Elsayed, Enas Ali, Dessalegn Bitew Aeggegn, Sherif S. M. Ghoneim* An optimized shunt active power filter using the golden Jackal optimizer for power quality improvement // *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, article 15869. DOI: 10.1038/s41598-025-00204-1.
10. *Szromba A.* Enhanced control of shunt active power filter for non-active current compensation and power management in DC-Powered systems // *Electronics*. 2025, vol. 14, article 4616. DOI: 10.3390/electronics14234616.
11. *Bile Mohamed Bile, Abderrezak Cherifi, Hassan Ali Barkad, Kamal Meghriche* New multi-level inverter with the elimination of successive low-rank harmonics using PWHM for integration into the distribution grid // *Results in Engineering*. 2025, vol. 27, article 106544. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.106544.
12. *Lianhui Jia, Lijie Jiang, Yongliang Wen, Jiulin Wu, Heng Wang* Multilevel SVPWM fault-tolerant direct torque control of a five-phase brushless fault-tolerant hybrid-excitation motor for tunnel

boring machine applications // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2025, vol. 165, article 106889. DOI: 10.1016/j.tust.2025.106889.

13. *Siham Mencou, Majid Ben Yakhlef, El Bachir Tazi* Advanced control of induction motors (2019 – 2025): A comprehensive review of strategies, algorithms and sensorless techniques, e-Prime – Advances // *Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2025, vol. 14, article 101098. DOI: 10.1016/j.prime.2025.101098.

14. *Farajpour Y., Alzayed M., Chaoui H., Kelouwani S.* A novel switching table for a modified three-level inverter-fed DTC drive with torque and flux ripple minimization // *Energies*. 2020, vol. 13, article 4646. DOI: 10.3390/en13184646.

15. *Balakumar Subramanian, Alazar Demamu, Andinet Anjamo, Muluneh Lemma, Yalisho Girma* Mitigating voltage quality issues in Sawla Substation, Ethiopia: A dynamic voltage restorer controlled by neural networks and fuzzy logic // *Results in Engineering*. 2025, vol. 26, article 105106. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105106.

16. *Houssam Ech-chaouy, Aziz Derouich, Said Mahfoud, Mohamed I. Mosaad, Ahmad F. Tazay.* Experimental validation of MRAS sensorless direct torque control using ANN for induction motors in a pumping system // *Scientific Reports*. 2026, vol. 16, article 10434. DOI: 10.1038/s41598-026-41127-9.

17. *Saleh S. M., Hassan A. Y.* Sensorless based SVPWM-DTC of AFPMSM for electric vehicles // *Scientific Reports*. 2022, vol. 12, article 9023. DOI: 10.1038/s41598-022-12825-x.

18. *Machín A., Morant C., Márquez F.* Advancements and challenges in solid-state battery technology: An in-depth review of solid electrolytes and anode innovations // *Batteries*. 2024, vol. 10, article 29. DOI: 10.3390/batteries10010029.

19. *Yurievich V. B., Hien N. T.* Stochastic pulse-width modulation and modification of direct torque control based on a three-level neutral-point clamped inverter // *Energies*. 2024, vol. 17, article 6017. DOI: 10.3390/en17236017.

20. *Васильев Б. Ю., Нгуен Т. Х.* Анализ влияния полупроводниковых преобразователей на батарею и двигатель асинхронного привода шахтных горнотранспортных машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2023. — № 9-1. — С. 299 – 318. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_299. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Nguyen M. P., Ponomarenko T., Nguyen N. Energy transition in Vietnam: A strategic analysis and forecast. *Sustainability*. 2024, vol. 16, article 1969. DOI: 10.3390/su16051969.

2. Que C. T., Nevskaya M., Marinina O. Coal mines in Vietnam: Geological conditions and their influence on production sustainability indicators. *Sustainability*. 2021, vol. 13, article 11800. DOI: 10.3390/su132111800.

3. *Thuy Thanh Thi Tran, Huy Khanh Pham, Hoa Mai Nguyen, Hai Thi Do* Assessment of the air environment in open-pit coal mining area in Cam Pha Region, Quang Ninh Province. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, July – December, 2025. DOI: 10.29227/JM-2025-02-57.

4. *Zhang Q., Liu W., Jia A., Sun S., Li X., Song X.* Mining scraper conveyors chain drive system lightweight design: Based on DEM and topology optimization. *Computation*. 2025, no. 13, article 225. DOI: 10.3390/computation13090225.

5. *Bao H., Knights P., Kizil M., Nehring M.* Performance evaluation of alternative configurations of battery electric mining haul trucks. *IEEE Access*. 2025, vol. 13, pp. 129331 – 129347. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3588871.

6. *Arranz-Gimon A., Zorita-Lamadrid A., Morinigo-Sotelo D., Duque-Perez O.* A review of total harmonic distortion factors for the measurement of harmonic and interharmonic pollution in modern power systems. *Energies*. 2021, vol. 14, article 6467. DOI: 10.3390/en14206467.

7. *Donolo P., Bossio G., De Angelo C., Garcí G., Donolo M.* Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations. *Electric Power Systems Research*. 2016, vol. 140, pp. 866 – 873. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.04.018.

8. *Siostrzonek T., Wójcik J., Dutka M., Siostrzonek W.* Impact of power quality on the efficiency of the mining process. *Energies*. 2024, vol. 17, article 5675. DOI: 10.3390/en17225675.

9. *Derradji Bakria, Abdelkader Azzeddine Laouid, Belkacem Korich, Abdelkader Beladel, Ali Teta, Ridha Djamel Mohammedi, Salah K. Elsayed, Enas Ali, Dessalegn Bitew Aeggegn, Sherif S. M. Gho-neim* An optimized shunt active power filter using the golden Jackal optimizer for power quality improvement. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, article 15869. DOI: 10.1038/s41598-025-00204-1.

10. Szromba A. Enhanced control of shunt active power filter for non-active current compensation and power management in DC-Powered systems. *Electronics*. 2025, vol. 14, article 4616. DOI: 10.3390/electronics14234616.

11. Bile Mohamed Bile, Abderrezzak Cherifi, Hassan Ali Barkad, Kamal Meghriche New multilevel inverter with the elimination of successive low-rank harmonics using PWHM for integration into the distribution grid. *Results in Engineering*. 2025, vol. 27, article 106544. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.106544.

12. Lianhui Jia, Lijie Jiang, Yongliang Wen, Jiulin Wu, Heng Wang Multilevel SVPWM fault-tolerant direct torque control of a five-phase brushless fault-tolerant hybrid-excitation motor for tunnel boring machine applications. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2025, vol. 165, article 106889. DOI: 10.1016/j.tust.2025.106889.

13. Siham Mencou, Majid Ben Yakhlef, El Bachir Tazi Advanced control of induction motors (2019–2025): A comprehensive review of strategies, algorithms and sensorless techniques, e-Prime – Advances. *Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2025, vol. 14, article 101098. DOI: 10.1016/j.prime.2025.101098.

14. Farajpour Y., Alzayed M., Chaoui H., Kelouwani S. A novel switching table for a modified three-level inverter-fed DTC drive with torque and flux ripple minimization. *Energies*. 2020, vol. 13, article 4646. DOI: 10.3390/en13184646.

15. Balakumar Subramanian, Alazar Demamu, Andinet Anjamo, Muluneh Lemma, Yalisho Girma Mitigating voltage quality issues in Sawla Substation, Ethiopia: A dynamic voltage restorer controlled by neural networks and fuzzy logic. *Results in Engineering*. 2025, vol. 26, article 105106. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105106.

16. Houssam Ech-chaouy, Aziz Derouich, Said Mahfoud, Mohamed I. Mosaad, Ahmad F. Tazay. Experimental validation of MRAS sensorless direct torque control using ANN for induction motors in a pumping system. *Scientific Reports*. 2026, vol. 16, article 10434. DOI: 10.1038/s41598-026-41127-9.

17. Saleh S. M., Hassan A. Y. Sensorless based SVPWM-DTC of AFPMSM for electric vehicles. *Scientific Reports*. 2022, vol. 12, article 9023. DOI: 10.1038/s41598-022-12825-x.

18. Machin A., Morant C., Márquez F. Advancements and challenges in solid-state battery technology: An in-depth review of solid electrolytes and anode innovations. *Batteries*. 2024, vol. 10, article 29. DOI: 10.3390/batteries10010029.

19. Yurievich V. B., Hien N. T. Stochastic pulse-width modulation and modification of direct torque control based on a three-level neutral-point clamped inverter. *Energies*. 2024, vol. 17, article 6017. DOI: 10.3390/en17236017.

20. Vasilev B. U., Nguyen T. H. Influence of semiconductor converters on asynchronous drive battery and motor in mining machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9-1, pp. 299–318. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_299.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нгуен Тхе Хиен — канд. техн. наук, преподаватель,

Технический университет Ле Куи Дон, Ханой, Вьетнам,

e-mail: thehiennnguyen1607@lqdtu.edu.vn, ORCID ID: 0000-0002-7539-0002,

Ле Ван Тунг — канд. техн. наук, преподаватель, Университет Тхань Донг,

Хайфон, Вьетнам, e-mail: levantungdktd@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3130-7673,

Для контактов: Нгуен Тхе Хиен, e-mail: thehiennnguyen1607@lqdtu.edu.vn.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nguyen The Hien, Cand. Sci. (Eng.), Lecturer,

Le Quy Don Technical University, Ha Noi, Viet Nam,

e-mail: thehiennnguyen1607@lqdtu.edu.vn, ORCID ID: 0000-0002-7539-0002,

Le Van Tung, Cand. Sci. (Eng.), Lecturer, Thanh Dong University, Hai Phong, Viet Nam,

e-mail: levantungdktd@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3130-7673,

Corresponding author: Nguyen The Hien, e-mail: thehiennnguyen1607@lqdtu.edu.vn.

Получена редакцией 21.04.2026; получена после рецензии 04.06.2026; принята к печати 10.09.2026.

Received by the editors 21.04.2026; received after the review 04.06.2026; accepted for printing 10.09.2026.