

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В.Л. Петров¹, А.В. Пичуев¹

¹ НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: alleystone@mail.ru

Аннотация: При развитии аварии горно-шахтное оборудование, оснащенное электроприводом с переменным током, отключается на короткий или длительный период, однако роторы продолжают некоторое время вращаться. Скорость такого вращения определяется скоростью затухания обратной ЭДС, генерируемой отключенным двигателем. Инерционное торможение при этом характеризуется как режим «свободного выбега». Разработка и модельная имитационная апробация комбинированного способа торможения асинхронного электродвигателя, работающего в условиях подземных комбинированных электрических сетей, который основывается на торможении с использованием специального тормозного резистора, а также торможении путем подачи постоянного тока в цепь статора электродвигателя из звена постоянного тока преобразователя частоты, является основной целью настоящих исследований. Проведенные исследования позволили предложить технические решения по структуре и функционалу специального устройства динамического торможения электродвигателя, питаемого от преобразователя частоты. Предлагаемое устройство функционально обеспечивает остановку или замедление путем резистивного торможения и непосредственной подачи постоянного тока в цепь статора асинхронного электродвигателя. В результате применения данного способа реализуется эффективное торможение и гашение обратной ЭДС электродвигателя, а также снижение амплитуды тока в цепях фильтра присоединения и измерителя устройства защитного отключения (УЗО).

Ключевые слова: подземная комбинированная электрическая сеть, динамическое торможение, частотно-регулируемый электропривод, ток утечки, обратная ЭДС электродвигателя, управление тормозным резистором, защитное отключение.

Для цитирования: Петров В. Л., Пичуев А. В. Имитационное моделирование комбинированного динамического торможения частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя в подземных электрических сетях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 8. – С. 153–162. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_153.

Simulation modeling of hybrid regenerative braking method for variable frequency asynchronous motors in underground electrical networks

V.L. Petrov¹, A.V. Pichuev¹

¹ NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: alleystone@mail.ru

Abstract: In event of a fault, mining equipment fitted with DC drives cuts off for a short or long time but rotors continue rotating for a certain period. The rotation speed is governed by the damping ratio of counter EMF generated by the dead motor. Inertia braking is characterized as the «free path» mode. This study aims at development and simulation testing of hybrid braking of asynchronous motors in underground hybrid electrical networks by means of braking using special brake resistor and by means of DC supply to the motor stator circuit from the DC circuit of the frequency converter. The accomplished research made it possible to propose engineering solutions on the structure and functions of a special device for the dynamic braking of a motor supplied by the frequency converter. The device ensures shutdown or deceleration via resistive braking and DC supply directly in stator circuit of asynchronous motor. As a result, it becomes possible to implement effective braking and damping of counter EMF of the motor, as well as to decrease the current amplitude in the circuits of the connection and metering filter of the shutoff protection device (SPD).

Key words: hybrid underground electric network, dynamic braking, variable frequency motor, leakage current, counter EMF of motor, braking resistor control, protection cutoff.

For citation: Petrov V. L., Pichuev A. V. Simulation modeling of hybrid regenerative braking method for variable frequency asynchronous motors in underground electrical networks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(8):153-162. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_153.

Введение

Периодическая остановка или отключение горно-шахтного оборудования, оснащенного электрическими двигателями переменного тока, характерна для аварийных режимов эксплуатации. Роторы электрических машин продолжают вращение после отключения питания и останавливаются только через определенный период времени [1, 2]. Процесс подобной инерционной остановки (торможения) носит название режима «свободного выбега». Физические явления, которые протекают в электрических цепях, определяются продолжительностью изменения скорости вращения вала и скоростью затухания обратной ЭДС, которая генерируется в сеть отключенным электродвигателем [3 – 5].

Для целей сокращения времени «свободного выбега» и полной остановки ротора электродвигателя, работа которого происходит с частыми пусками-остановками, применяется принудительное торможение [6, 7].

Наиболее распространенным механическим способом торможения электродвигателя является применение фрикционного тормоза, обеспечивающего зажим вращающегося вала специальными колодками на тормозном шкиве или тормозными дисками коробки передачи. Такой вид торможения в подземных комбинированных электрических сетях с регулируемой частотой (ПКЭС) имеет объективные ограничения по мощности электродвигателя, скорости вращения его вала. Значительную роль играют процессы, связанные с рассеиванием тепловой энергии в обмотках электродвигателя. Для вентиляторов местного проветривания, насосного оборудования, шахтных лебедок и других машин описываемые процессы в их электроприводах объективны. Из теории электропривода известны три ключевых способа торможения электрической машины: динамическое торможение, рекуперативное торможение и торможение в режиме противовключения. Большие величины

токов в силовых цепях забойных машин при торможении режимов, основанных на противовключении, реально ограничивают широкое распространение этого метода в частотно регулируемых системах электропривода (ЧРЭП) приведенного выше класса оборудования [8, 9].

Применение в ПКЭС рекуперативного торможения на данный момент не рассматривается, так как для его реализации требуется наличие двух функциональных схем управления, которые в шахтных подземных электрических сетях не реализуются:

- циклоконвектор — асинхронный электродвигатель (АД) [10];
- управляемый выпрямитель (УВ) — АИН — АД.

Наиболее эффективным способом динамического торможения является включение от независимого источника напряжения в цепь обмоток статора электродвигателя регулятора постоянного тока.

В зависимости от силы постоянного тока в цепи обмоток статора скорость торможения ротора асинхронного двигателя и гашения генерируемой обратной ЭДС выбега регулируется и достигает 0,1–0,7 с. При этом наибольший эффект в управлении процессом торможения обеспечивается при достижении напряжения внешнего источника постоянного тока величин не менее 150 В, а также при величинах сопротивления регулятора тока 1 Ом. Основным недостатком данного подхода является обязательное требование к наличию внешнего источника постоянного тока, что не вызывает необходимости поиска дополнительных конструктивных решений в условиях ПКЭС, а также требует специального размещения тормозного блока в взрывозащищенной оболочке для обеспечения взрывобезопасности.

В современных ПКЭС также возникают определенные сложности для обеспечения эффективности работы выпу-

скаемых устройств защитного отключения, производимых серийно (УЗО), например, типа УАКИ и АЗУР, функционал и настройки которых рассчитаны на электрическую сеть только промышленной частоты [11, 12].

В случае снижения уровня активного сопротивления изоляции всей подземной электрической сети относительно земли до критических значений в ветвях фильтра присоединения УЗО возникают кратные перенапряжения со стороны неуправляемого выпрямителя ЧРЭП за счет зарядной емкости в цепи постоянного тока, а также появляются в цепи измерителя высшие гармоники напряжения [13, 14]. При генерировании обратной ЭДС продолжительность электромагнитного переходного процесса для двигателей мощностью до 45 кВт находится в интервале 1–3 с. При этом в цепях утечки тока количество электричества выше допустимых значений в 2–4 раза (до 150–200 Кл), что резко увеличивает риски поражения человека электрическим током. Эффективность защитного шунтирования поврежденной фазы практического подтверждения не получила из-за низкой добротности, невозможности определения характера фазной утечки и высокой вероятности возникновения более тяжелой двух- или трехфазной утечки при срабатывании блока короткозамыкателя БКЗ, встроенного в УЗО [15, 16].

Частотно-регулируемый электропривод в системе неуправляемый выпрямитель — автономный инвертор напряжения — асинхронный двигатель (НВ-АИН-АД) имеет наибольшие перспективы для работы в ПКЭС. Именно в этой системе электропривода практически реализуется способ динамического торможения асинхронным электродвигателем путем использования тормозного резистора, установленного в звене постоянного тока. Известны успешные решения таких мо-

делей систем электропривода механизмов подачи очистного комбайна, электроприводов скребковых и ленточных конвейеров [17, 18].

Тормозное активное сопротивление для целей реализации режима динамического торможения включается в цепь постоянного тока преобразователя частоты параллельно емкости. Это позволяет реализовывать процесс рекуперации генерируемой асинхронной машиной энергии в тепловую энергию и рассеивать ее на установленном сопротивлении. Условия эксплуатации ПКЭС предусматривают взрывозащищенное исполнение аппаратуры управления, что усложняет отвод рассеиваемого на сопротивлениях тепла. Все это усложняет задачу синтеза эффективных решений. Вместе с тем применение данного вида динамического торможения имеет хорошую перспективу в плане технической реализации для целей применения разных алгоритмов управления.

Цели и задачи

Разработка и модельная имитационная апробация комбинированного способа динамического торможения электродвигателя, работающего в условиях ПКЭС, который основывается на торможении с использованием специального тормозного резистора, а также торможении путем подачи в статорную цепь постоянного тока из соответствующего звена преобразователя частоты, является основной целью настоящих исследований [17, 18].

Такой подход позволяет решить следующие задачи:

- ограничение величины тока в цепи фильтра присоединения, а также в цепи измерителя устройства защитного отключения;
- ограничение в управляемом режиме генерирования обратной ЭДС при наличии значительных величин утечки

тока, протекающего через изоляцию в ПКЭС;

- обеспечение увеличения диапазона управляемого торможения путем ступенчатого изменения величины сопротивления специальных сопротивлений;
- использование положительных качеств и возможностей фрикционного торможения асинхронного электродвигателя [19, 20].

Структура имитационной модели

На специально разработанной модели подземной комбинированной электрической сети (рис. 1) [1] проведен ряд исследований тормозных режимов при свободном выбеге отключаемого асинхронного электродвигателя при следующих режимах:

- динамическое торможение с дополнительным тормозным резистором в звене постоянного тока;
- динамическое торможение посредством включения в статорную цепь регулируемого источника постоянного тока [12, 21].

Источником ЭДС E_a , E_b , E_c являются вторичные обмотки R_r , L_r силового трансформатора, подающего через автоматический выключатель $K-AB$ напряжение на вход преобразователя частоты ПЧ и далее на АД. Для обеспечения требуемого качества электроэнергии установлено фильтро-компенсирующее устройство ФКУ и реакторы LR . Контроль активных сопротивлений фазной изоляции R_a , R_b , R_c на участках до и после ПЧ осуществляется при помощи УЗО, подключенного к силовой цепи через фильтр R_f , L_f , цепь измерителя L_pN , R_pN и независимый источник оперативного тока DC на землю. Дополнительно введены параметры фазных емкостей C_a , C_b , C_c сети относительно земли на участках до и после ПЧ, оказывающие значительное влияние на параметры тока утечки. В звене постоянного тока тормозной модуль

ТМ представлен включенным между полюсами делителем напряжения $R_{\text{тр1}}, R_{\text{тр2}}$ (тормозные резисторы) последовательно с ключом управления $K1$. В цепи постоянного тока через регулирующий резистор $R_{\text{пр}}$ и двухполюсный коммутатор $K2$ на две фазные обмотки подключения АД подается выпрямленный ток.

На рис. 2 приведены характерные осциллограммы, отражающие исследуемые режимы торможения асинхронного электродвигателя при возникновении однофазной утечки тока в подземной комбинированной электрической сети.

В режиме инерционного торможения (рис. 2, а) при активном сопротивлении изоляции 180 кОм/фазу и емкости 0,5 мкФ/фазу после возникновения критической утечки тока через сопротивление $R_{\text{а1}} = 1$ кОм происходит срабатывание УЗО продолжительностью 0,2 с и действующим током в цепи утечки 146 мА. После того как сработает автоматический выключатель, асинхронный электродвигатель начинает работать в режиме генерирования обратной ЭДС. Снижение тока утечки до безопасного уровня 6 мА происходит через 2,8 с. За время аварийного режима через цепь утечки проходит количество электричества 196 Кл, что значительно превышает допустимый уровень 50 Кл (ССБТ. ГОСТ 12.1.038-82).

В режиме динамического торможения тормозным модулем (рис. 2, б) с сопротивлением тормозного резистора $R_{\text{тр1}} = 11,5$ Ом (первый тормозной режим) параметры утечки тока остаются неизменными. Время генерирования обратной ЭДС составляет до 0,8 с, а количество электричества — до 56 Кл. При этом время включения тормозного модуля составляет 0,1 с. При сопротивлении тормозного резистора $R_{\text{тр1}} + R_{\text{тр2}} = 23$ Ом (второй тормозной режим) время генерирования обратной ЭДС увеличивается до 1,1 с, а количество электричества — до 77 Кл.

Величина сопротивления встроенного тормозного резистора ограничена параметрами тормозного блока, поэтому уменьшение $R_{\text{тр1}}$ потребует установки выносного взрывозащищенного блока из-за изменения массогабаритных параметров, что в условиях категорической шахты затруднительно. Установка дополнительного тормозного $R_{\text{тр2}}$, включенного по схеме делителя напряжения, необходима для реализации ограничения уровня напряжения выпрямленного тока при его подаче в статорную цепь переменного тока электродвигателя (третий тормозной режим). В этом случае (рис. 2, в) остаточная ЭДС после срабатывания тормозного модуля гасится практически мгновенно $t_{\text{ЭДС}} = 0,05$ с.

Таким образом, возможность использования включения выпрямленного напряжения из звена постоянного тока преобразователя частоты в статорные обмотки асинхронного электродвигателя в комбинации с динамическим торможением при помощи тормозного модуля позволяет достичь эффективного гашения генерируемой обратной ЭДС и эффективного торможения.

Реализация способа динамического торможения

Проведенные исследования позволили предложить решения по комбинированному устройству динамического торможения (КУДТ) [15].

На рис. 3 представлена структурная схема КУДТ асинхронного электродвигателя (АД) преобразователем частоты (ПЧ) с НВ-АИН, включенного в электрическую сеть с автоматическим выключателем (АВ) со специальной отключающей катушкой (ОК), замыкающим контактом (К) и устройством защитного отключения (УЗО), которое содержит блок управления (БУ) тормозным модулем (ТМ), индуктивно-емкостной фильтр (Ф), регулятор тока (РТ), тиристорный

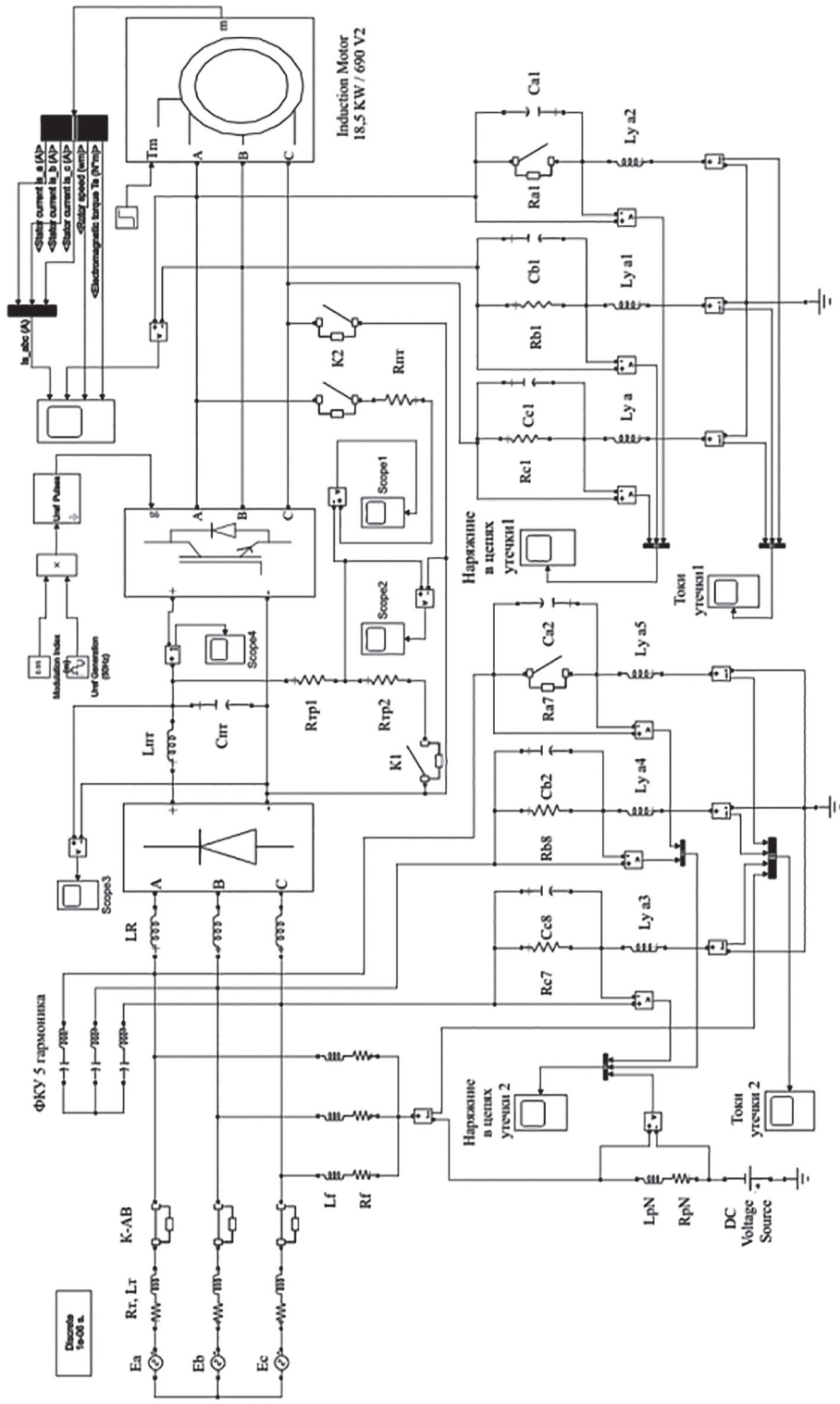


Рис. 1. Имитационная модель ПКЭС
 Fig. 1. Simulation model of underground combined electric networks with adjustable frequency

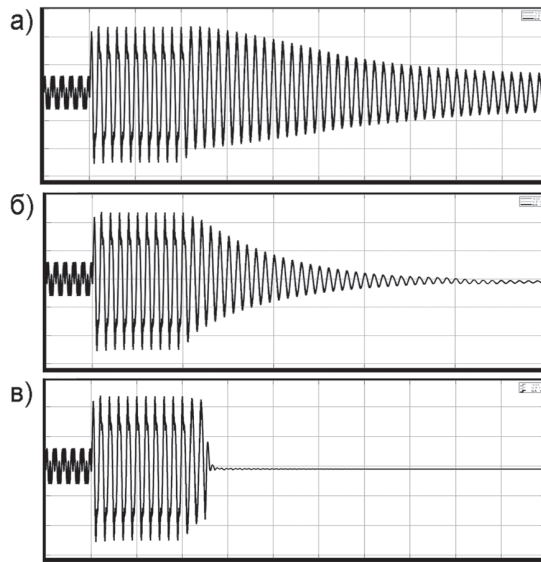


Рис. 2. Осциллограммы тока при различных видах торможения: инерционный (а); тормозным резистором (б); комбинированный (в)

Fig. 2. Current oscillograms for various types of braking: inertial (a); brake resistor (b); combined (v)

контактор (ТК) и фрикционный тормоз (ФТ).

Данное устройство реализует возможность регулирования тормозного момента на валу электродвигателя в нормальном режиме работы и ограничения времени генерирования обратной ЭДС за счет дискретного изменения тормозного сопротивления и подачи тока непосредственно на статорные обмотки из звена постоянного тока ПЧ с НВ-АИН.

Выводы

Применение предлагаемого комбинированного устройства динамического торможения позволяет:

- расширить диапазон регулирования тормозного тока в нормальном режиме работы за счет использования двух тормозных резисторов, включенных по схеме делителя напряжения в тормозном блоке;
- снизить риски опасного воздействия обратной ЭДС отключаемого уст-

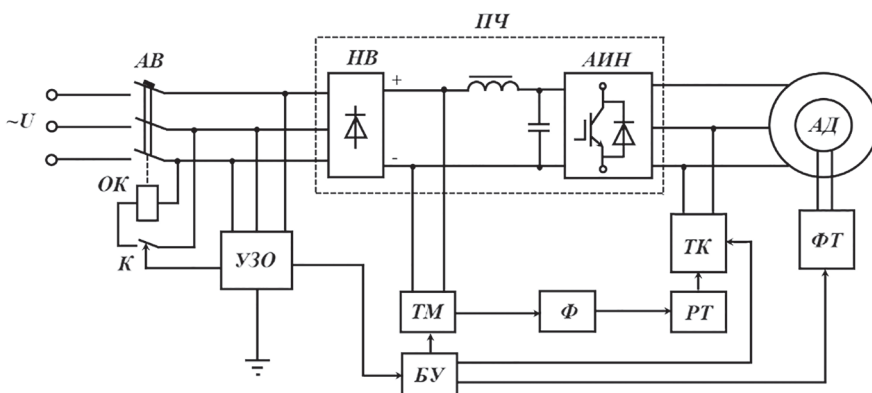


Рис. 3. Структурная схема КУДТ

Fig. 3. Block diagram of the combined dynamic braking device

ройством защитного отключения электродвигателей при критическом режиме утечки тока через изоляцию за счет включения в обмотки статора регулируемого напряжения из звена постоянного тока преобразователя частоты;

- ограничить в два раза величину тока в ветвях фильтра присоединения к электрической сети и в цепи измерителя

УЗО в режимах генерирования обратной ЭДС;

- использовать дополнительные возможности фрикционного торможения электродвигателя за счет реализации алгоритма функционирования блока управления системой динамического торможения в критических режимах работы электропривода асинхронного электродвигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bahov P., Alexandrova M.* Comparative analysis of conventional methods for braking a three-phase induction motor and research on efficient combinations of methods for efficient braking process / International Conference Automatics and Informatics (ICAI), Varna, Bulgaria. 2022, pp. 129–134. DOI: 10.1109/ICAI55857.2022.9960007.

2. *Wati T., Masfufiah I., Suheta T., Patria N., Putra U., Munir M.* Dynamic braking of three phase induction motor using inject dc voltage and capacitor load // Fourth International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE), Surabaya, Indonesia. 2021, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICVEE54186.2021.9649673.

3. *Руссиян С. А.* Исследование состояния цепи утечки тока на землю в электросети участка шахты напряжением 3 (3,3) кВ // Научный вестник Национального технического университета. Серия Горная электромеханика. – 2013. – № 2. – С. 213–222.

4. *Yeh C.-C., Demerdash N. A. O.* Fault tolerant operations in adjustable-speed drives and soft starters for induction motors / IEEE Power Electronics Specialists Conference, Orlando, FL, USA. 2007, pp. 1942–1949. DOI: 10.1109/PESC.2007.4342301.

5. *Денисова Е. В., Маренич К. Н., Дубинка Е. С.* Двухскоростной асинхронный двигатель как источник опасности электропоражения в условиях эксплуатации технологических участков угольных шахт // Горная промышленность. – 2021. – № 4. – С. 145–152. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-145-152.

6. *Aree P., Prempri N.* Steady-state torque characteristics of squirrel-cage induction motors under DC injection braking / International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI), Nakhon Ratchasima, Thailand. 2021, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICPEI52436.2021.9690676.

7. *Muhaimin M. I.* Dynamic braking application on three phase induction motor using PLC // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 536, no. 1, pp. 1–9. DOI: 10.1088/1757-899X/536/1/012097.

8. *Giri Fouad* AC electric motors control: Advanced design techniques and applications. 2013, 592 p. DOI: 10.1002/9781118574263.

9. *Toirov O.* Improve operational efficiency of regulated conveyor installation of the mining industry // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2018, vol. 5, no. 3, pp. 5464–5471.

10. *Mirzaeva G., Carter D., Uddin M., Stepien P.* Electrically safe variable speed drive for underground mining applications / IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Baltimore, MD, USA. 2019, pp. 1–8. DOI: 10.1109/IAS.2019.8912334.

11. *Бабокин Г. И., Шпрехер Д. М., Колесников Е. Б.* Метод повышения безопасной эксплуатации горного электрооборудования путем прогнозирования сопротивления изоляции // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 2. – С. 34–45. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-34-45.

12. *Пичуев А. В., Петров В. Л.* Обоснование схемы замещения шахтной подземной электрической сети для анализа режимов утечки тока через изоляцию // Горные науки и технологии. – 2023. – Т. 8. – № 1. – С. 78–86. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-01-72.

13. *Петров В. Л., Пичуев А. В.* Оценка эффективности средств повышения качества электроэнергии в системе частотно-регулируемого электропривода скребковых конвейеров // Горные науки и технологии. – 2024. – Т. 9. – № 1. – С. 60–69. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-01-198.

14. Петров В. Л., Пичуев А. В. Оценка опасности несимметричных режимов утечки тока через изоляцию в подземных электрических сетях горных предприятий // Энергобезопасность и энергосбережение. — 2022. — № 5. — С. 15–22.

15. Бабокин Г. И., Шпрехер Д. М., Колесников Е. Б., Овсянников Д. С. Исследование частотного пуска двухдвигательного электропривода скребкового конвейера методом математического моделирования // Электромеханика. — 2022. — № 1. — С. 49–55. DOI: 10.17213/0136-3360-2022-1-49-55.

16. Шпрехер Д. М., Бабокин Г. И., Колесников Е. Б., Зеленков А. В. Применение адаптивного ПИ-регулятора в системе регулирования нагрузки очистного комбайна // Известия вузов. Электромеханика. — 2020. — Т. 63. — № 5. — С. 46–54. DOI: 10.17213/0136-3360-2020-5-46-54.

17. Иванов Г. М. Автоматизированный электропривод в промышленности. — Ульяновск: УлГТУ, 2013. — 442 с.

18. Ильинский Н. Ф., Москаленко В. В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. — М.: Издательский центр «Академия», 2008. — 208 с.

19. Кацман М. М. Электрический привод. — М.: Издательский центр «Академия», 2011. — 243 с.

20. Кисаримов Р. А. Электропривод: Справочник. — М.: РадиоСофт, 2008. — 352 с.

21. Aree P. Modelling and simulation of induction machine under DC current injection braking / 5th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE), Osaka, Japan. 2020, pp. 124–129. DOI: 10.1109/ICCRE49379.2020.9096474. **PLAS**

REFERENCES

1. Bahov P., Alexandrova M. Comparative analysis of conventional methods for braking a three-phase induction motor and research on efficient combinations of methods for efficient braking process. *International Conference Automatics and Informatics (ICAI)*, Varna, Bulgaria. 2022, pp. 129–134. DOI: 10.1109/ICAI55857.2022.9960007.

2. Wati T., Masfufiah I., Suheta T., Patria N., Putra U., Munir M. Dynamic braking of three phase induction motor using inject dc voltage and capacitor load. *Fourth International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE)*, Surabaya, Indonesia. 2021, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICVEE54186.2021.9649673.

3. Russiyan S. A. Study of the state of the current leakage circuit to the ground in the electrical network of a mine section with a voltage of 3 (3.3) kV. *Scientific Bulletin of the National Technical University. Series Mining Electromechanics*. 2013, no. 2, pp. 213–222. [In Russ].

4. Yeh C.-C., Demerdash N. A. O. Fault tolerant operations in adjustable-speed drives and soft starters for induction motors. *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Orlando, FL, USA. 2007, pp. 1942–1949. DOI: 10.1109/PESC.2007.4342301.

5. Denisova E. V., Marenich K. N., Dubinka E. S. A dual-speed induction motor as a source of electrical hazard in operating conditions of coal mine process support areas. *Russian Mining Industry Journal*. 2021, no. 4, pp. 145–152. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-145-152.

6. Aree P., Prempri N. Steady-state torque characteristics of squirrel-cage induction motors under DC injection braking. *International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*, Nakhon Ratchasima, Thailand. 2021, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICPEI52436.2021.9690676.

7. Muhaimin M. I. Dynamic braking application on three phase induction motor using PLC. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 536, no. 1, pp. 1–9. DOI: 10.1088/1757-899X/536/1/012097.

8. Giri Fouad AC electric motors control: Advanced design techniques and applications. 2013, 592 p. DOI: 10.1002/9781118574263.

9. Toirov O. Improve operational efficiency of regulated conveyor installation of the mining industry. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. 2018, vol. 5, no. 3, pp. 5464–5471.

10. Mirzaeva G., Carter D., Uddin M., Stepien P. Electrically safe variable speed drive for underground mining applications. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Baltimore, MD, USA. 2019, pp. 1–8. DOI: 10.1109/IAS.2019.8912334.

11. Babokin G. I., Shprekher D. M., Kolesnikov E. B. Method of improving safe operation of mining machinery electrics by forecasting insulation resistance. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 2, pp. 34–45. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-34-45.

12. Pichuev A. V., Petrov V. L. Equivalent circuit for mine power distribution systems for the analysis of insulation leakage current. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023, vol. 8, no. 1, pp. 78–86. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-01-72.
13. 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 (Russia)*. 2024, vol. 9, no. 1, pp. 60–69. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-01-198.
14. Petrov V. L., Pichuev A. V. Hazard assessment of asymmetric modes for leakage current flowing through insulation in underground mine electrical grids. *Energy Safety and Energy Economy*. 2022, no. 5, pp. 15–22. [In Russ].
15. Babokin G. I., Shprecher D. M., Kolesnikov E. B., Ovsyannikov D. S. Investigation of the frequency start of a double-motor electric drive of a scraper conveyor by the method of mathematical modeling. *Electromechanics*. 2022, no. 1, pp. 49–55. [In Russ]. DOI: 10.17213/0136-3360-2022-1-49-55.
16. Shprekher D. M., Babokin G. I., Kolesnikov E. B., Zelenkov A. V. Application of the adaptive PI-Controller in the system of the load regulation of the shearer. *Russian Electromechanics*. 2020, vol. 63, no. 5, pp. 46–54. [In Russ]. DOI: 10.17213/0136-3360-2020-5-46-54.
17. Ivanov G. M. *Avtomatizirovannyy elektropriwod v promyshlennosti* [Automated electric drive in industry], Ulyanovsk, ULGTU, 2013, 442 p.
18. Ilyinsky N. F. N. F., Moskalenko V. V. *Elektropriwod: energo- i resursosberezhenie* [Electric drive: energy and resource saving], Moscow, Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2008, 208 p.
19. Katsman M. M. *Elektricheskiy privod* [Electric drive], Moscow, Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2011, 243 p.
20. Kisarimov R. A. *Elektropriwod: Spravochnik* [Electric drive: Directory], Moscow, RadioSoft, 2008, 352 p.
21. Aree P. Modelling and simulation of induction machine under DC current injection braking. *5th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)*, Osaka, Japan. 2020, pp. 124–129. DOI: 10.1109/ICCRE49379.2020.9096474.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Вадим Леонидович¹ — д-р техн. наук, профессор, проректор, e-mail petrovv@misis.ru, Scopus ID 8919065900, ORCID ID: 0000-0002-6474-5349,
 Пичуев Александр Вадимович¹ — д-р техн. наук, доцент, e-mail allexstone@mail.ru, Scopus ID 57209798580, ORCID ID: 0000-0001-7457-5702,
¹ НИТУ МИСИС.

Для контактов: Петров В.Л., e-mail: e-mail petrovv@misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.L. Petrov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector, e-mail petrovv@misis.ru, Scopus ID 8919065900, ORCID ID: 0000-0002-6474-5349,
 A.V. Pichuev¹, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail allexstone@mail.ru, Scopus ID 57209798580, ORCID ID: 0000-0001-7457-5702,
¹ NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: V.L. Petrov, e-mail: e-mail petrovv@misis.ru.

Получена редакцией 22.04.2024; получена после рецензии 21.05.2024; принята к печати 10.07.2024.
 Received by the editors 22.04.2024; received after the review 21.05.2024; accepted for printing 10.07.2024.