ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(2):47-58
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.313.333:004.942:622.23.05 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_47

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИВОДОВ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНИКОВ В СРЕДЕ SIMINTECH

А.А. Соколов[1], М.В. Захаров[1], Л.Г. Орлова[1], В.В. Кукарцев[2,3], А.А. Ступина[3,4,5]

[1] Филиал Южного федерального университета в г. Геленджике, Геленджик, Россия, e-mail: anso@sfedu.ru
[2] НОЦ Технологии искусственного интеллекта, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия
[3] РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия
[4] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[5] Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС, Железногорск, Россия

Аннотация: Рассмотрен реализованный авторами процесс моделирования отдельных режимов работы асинхронных двигателей приводов шахтных подъемников. Приведены впервые созданные модели, построены графические зависимости исследуемых электроэнергетических характеристик в среде SimInTech. Выдвинуто предположение о возможном исследовании в режиме реального времени пиковых нагрузок асинхронных двигателей приводов шахтных подъемников с целью повышения надежности работы технологических процессов горнодобывающих предприятий. Показано, что реализация программного обеспечения в качестве аппарата для исследования электроэнергетических характеристик электрооборудования предприятий горно-обогатительной отрасли и, в частности, моделирования режимов работы асинхронных двигателей с учетом доказанной ранее гипотезы о возможности моделирования различных аварийных режимов работы. Выполненные исследования создают определенный научно-практический задел в области моделирования с применением отечественного программного обеспечения различных режимов работы асинхронных двигателей, включая нештатные. Данные моделирования асинхронных двигателей приводов шахтных подъемников с учетом реализации предложенных моделей в режиме реального времени могут быть положены в основу машинного обучения элементов системы автоматизированного контроля и учета электроэнергии горного предприятия. Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что применение отечественного программного обеспечения SimInTech в качестве аппарата для моделирования режимов работы асинхронных двигателей приводов шахтных подъемников демонстрирует его преимущества перед существующими зарубежными аналогами.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, математическая модель, численное моделирование, электромагнитный момент, моделирование в среде SimInTech, скорость вращения ротора, режимы нагрузки, электрооборудование.

Для цитирования: *Соколов А. А., Захаров М. В., Орлова Л. Г., Кукарцев В. В., Ступина А. А.* Моделирование отдельных режимов работы асинхронных двигателей приводов шахтных подъемников в среде Simintech // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2. – С. 47–58. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_47.

Modeling certain operating conditions of asynchronous motors of mine hoists in SimInTech

A.A. Sokolov[1], M.V. Zakharov[1], L.G. Orlova[1], V.V. Kukartsev[2,3], A.A. Stupina[3,4,5]

[1] Branch of Southern Federal University in Gelendzhik, Gelendzhik, Russia, e-mail: anso@sfedu.ru
[2] Artificial Intelligence Technology Scientific and Education Center, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
[3] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia
[4] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
[5] Siberian Fire and Rescue Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Zheleznogorsk, Russia

Abstract: The authors have modeled certain operating conditions of asynchronous motors of mine hoists. The first-developed models are described, and the curves of the electric energy characteristics are plotted in SimInTech. It is supposed to be possible to investigate peak loads of asynchronous motors of mine hoists in real time with a view to improving reliability of performance of process flows in mines. The article shows that the software implementation offers a tool for the analysis of the electric energy characteristics of mining machinery, in particular, modeling of operating conditions of asynchronous motor with the regard to the preproved hypothesis on feasibility of modeling various emergency states. This research creates a certain theoretical and practical backup in the sphere of modeling different operating conditions, including off-standard, of asynchronous motors using domestic software programs. The modeling data on asynchronous motors of mine hoists with the implementation of the proposed models in real time can serve a framework for the machine learning of components of automated control and statistics of electric energy at a mine. The research findings make it possible to draw a conclusion that domestic software program SimInTech applied as the modeling tool for operating conditions of asynchronous motors of mine hoists demonstrates its advantages over the existing foreign analogs.

Key words: asynchronous motor, mathematical model, numerical modeling, electromagnetic moment, modeling in SimInTech, rotor speed, load conditions, electric equipment.

For citation: Sokolov A. A., Zakharov M. V., Orlova L. G., Kukartsev V. V., Stupina A. A. Modeling certain operating conditions of asynchronous motors of mine hoists in SimInTech. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2):47-58. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_47.

Введение

При эксплуатации асинхронных двигателей часто имеет место появление различных режимов работы, включая аварийные, поэтому необходимость решения научных задач в области исследования и моделирования с учетом дальнейших прогнозов режимов работы [1] обусловлена целью исследования поведения асинхронных двигателей в условиях эксплуатации, характерных для горнодобывающей отрасли в подобных режимах, и создания требуемых для этого дата-центров с обновляемыми в режиме онлайн базами данных.

Полученные сведения могут быть использованы при проектировании принципиально новых способов организации автоматической защиты от нештатных режимов работы в области горного дела, а также других областях промышленности с непрерывным циклом производства [2]. Примером могут служить двигатели приводов шахтных подъемни-

ков, не допускающие остановок в процессе работы, так как это проявляется в значительных материальных издержках, а также в вероятном появлении опасности для персонала. Неисправности асинхронных двигателей могут быть следствием ряда причин, приводящих, в конечном счете, к их выходу из строя. Обращаясь к классической теории электромеханики, можно выделить две основные группы повреждений — электрические и механические. Останавливаясь более подробно на повреждениях электрического характера, необходимо отдельно выделить повреждения обмоток двигателя, так как они являются самой распространенной причиной возникновения аварий асинхронных двигателей при эксплуатации, достигая 85—90% всех случаев отказов. Такая статистика обусловлена уязвимостью обмотки, которая является, пожалуй, наиболее слабым местом в конструкции асинхронных двигателей, поскольку ее изготовление связано с рядом сложных технологических процессов и сопряжено с применением ряда материалов, качество каждого из которых напрямую влияет на показатели надежности катушек как конечного изделия. По этим причинам аварийные ситуации, вызванные повреждениями обмоток асинхронных двигателей при эксплуатации, все еще носят постоянный характер. Так, межвитковое короткое замыкание — один из наиболее распространенных (до 93% всех случаев повреждений обмоток) случаев проявления электрических неисправностей асинхронных двигателей [3—5]. Для оперативного мониторинга и контроля технологических процессов и повышения эффективности работы автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии (далее АСКУЭ) необходим поток данных в реальном времени по электроэнергетическим параметрам, включая данные моделирования аварийных режимов работы в режиме онлайн.

Уровень травматизма в горнодобывающей промышленности по-прежнему высок по сравнению с другими видами производств [6]. При движении вниз или вверх по стволу шахты работники горной отрасли подвергаются некоторым рискам: транспортное средство может скатиться вниз по стволу или врезаться из-за вышедшего из-под контроля шахтного подъемника. В то время как несчастные случаи при подъеме грузов составляют всего 1,2% от общего числа смертельных случаев на шахтах за период 2000—2019 гг. (согласно данным Управления по безопасности и гигиене труда на шахтах) и являются довольно редкими, большое количество рабочих, находящихся одновременно в шахтном транспортном средстве, может привести к крупной катастрофе [7—9]. Потеря контроля над шахтным подъемником является сложной проблемой, которую необходимо решать, поскольку подобные инциденты иногда происходят, например — в провинции Квебек. Действительно, большинство недавних инцидентов с транспортными средствами шахты связаны не с обрывом подъемного каната, а с командными или организационными проблемами.

С учетом того, что в некоторой степени шахтные подъемники повторно вводят в эксплуатацию, используя старые механические части (двигатель, шкивы и барабаны), моделирование режимов работы асинхронных двигателей приводов шахтных подъемников [10—12] является актуальным направлением исследований и будет рассмотрено в настоящей работе.

Цель исследований — реализовать моделирование работы асинхронных двигателей приводов шахтных подъемников в отечественной среде моделирования. Объектом исследования явля-

ются асинхронные двигатели шахтных подъемников предприятий горнорудного производства, под нагрузкой и без нее; предметом исследований являются методы создания моделей в программной среде и моделирование электроэнергетических характеристик электрооборудования.

Материалы и методы исследования

В работе применяются методы моделирования в среде SimInTech, с учетом сформированных ранее компетенций на основе собственного опыта моделирования в среде SimInTech по выбору функционала, оборудования, электроэнергетических параметров, типа сети, видов электрической нагрузки, часть из которых ранее освещалась в работе [5], в которой, в частности, приводятся результаты исследований авторов по несимметричным режимам работы и составлению математических моделей для их изучения. Моделирование различных режимов работы трансформаторов, применяемых на подстанциях горнодобывающей промышленности приведено в работе [3]. В указанных выше работах описано ранжирование различных типов несимметрии по частоте их возникновения в высоковольтных асинхронных двигателях горнодобывающей промышленности и отражены проблемы и характерные особенности моделирования несимметричных режимов асинхронного двигателя с учетом насыщения стали магнитопровода. Была принята во внимание и разработанная там же математическая модель асинхронного двигателя, модифицированная относительно ее классической записи, построенная на базе трехфазной естественной системы координат, позволяющая рассчитывать токи и электромагнитный момент при наличии несимметрии активных сопротивлений фаз обмотки ротора, приведены итоги моделирования этого режима [13—15].

Технические характеристики электродвигателя
Technical specifications of electric motor

Наименование характеристики	Параметры
Мощность в режиме S1	55 кВт
Напряжение, линейное/фазное	660/380 В
Частота тока	50 Гц
Ток статора	60,5/105 А
Скольжение	1,5%
КПД	92,8%
cos φ	0,85
$M_{макс} / M_{ном}$	3,1 о.е.
$M_{пуск} / M_{ном}$	3,2 о.е.
$I_{пуск} / I_{ном}$	7,5 о.е.
Момент инерции	0,59 кг · м^2
Мощность в режиме S2	75 кВт

Направление исследований моделирования различных режимов работы асинхронных двигателей горно-обогатительных комбинатов в специальных виртуальных средах моделирования является актуальной научной задачей, позволяющей повысить путем снижения случаев нештатных режимов работы асинхронных двигателей эффективность технологических процессов горного предприятия [16—18]. С помощью приведенных ниже собственных методологий исследований авторы решали задачи по созданию, исследованию и анализу моделей в среде SimInTech, максимально адекватно отображающих соответствие результатов теоретических изысканий практическим задачам для электроаппаратов горного производства.

С этой целью на основании проведенного ранее анализа востребованного и часто применяемого в горно-обогатительной отрасли оборудования, рабо-

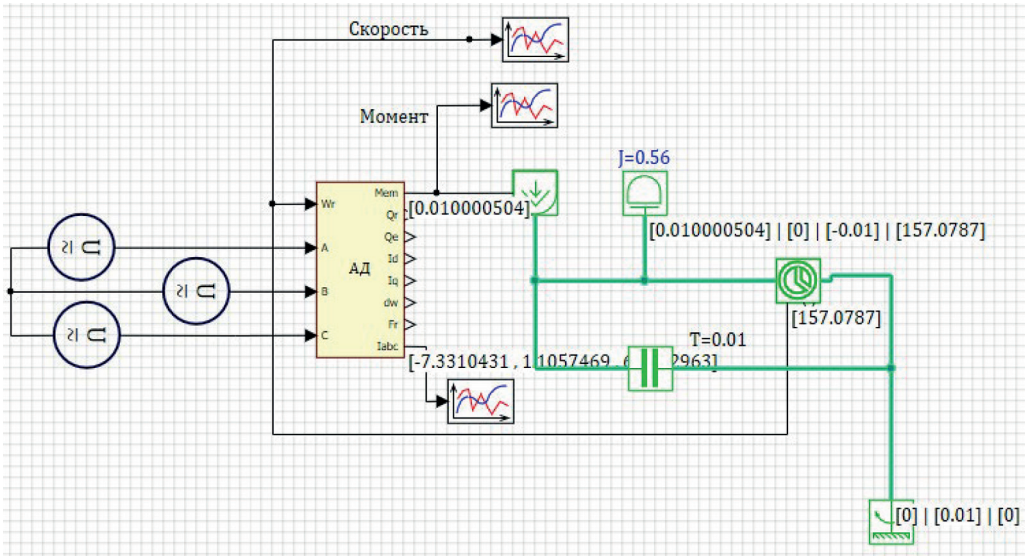

Рис. 1. Моделирование работы асинхронного двигателя в среде SimInTech, без нагрузки
Fig. 1. Simulation of asynchronous motor operation in SimInTech, without load

тающего в сетях 0,4 кВ, были выбраны для лабораторного эксперимента и моделирования удовлетворяющие решаемым задачам виды электрооборудования, после ранжирования которых по степени распространенности оставили электродвигатели типа 5ЭДКОФ250 М4 У2,5 — взрывобезопасные трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, предназначенные для многодвигательного привода скребковых и ленточных конвейеров, перегружателей и проходческих комбайнов в шахтах, опасных по содержанию рудничного газа (метана) и угольной пыли [19—21]. Технические характеристики представлены в таблице.

Авторами была предложена и реализована в математическом виде модель без учета насыщения в среде SimInTech,

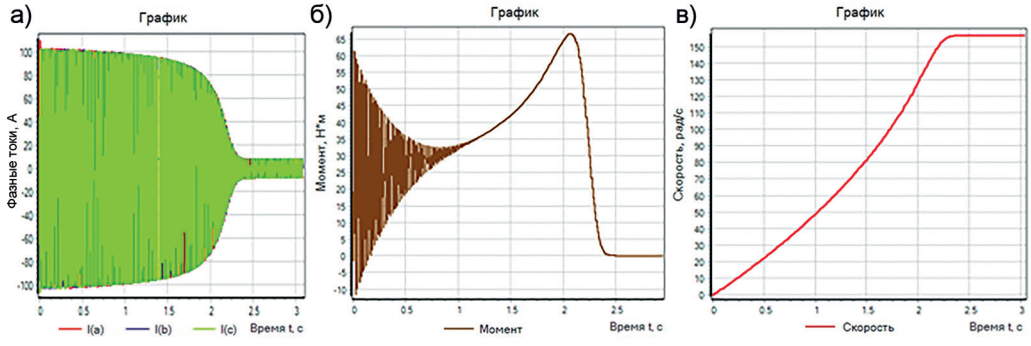

Рис. 2. Диаграммы при симметричном режиме работы без нагрузки. Зависимость фазных токов от времени от 0 с до 3 с (а); зависимость электромагнитного момента от времени (б); зависимость скорости вращения ротора от времени (в)
Fig. 2. Diagrams for a symmetrical no-load operation. Dependence of phase currents on time from 0 to 3 s (a); dependence of electromagnetic torque on time (b); dependence of rotor rotation speed on time (v)

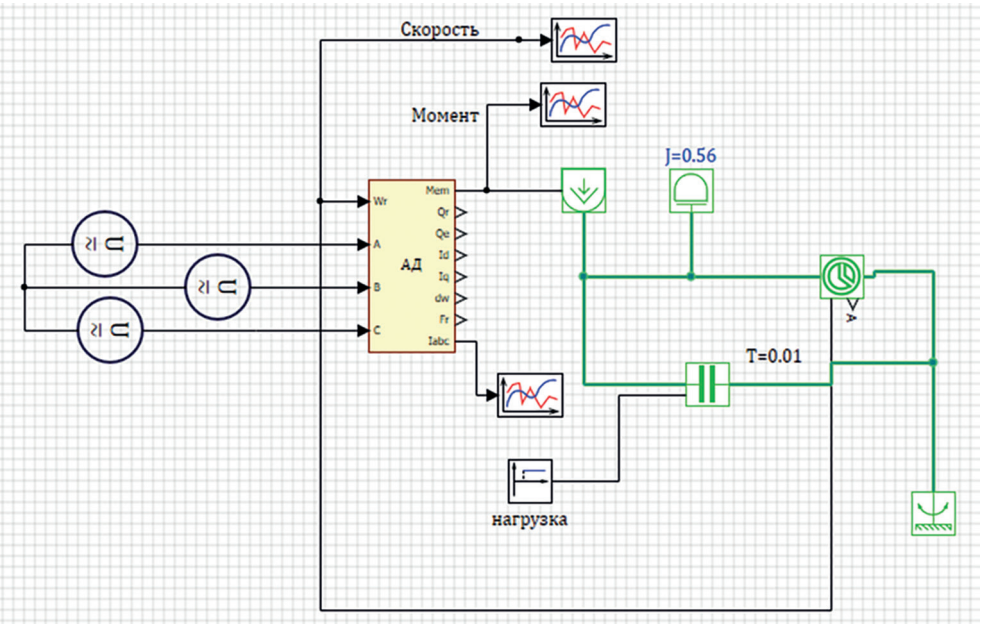

Рис. 3. Моделирование работы асинхронного двигателя в среде SimInTech, с нагрузкой
Fig. 3. Simulation of asynchronous motor operation in SimInTech, with load

графически представленная на рис. 1 и состоящая из трех частей. Электрическая часть модели реализуется на элементах библиотеки «Электрические Цепи — Динамика» и включает в себя 3-фазный источник напряжения. Вторая часть реализуется на элементах библиотеки «Электроприводы» и применяется элемент «ЭП-АД Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (без учета насыщения)». В третьей части модели используются элементы библиотеки «Механика»: идеальный источник момента вращательного движения, идеальный датчик момента вращательного движения, инерция вращательного движения, заделка вращательного движения, трение вращательного движения.

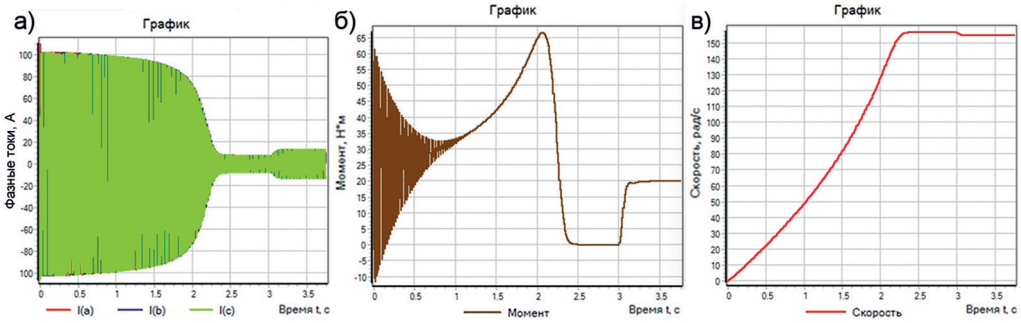

*Рис. 4. Характеристики работы асинхронного двигателя с нагрузкой 20 Н*м. Зависимость фазных токов от времени (а); зависимость электромагнитного момента от времени (б); зависимость скорости вращения ротора от времени (в)*
*Fig. 4. Characteristics of an asynchronous motor with a load of 20 N*m. Dependence of phase currents on time (a); dependence of electromagnetic torque on time (b); dependence of rotor speed on time (v)*

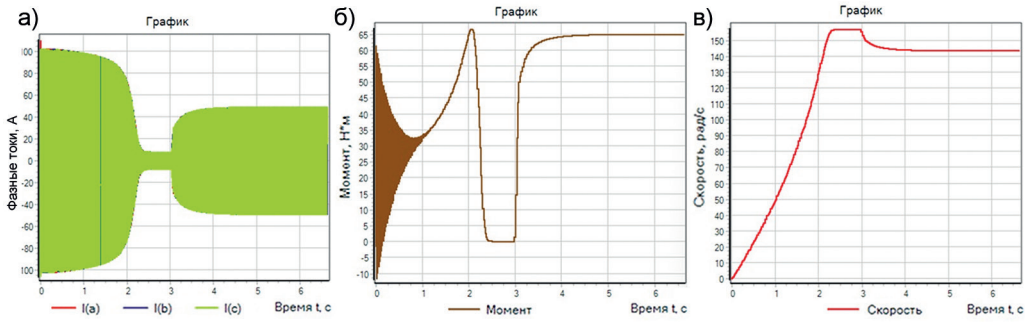

*Рис. 5. Характеристики работы асинхронного двигателя с нагрузкой 65 Н*м. Зависимость фазных токов от времени (а); зависимость электромагнитного момента от времени (б); зависимость скорости вращения ротора от времени (в)*

*Fig. 5. Characteristics of an asynchronous motor with a load of 65 N*m. Dependence of phase currents on time (a); dependence of electromagnetic torque on time (b); dependence of rotor speed on time (v)*

На рис. 2 представлены диаграммы при симметричном режиме работы асинхронного двигателя без нагрузки. Диаграммы, представленные на рис. 2, показывают, что функционирование разработанной модели адекватно условиям промышленной эксплуатации. Пусковой ток достигает больших величин, как и должно быть, при достижении скорости холостого хода ток снижается до номинального. Данные, приведенные на диаграммах, соответствуют поведению реального электродвигателя на объектах горнодобывающей отрасли.

На рис. 3 приведена модель симметричного режима с нагрузкой. В этом случае через 3 с после пуска двигателя на вал мгновенно подается заданная нагрузка. Таким образом, происходит моделирование резких ударных нагрузок на двигатель и можно наблюдать его поведение в различных режимах, в том числе и предаварийных. Кроме того, можно менять время подачи нагрузки и можно исследовать работу двигателя и при пуске с большой нагрузкой. Иными словами, разработанная модель позволяет экспериментировать с двигателем, как с настоящим.

Исследования асинхронного двигателя проводились для различных режимов нагрузки. На рис. 4 представлены диаграммы работы асинхронного двигателя с нагрузкой 20 Н*м. В качестве нагрузки используется элемент «трение вращательного движения».

На рис. 5 представлены диаграммы работы асинхронного двигателя с нагрузкой 65 Н*м.

Обсуждение результатов

В ходе исследований авторами создан ряд моделей, позволяющих практически реализовать моделирование отдельных режимов работы асинхронных двигателей приводов шахтных подъемников в среде SimInTech. Полученные графические зависимости позволили выявить принципиальные отличия, проявляющиеся в поведении двигателя при наличии различных нагрузок, вследствие чего можно отметить следующие основные особенности:

- сравнительный анализ полученных графиков на рис. 2, 4, 5 в режимах работы под нагрузкой и без нее показал удовлетворительное совпадение исследуемых характеристик электродвигателя с его моделью;
- результаты экспериментальных исследований показывают соответствие с теоретическими исследованиями, что

подтвердило ожидаемую валидность метода моделирования SimInTech при интерпретации экспериментальных данных в лабораторных условиях.

Таким образом, реализация программного обеспечения в качестве инструмента имитационного моделирования для исследования электроэнергетических характеристик электрооборудования предприятий горно-обогатительной отрасли, и в частности, моделирования режимов работы асинхронных двигателей, с учетом доказанной ранее гипотезы о возможности моделирования одновременно различных аварийных режимов работы создает определенный научно-практический задел в исследуемой области.

Данные моделирования асинхронных двигателей приводов шахтных подъемников с учетом реализации предложенных моделей в режиме реального времени могут быть положены в основу машинного обучения элементов системы автоматизированного контроля и учета электроэнергии горного предприятия [22 — 24].

Кроме того, возможен запуск разработанной модели в реальном времени, то есть фактически возможно моделирование электродвигателя в полунатурном режиме (hardware-in-the-loop, HIL). Программа SimInTech позволяет это, но для режима HIL необходимо устройство на базе микроконтроллера или программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), способное работать в реальном времени. В этом режиме можно проводить эксперименты с моделью, как с настоящим электродвигателем, при этом применяя реальное измерительное оборудование.

Выводы

Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что применение отечественного программного обеспечения SimInTech в качестве аппарата для моделирования режимов работы асинхронных двигателей приводов шахтных подъемников демонстрирует его преимущества перед существующими зарубежными аналогами программного обеспечения и имеет следующие достоинства:

- моделирование базируется на языке функциональных блоков, а не только на математических формулах;
- предложенная модель легко адаптируется под любые необходимые условия эксперимента;
- возможность запуска модели в реальном времени (HIL).

Заключение

На основе созданных моделей в среде SimInTech исследованы режимы работы асинхронных двигателей привода шахтных подъемников под нагрузкой и без нее, которые позволяют обеспечивать процесс моделирования в режиме реального времени, тем самым повышая надежность работы шахтного электрооборудования в условиях категорийности по метану.

Предложенные модели в среде Sim InTech, реализующие на практике моделирование отдельных режимов работы асинхронных двигателей приводов шахтных подъемников, успешно внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров направлений 13.03.02 и 27.03.04 в филиале Южного федерального университета в г. Геленджике.

В настоящее время авторы завершают процесс создания баз данных по электроэнергетическим характеристикам асинхронных двигателей, исследуемых в настоящей работе в среде SimInTech, для их дальнейшей реализации при машинном обучении элементов системы автоматизированного контроля и учета электроэнергии отдельно взятого горнодобывающего предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зиновьева О. М.*, *Смирнова Н. А.* К вопросу оценки надежности технических устройств на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 1. — С. 157—168. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_157.

2. *Баловцев С. В.*, *Меркулова А. М.* Комплексная оценка надежности зданий, сооружений и технических устройств горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 3. — С. 170—181. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170.

3. *Komljenovic D.*, *Groves W. A.*, *Kecojevic V. J.* Injuries in U.S. Mining operations — a preliminary risk analysis // Safety Science. 2008, vol. 46, no. 5, pp. 792—801. DOI: 10.1016/j.ssci.2007.01.012.

4. *Kecojevic V., Komljenovic D., Groves W., Radomsky M.* An analysis of equipment-related fatal accidents in U.S. Mining operations: 1995—2005 // Safety Science. 2007, vol. 45, no. 8, pp. 864—874. DOI: 10.1016/j.ssci.2006.08.024.

5. *Соколов А. А.*, *Орлова Л. Г.*, *Башмур К. А.*, *Кузьмич Р. И.*, *Кукарцев В. В.* Моделирование различных режимов работы трансформаторов, применяемых на подстанциях горнодобывающей промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 11-1. — С. 278—291. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_278.

6. *Bertrand Galy, Laurent Giraud* Risk mitigation strategies for automated current and future mine hoists. Safety Science. 2023, vol. 167, no. 4. DOI: 10.1016/j.ssci.2023.106267.

7. *Lavrenov E. O.*, *Temlyakova Z. S.*, *Vilberger M. E.*, *Toporkov D. M.*, *Temlyakov A. A.* Electrical asymmetry level influence on quality attributes of an induction motor // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1661, no. 1, article 012118. DOI: 10.1088/1742−6596/1661/1/012118.

8. *Shivkumar V. Ayer* Modeling and Python simulation of magnetism for power electronics applications. Chapter 4 / Modeling and simulation of transformers. Electronic books: Engineering, Engineering (R0). Springer Cham. 2022, vol. 214, pp. 107—159. DOI: 10.1007/978-3-030-96768-0_4.

9. *Liu J., Yao Q., Hu Ya.* Predictive control for load frequency of hybrid power system with wind power and thermal power // Energy. 2019, vol. 172, no. 16, pp. 555—565. DOI: 10.1016/j.energy.2019.01.071.

10. *Sigrist L., Rouco L.* An induction motor model for system frequency response models // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2017, vol. 27, article e2413. DOI: 10.1002/etep.2413.

11. *Reza Khalili Senobari, Seyed Ebrahim Hosseini Kakolaki, Javad Sadeh* Comprehensive experimental study on a wound-rotor asynchronous machine fault detection through frequency response analysis // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2025, vol. 170, article 110852. DOI: 10.1016/j.ijepes.2025.110852.

12. *Пронина А. К.*, *Путилин К. П.* К вопросу построения защиты асинхронного двигателя от внутренней несимметрии и внутренних коротких замыканий // Journal of Advanced Research in Technical Science. — 2019. — № 17−1. — С. 96—101. DOI: 10.26160/2474-5901-2019-17-96-101.

13. *Суворов И. Ф.*, *Романова В. В.*, *Хромов С. В.* Исследование влияния несимметрии фазных напряжений на режимы работы асинхронных двигателей в среде имитационного моделирования MATLAB/SIMULINK // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2016. — Т. 16. — № 3. — С. 72—83. DOI: 10.14529/power160309.

14. *Kuznetsov S. M.*, *Orlova I. V.*, *Lisichko O. I.* Theory and a posteriori practical methods for calculating the reliability of electrical equipment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 560, no. 1, article 012135. DOI: 10.1088/1757−899X/560/1/012135.

15. *Haiyang Li, Xiuquan Sun, Fengshou Gu, Ball A. D.* Influence of manufactory asymmetrical squirrel rotor on motor current responses / 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC), 2021. DOI: 10.23919/ICAC50006.2021.9594195.

16. *Gritli Y., Rossi C., Rizzoli G., Zarri L., Tani A., Casadei D.* Detection and localization of incipient high resistance connection for asymmetrical twelve—phase induction motor drives / IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). 2021. DOI: 10.1109/SDEMPED51010.2021.9605521.

17. *Вялкова С. А.*, *Моргоева А. Д.*, *Гаврина О. А.* Разработка гибридной модели прогнозирования потребления электрической энергии для горно-металлургического предприятия // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 486—493. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-486-493.

18. *Martinez J. A.*, *Mork B. A.* Modeling of transformers for low and medium frequency transients — A review // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005, vol. 20, no. 2, pp. 1625—1632. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.833884.

19. *Клюев Р. В.*, *Босиков И. И.*, *Гаврина О. А.*, *Ляшенко В. И.* Оценка эксплуатационной надежности электроснабжения развивающихся участков добычи руд на высокогорном руднике // Горные науки и технологии. — 2021. — Т. 6. — № 3. — С. 211—220. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-3-211-220.

20. *Жуковский Ю. Л.*, *Лаврик А. Ю.*, *Семенюк А. В.*, *Васильков О. С.* Потенциал управления электропотреблением в условиях изолированной энергосистемы удаленного населенного пункта // Устойчивое развитие горных территорий. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 583—591. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-583-591.

21. *Karamov D. N.*, Suslov K. Structural optimization of autonomous photovoltaic systems with storage battery replacements // Energy Reports. 2021, vol. 7, pp. 349—358. DOI: 10.1016/ j.egyr. 2021.01.059.

22. *Соколов А. А.*, *Мирошников А. С.*, *Соколова Е. А.* Алгоритмы управления устойчивостью системы «предприятие горно-металлургического комплекса — внешняя среда» // Горный журнал. — 2016. — № 12. — С. 83—86. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.17.

23. *Sokolov A. A.*, *Fomenko O. A.*, *Ignatev I. V.* Development of algorithms for control and control of electric power parameters based on information-measuring system data // Journal of Physics: Conference Series. 2022, vol. 2176, no. 1, article 012076. DOI: 10.1088/1742-6596/2176/1/012076.

24. *Morgoev I. D.*, *Klyuev R. V.*, *Morgoeva A.* Methodology for detecting non-technical energy losses using an ensemble of machine learning algorithms // Computer Modeling in Engineering & Sciences. 2025, vol. 143, no. 2, pp. 1381—1399. DOI: 10.32604/cmes.2025.064502. ГИАБ

REFERENCES

1. Zinovieva O. M., Smirnova N. A. On the issue of assessing the reliability of technical devices at mining enterprisese. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 1, pp. 157—168. [In Russ]. DOI: 10.250 18/0236_1493_2024_1_0_157.

2. Balovtsev S. V., Merkulova A. M. Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 3, pp. 170—181. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170.

3. Komljenovic D., Groves W. A., Kecojevic V. J. Injuries in U.S. Mining operations — a preliminary risk analysis. *Safety Science*. 2008, vol. 46, no. 5, pp. 792—801. DOI: 10.1016/j.ssci.2007.01.012.

4. Kecojevic V., Komljenovic D., Groves W., Radomsky M. An analysis of equipment-related fatal accidents in U.S. Mining operations: 1995—2005. *Safety Science*. 2007, vol. 45, no. 8, pp. 864—874. DOI: 10.1016/j.ssci.2006.08.024.

5. Sokolov A. A., Orlova L. G., Bashmur K. A., Kuzmich R. I., Kukartsev V. V. Ensuring uninterrupted power supply to mining enterprises by developing virtual models of different operation modes of transformer substations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 11-1, pp. 278—291. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_278.

6. Bertrand Galy, Laurent Giraud Risk mitigation strategies for automated current and future mine hoists. *Safety Science*. 2023, vol. 167, no. 4. DOI: 10.1016/j.ssci.2023.106267.

7. Lavrenov E. O., Temlyakova Z. S., Vilberger M. E., Toporkov D. M., Temlyakov A. A. Electrical asymmetry level influence on quality attributes of an induction motor. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1661, no. 1, article 012118. DOI: 10.1088/1742−6596/1661/1/012118.

8. Shivkumar V. Ayer Modeling and Python simulation of magnetism for power electronics applications. Chapter 4. *Modeling and simulation of transformers*. Electronic books: Engineering, Engineering (R0). Springer Cham. 2022, vol. 214, pp. 107—159. DOI: 10.1007/978-3-030-96768-0_4.

9. Liu J., Yao Q., Hu Ya. Predictive control for load frequency of hybrid power system with wind power and thermal power. *Energy*. 2019, vol. 172, no. 16, pp. 555—565. DOI: 10.1016/j.energy. 2019.01.071.

10. Sigrist L., Rouco L. An induction motor model for system frequency response models. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2017, vol. 27, article e2413. DOI: 10.1002/etep.2413.

11. Reza Khalili Senobari, Seyed Ebrahim Hosseini Kakolaki, Javad Sadeh Comprehensive experimental study on a wound-rotor asynchronous machine fault detection through frequency response

analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2025, vol. 170, article 110852. DOI: 10.1016/j.ijepes.2025.110852.

12. Pronina A. K., Putilin K. P. On the issue of building protection of an induction motor from internal asymmetry and internal short circuits. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2019, no. 17–1, pp. 96 — 101. DOI: [In Russ]. 10.26160/2474-5901-2019-17-96-101.

13. Suvorov I. F., Romanova V. V., Hromov S. V. Investigation of the effect of phase voltage asymmetry on the operation modes of asynchronous motors in the MATLAB/SIMULINK simulation environment. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*. 2016, vol. 16, no. 3, pp. 72 — 83. [In Russ]. DOI: 10.14529/power160309.

14. Kuznetsov S. M., Orlova I. V., Lisichko O. I. Theory and a posteriori practical methods for calculating the reliability of electrical equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 560, no. 1, article 012135. DOI: 10.1088/1757–899X/560/1/012135.

15. Haiyang Li, Xiuquan Sun, Fengshou Gu, Ball A. D. Influence of manufactory asymmetrical squirrel rotor on motor current responses. *26th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, 2021. DOI: 10.23919/ICAC50006.2021.9594195.

16. Gritli Y., Rossi C., Rizzoli G., Zarri L., Tani A., Casadei D. Detection and localization of incipient high resistance connection for asymmetrical twelve — phase induction motor drives. *IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. 2021. DOI: 10.1109/SDEMPED51010.2021.9605521.

17. Vyalkova S. A., Morgoeva A. D., Gavrina O. A. Development of a hybrid model for forecasting electric energy consumption for a mining and metallurgical enterprise. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 486 — 493. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-486-493.

18. Martinez J. A., Mork B. A. Modeling of transformers for low and medium frequency transients — A review. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005, vol. 20, no. 2, pp. 1625 — 1632. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.833884.

19. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Gavrina O. A., Lyashenko V. I. Assessment of operational reliability of power supply to developing ore mining areas at a high-altitude mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021, vol. 6, no. 3, pp. 211 — 220. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-3-211-220.

20. Zhukovsky Yu. L., Lavrik A. Yu., Semenyuk A. V., Vasilkov O. S. Potential for electric consumption management in the conditions of an isolated energy system in a remote population. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020, vol. 12, no. 4, pp. 583 — 591. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-583-591.

21. Karamov D. N., Suslov K. Structural optimization of autonomous photovoltaic systems with storage battery replacements. *Energy Reports*. 2021, vol. 7, pp. 349 — 358. DOI: 10.1016/ j.egyr.2021.01.059.

22. Sokolov A. A., Miroshnikov A. S., Sokolova E. A. Control algorithms for mining and metallurgical plant-ambient environment system stability. *Gornyi Zhurnal*. 2016, no. 12, pp. 83 — 86. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.17.

23. Sokolov A. A., Fomenko O. A., Ignatev I. V. Development of algorithms for control and control of electric power parameters based on information-measuring system data. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, vol. 2176, no. 1, article 012076. DOI: 10.1088/1742-6596/2176/1/012076.

24. Morgoev I. D., Klyuev R. V., Morgoeva A. Methodology for detecting non-technical energy losses using an ensemble of machine learning algorithms. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2025, vol. 143, no. 2, pp. 1381 — 1399. DOI: 10.32604/cmes.2025.064502.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соколов Андрей Андреевич[1] — канд. техн. наук,
и.о. директора, e-mail: anso@sfedu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1127-9612,
Захаров Максим Владимирович[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: mazakharov@sfedu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0176-768X,

Орлова Любовь Герасимовна[1] — старший преподаватель,
e-mail: lgorlova@sfedu.ru, ORCID ID: 0009-0001-3869-5501,
Кукарцев Владислав Викторович — канд. техн. наук,
доцент, НОЦ Технологии искусственного интеллекта,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева,
e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6382-1736,
Ступина Алена Александровна — д-р техн. наук, профессор,
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева Москва, Россия,
Сибирский федеральный университет,
Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС,
e-mail: h677hm@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-5564-9267,
[1] Филиал Южного федерального университета в г. Геленджике.
Для контактов: Соколов А.А., e-mail: anso@sfedu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Sokolov[1], Cand. Sci. (Eng.), Acting Director,
e-mail: anso@sfedu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1127-9612,
M.V. Zakharov[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: mazakharov@sfedu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0176-768X,
L.G. Orlova[1], Senior Lecturer, e-mail: lgorlova@sfedu.ru,
ORCID ID: 0009-0001-3869-5501,
V.V. Kukartsev, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Artificial Intelligence Technology Scientific and Education Center,
Bauman Moscow State Technical University, 105005 Moscow, Russia,
Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev
Agricultural Academy, Moscow, Russia,
e-mail: vlad_saa_2000@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6382-1736,
A.A. Stupina, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Russian State Agrarian University —
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia,
Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia,
Siberian Fire and Rescue Academy of State Fire Service
of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
662972, Zheleznogorsk, Russia, e-mail: h677hm@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-5564-9267,
[1] Branch of Southern Federal University in Gelendzhik, 353461, Gelendzhik, Russia.
Corresponding author: A.A. Sokolov, e-mail: anso@sfedu.ru.

Получена редакцией 25.08.2025; получена после рецензии 08.10.2025; принята к печати 10.01.2026.
Received by the editors 25.08.2025; received after the review 08.10.2025; accepted for printing 10.01.2026.