

УДК: 622.532

DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_53

СОВРЕМЕННЫЕ НАСОСНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ: ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

MODERN PUMPING SYSTEMS FOR MINING ENTERPRISES: ENERGY EFFICIENCY, AUTOMATION AND POWER QUALITY CONTROL

©2025

Гуриева Евгения Владимировна, кандидат технических наук, доцент
кафедры горного дела

Хугаева Гульнара Нодаровна, кандидат технических наук, доцент кафедры
горного дела

Gurieva Evgeniya Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Assistant
Professor of the Mining Department

Khugaeva Gulnara Nodarovna, Candidate of Technical Sciences, Assistant
Professor of the Mining Department

Северо-Кавказский горно-металлургический институт, Владикавказ (Россия)
North Caucasus Mining and Metallurgical Institute, Vladikavkaz (Russia)

E-mail: gurievayevgeniya@mail.ru

E-mail: khugaeva1986@mail.ru

Аннотация: Статья посвящена анализу современных насосных установок для горнодобывающих предприятий. Рассматриваются особенности эксплуатации центробежных насосов в условиях перекачки абразивных гидросмесей и химически агрессивных сред. Особое внимание уделяется вопросам энергоэффективности и автоматизации насосного оборудования. Представлены результаты мониторинга качества электроэнергии, выявившие значительные гармонические искажения в сетях электроснабжения. Проанализированы современные материалы и технологии, повышающие надежность и долговечность насосов. Описаны перспективные направления развития насосных систем, включая использование цифровых двойников и систем предиктивного обслуживания. Выявленные проблемы с гармоническими искажениями требуют внедрения специальных фильтрокомпенсирующих устройств. Дальнейшее развитие должно быть направлено на создание интеллектуальных насосных систем с элементами предиктивного обслуживания и цифровизации, что позволит повысить конкурентоспособность и экологическую безопасность горнодобывающих предприятий.

Ключевые слова: насосное оборудование, несимметрия, качество электроэнергии, автоматизация, гармоники, коэффициент мощности, горное предприятие.

Для цитирования: Современные насосные установки для горнодобывающих предприятий: энергоэффективность, автоматизация и контроль качества электроэнергии / Е.В. Гуриева, Г.Н. Хугаева // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 4 (80). – С. 53–66. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_53.

Abstract: This article analyzes modern pumping systems for mining companies. It examines the operating characteristics of centrifugal pumps handling abrasive hydraulic fluids and chemically aggressive media. Particular attention is paid to energy efficiency and automation of pumping equipment. The article presents the results of power quality monitoring, which revealed significant

harmonic distortions in power grids. Modern materials and technologies that improve pump reliability and durability are analyzed. Promising areas for pumping system development are described, including the use of digital twins and predictive maintenance systems. The identified harmonic distortion issues require the implementation of specialized filter-compensating devices. Further development should be aimed at creating intelligent pumping systems with predictive maintenance and digitalization elements, which will improve the competitiveness and environmental safety of mining companies.

Keywords: pumping equipment, asymmetry, power quality, automation, harmonics, power factor, mining enterprise.

For citation: Modern pumping systems for mining enterprises: energy efficiency, automation and power quality control / E.V. Gurieva, G.N. Khugaeva // *Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region*. – 2025. – Vol. 21, № 4 (80). – P. 53–66. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_53.

ВВЕДЕНИЕ

Насосные установки представляют собой неотъемлемый компонент технологических процессов на самых разных промышленных объектах. Их основная задача – транспортировка жидких сред, начиная от обычной воды и заканчивая сложными химическими составами. В металлообработке это могут быть агрегаты для подачи охлаждающих эмульсий, в системах жизнеобеспечения предприятий – насосы для водоснабжения и отведения сточных вод [1, 2]. Особую нишу занимают специализированные модели, предназначенные для работы с агрессивными средами, такие как насосы для перекачки кислот и щелочей в гальванических цехах, а также для перемещения лакокрасочных материалов и пропиточных составов. В контексте горных предприятий требования к насосным установкам многократно возрастают. Здесь они сталкиваются с экстремальными условиями эксплуатации: перекачкой высокоабразивных гидросмесей (пульп), содержащих частицы породы, работой в условиях химически агрессивных сред и необходимостью обеспечения бесперебойного функционирования на большой глубине [3, 4].

Современный рынок строительных материалов и оборудования предлагает решения, отвечающие вызовам XXI века. Производители насосов делают ставку на использование инновационных материалов, таких как износостойкие полимеры, высокопрочные сплавы и керамические покрытия, которые значительно увеличивают ресурс работы узлов, подверженных трению и коррозии [5,

6]. Все большую популярность получают насосы с частотным регулированием привода, которые позволяют гибко управлять производительностью, экономя значительное количество электроэнергии и снижая гидравлические удары в системе. Кроме того, внедрение систем автоматизированного контроля и телеметрии позволяет в реальном времени отслеживать ключевые параметры работы – давление, расход, температуру и уровень вибрации, что переводит техническое обслуживание от планово-ремонтного к предиктивному по фактическому состоянию оборудования. Таким образом, насосные установки являются критически важным элементом инфраструктуры как традиционных промышленных, так и специализированных горнодобывающих предприятий. Их эволюция напрямую связана с общим технологическим прогрессом. Внедрение «умных» и энергоэффективных насосных систем, изготовленных из передовых материалов, – это не просто тренд, а насущная необходимость для повышения конкурентоспособности, безопасности и экологической устойчивости современных производств [7, 8].

ХАРАКТЕРИСТИКА НАСОСОВ

Как показывает практика, установки на основе центробежных насосов (рис. 1) получили наибольшее распространение на горнодобывающих предприятиях. Это объясняется рядом неоспоримых преимуществ. Центробежные насосы обеспечивают равномерную и непрерывную подачу жидкости, обладают относительно простой конструк-

цией, что облегчает их обслуживание и ремонт в полевых условиях, и эффективно работают с загрязненными и абразивными средами. В горном деле это критически важно, так как основная задача насосов –

транспортировка пульпы (смеси воды и твердых частиц породы), осушение шахт и карьеров, а также подача технической воды для технологических процессов.

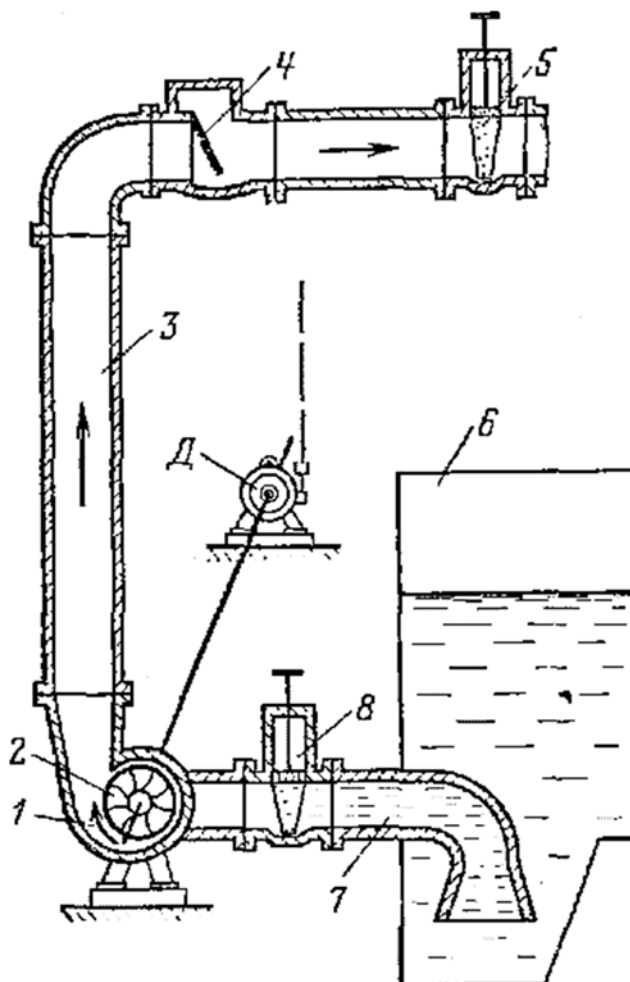


Рис. 1. Общий вид установки с центробежным насосом
Fig. 1. General view of the installation with a centrifugal pump

Конструкция центробежного насоса, являющегося основой насосных установок на горных предприятиях, отличается продуманностью и эффективностью. Её ключевые компоненты включают спиральный корпус (1) и размещенное внутри рабочее колесо (2), оснащенное лопатками. Запуск двигателя приводит рабочее колесо во вращение. Под действием возникающей центробежной силы жидкость, поступающая из заборного резервуара (6) через всасывающий трубопровод (7) и открытую задвижку (8), отбрасывается от центра колеса к периферии корпуса. Этот процесс создает в центральной

зоне колеса область разрежения, что обеспечивает непрерывный подсос новой порции жидкости. Таким образом, при открытой напорной задвижке (5) в системе формируется стабильный и равномерный поток.

Важной особенностью центробежных насосов является их энергопотребление. Мощность, потребляемая двигателем (Р_{дв}), демонстрирует кубическую зависимость от скорости вращения вала (ω), что выражается формулой $P_{дв} = c\omega^3$. Эта характеристика объединяет центробежные насосы с другим динамическим оборудованием, таким как компрессоры и вентиляторы. Данная зави-

симость имеет фундаментальное значение для современных горных предприятий, стремящихся к повышению энергоэффективности. Она наглядно показывает, что даже незначительное снижение частоты вращения насоса, например, за счет использования частотных преобразователей, позволяет добиться существенной экономии электроэнергии, что напрямую снижает себестоимость добычи и переработки полезных ископаемых.

Современные строительные материалы и инженерные решения позволяют значительно повысить надежность центробежных насосов, работающих в экстремальных условиях горного производства. Для изготовления рабочих колес и корпусов все чаще применяются не традиционные чугуны, а высокопрочные износостойкие сплавы, карбид кремния или полиуретановые покрытия. Эти материалы эффективно противостоят абразивному воздействию частиц породы, содержащихся в перекачиваемой пульпе, и коррозии от химически агрессивных шахтных вод. Кроме того, внедрение систем мониторинга вибрации и температуры подшипниковых узлов в режиме реального времени позволяет перейти от планового обслуживания к предиктивному, предотвращая внезапные остановки и сокращая простой дорогостоящего оборудования.

Таким образом, классический принцип действия центробежного насоса, основанный на простой, но эффективной гидродинамике, остается неизменно актуальным. Однако его реализация в оборудовании для горной отрасли XXI века все в большей степени опирается на передовые материалы, системы «умного» управления и энергосберегающие технологии. Это превращает насосную установку из простого механизма перекачки в интеллектуальный узел, отказоустойчивость и экономичность которого напрямую влияют на рентабельность всего предприятия.

В то время как центробежные насосы доминируют в задачах перекачивания больших объемов, поршневые (объемные) насосы находят свою нишу в тех областях горного производства, где требуется создать высокое давление или обеспечить точную дозировку. Например, они незаменимы в

системах гидравлики тяжелой горной техники, для подачи реагентов в процессе обогащения полезных ископаемых, а также для перекачки высоковязких жидкостей, таких как загущенные суспензии или некоторые виды химикатов. Их способность развивать значительное давление независимо от скорости потока делает их идеальными для сложных технологических задач.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ

1. Инструментальные измерения электрических параметров.
2. Анализ гармонического состава токов и напряжений.
3. Мониторинг качества электроэнергии.
4. Сравнительный анализ различных типов насосного оборудования.
5. Исследование характеристик современных материалов для насосостроения.
6. Анализ систем автоматизации и управления.

СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

На современных горных предприятиях базовым элементом автоматизации является схема управления насосным агрегатом, обеспечивающая два режима работы: ручной и автоматический. Как показано на рис. 2, а, выбор между ними осуществляется с помощью ключа управления (КУ). При переводе рукоятки КУ в положение «Р» (ручное) управление двигателем (Д) насоса происходит по классической схеме: оператор использует кнопки «Пуск» (КнП) и «Стоп» (КнС), которые через магнитный пускатель (ПМ) подают питание на двигатель. В этом режиме вся ответственность за контроль уровня жидкости в резервуаре и своевременное включение или отключение оборудования лежит на персонале. Важным элементом такой системы является аккумуляторный бак (1), который обеспечивает первоначальную заливку насоса, предотвращая работу «на сухую» и последующие поломки.

Когда ключ управления переведен в положение «А» (автоматический), система кардинально меняет свой принцип работы.

В базовой конфигурации эту функцию выполняют поплавковые выключатели или датчики уровня, установленные в резервуаре. Они самостоятельно отслеживают заданный порог и подают сигнал на пускатель, запуская или останавливая насос без участия оператора. Для горной промышленности, где часто требуется откачка загрязненных шахтных вод или пульпы, такие решения являются первым шагом к повышению безопасности и бесперебойности технологического процесса. Они исключают человеческий фактор и обеспечивают непрерывность операций, таких как осушение карьеров или работа хвостохранилищ.

Современные технологии XXI века трансформируют простейшие схемы автоматизации в элементы комплексных систем автоматизированного управления технологическими процессами (АСУ ТП). Вместо простых датчиков уровня используются многоуровневые системы сбора данных, которые передают информацию на диспетчерский пульт в реальном времени. Современное оборудование позволяет не только включать и выключать насос, но и контро-

лировать его жизненно важные параметры: давление на выходе, температуру подшипников, уровень вибрации и потребляемую мощность. Это позволяет реализовать предиктивное обслуживание, когда система заранее предупреждает о возможной неисправности, минимизируя простой дорогостоящей техники.

Развитие строительных материалов и оборудования движется в сторону создания полностью автономных насосных станций. Перспективным направлением является использование цифровых двойников – виртуальных моделей насосных агрегатов, которые в реальном времени анализируют данные с датчиков и подбирают оптимальные режимы работы для максимальной энергоэффективности и износостойкости. Внедрение частотно-регулируемых приводов позволяет таким системам не просто дискретно включаться и выключаться, а плавно менять производительность в зависимости от текущей технологической необходимости, что обеспечивает значительную экономию ресурсов и продлевает срок службы оборудования горных предприятий.

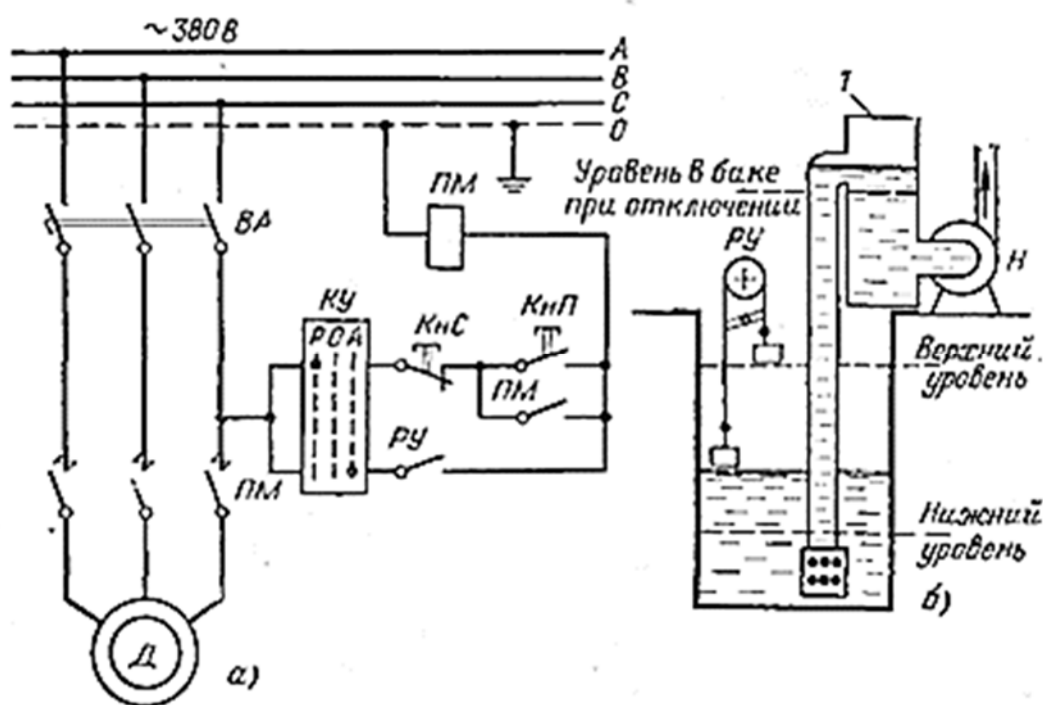


Рис. 2. Автоматизация работы насоса:
 а – схема управления двигателем; б – технологическая схема установки
 Fig. 2. Automation of pump operation:
 a – motor control diagram; b – installation flow chart

МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СИСТЕМ ПОДАЧИ РАСТВОРОВ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Эффективная работа насосных агрегатов, используемых для транспортировки химических реагентов, пульпы и технологических растворов на горно-обогатительных комбинатах, напрямую зависит от стабильности и качества их электроснабжения. Измерение электрических параметров, таких как напряжение, ток, активная и реактивная мощность, – является базовой, но критически важной задачей. Эти данные позволяют не только оценить фактическое энергопотребление оборудования, но и выявить перегрузки, несимметрию фаз и другие отклонения, которые могут привести к преждевременному выходу из строя электродвигателей и, как следствие, к остановке критически важных технологических процессов [9, 10]. Для современных горных предприятий мониторинг качества электроэнергии (КЭ) перестал быть просто технической формальностью и превратился в инструмент экономии ресурсов [11, 12]. Насосные агрегаты с регулируемым электроприводом особенно чувствительны к таким искажениям, как высшие гармоники, провалы и перенапряжения. Низкое качество электроэнергии приводит не только к повышенному нагреву обмоток двигателей и снижению их КПД, но и к сбоям в работе микропроцессорной системы управления, отвечающей за точное дозирование и подачу растворов. Внедрение систем непрерывного мониторинга КЭ позволяет идентифицировать источник помех, минимизировать технологические риски и существенно сократить затраты на электроэнергию за счет оптимизации режимов работы [13, 14].

Проведение регулярного энергоаудита насосных установок с детальным анализом качества электроэнергии является неотъемлемой частью стратегии развития современного горного предприятия. На основе этих данных принимаются решения о внедрении устройств компенсации реактивной мощно-

сти, активных фильтров гармоник и частотных преобразователей. Эти меры не только повышают надежность и долговечность дорогостоящего оборудования для подачи растворов, но и приводят к прямой экономии средств, снижая потери в сетях и исключая штрафы со стороны энергоснабжающих организаций за низкий коэффициент мощности. Таким образом, комплексный мониторинг электрических параметров становится ключевым элементом для построения энергоэффективного и конкурентоспособного производства [15, 16].

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

В рамках исследования энергопотребления на промышленном объекте были проведены инструментальные измерения на группе из пяти насосных агрегатов различного назначения.

Проведенный инструментальный контроль параметров электроснабжения выявил существенные отклонения от нормированных показателей качества электроэнергии в цепях питания насосных установок. Анализ полученных данных позволяет установить, что ключевым источником генерации высших гармоник и несинусоидальности напряжения является эксплуатация мощного технологического оборудования с нелинейным характером нагрузки в электролитном производстве [17, 18].

Такое оборудование, как вентильные преобразователи и индукционные печи, генерирует в сеть высшие гармонические составляющие тока и напряжения, что приводит к повышенному нагреву обмоток электродвигателей, сбоям в работе систем управления и значительному сокращению срока службы электрооборудования. Это создает прямую угрозу надежности критически важных процессов водоподготовки и подачи технологических растворов. Для проведения всестороннего анализа энергоэффективности насосных установок были систематизированы ключевые электротехнические параметры (табл. 1).

Значения мощности, расхода электроэнергии, коэффициента мощности

Table 1

Power values, energy consumption, power factor

Время	S, кВА	P, кВт	Q, кВАр	W, Вач	Wa, Втч	Wp, Варч	cosf
11:34:00	31,45	24,3	19,96	0	0	0	0,77
11:34:05	31,43	24,26	19,98	43,65	33,69	27,75	0,77
11:34:10	31,37	24,21	19,94	87,22	67,32	55,45	0,77
11:34:15	31,42	24,27	19,95	130,86	101,03	83,16	0,77
11:34:20	31,4	24,23	19,96	174,47	134,68	110,88	0,77
11:34:25	31,37	24,21	19,94	218,04	168,31	138,57	0,77
11:34:30	31,31	24,16	19,92	261,53	201,86	166,24	0,77
11:34:35	31,35	24,21	19,93	305,07	235,49	193,92	0,77
11:34:40	31,37	24,23	19,92	348,64	269,14	221,59	0,77
11:34:45	31,33	24,2	19,91	392,15	302,75	249,24	0,77
11:34:50	31,31	24,16	19,91	435,64	336,31	276,89	0,77
11:34:55	31,35	24,21	19,9	479,18	369,93	304,53	0,77

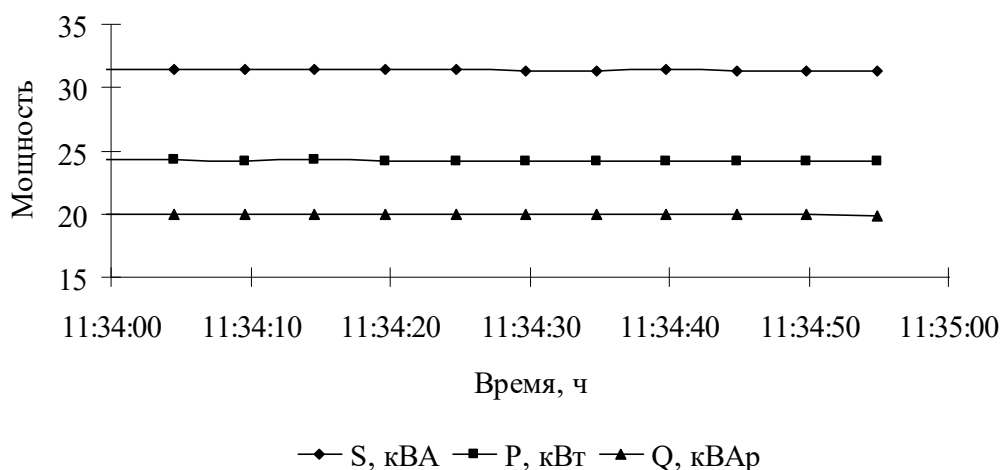


Рис. 3. Характер изменения мощностей во времени
Fig. 3. The nature of changes in power over time

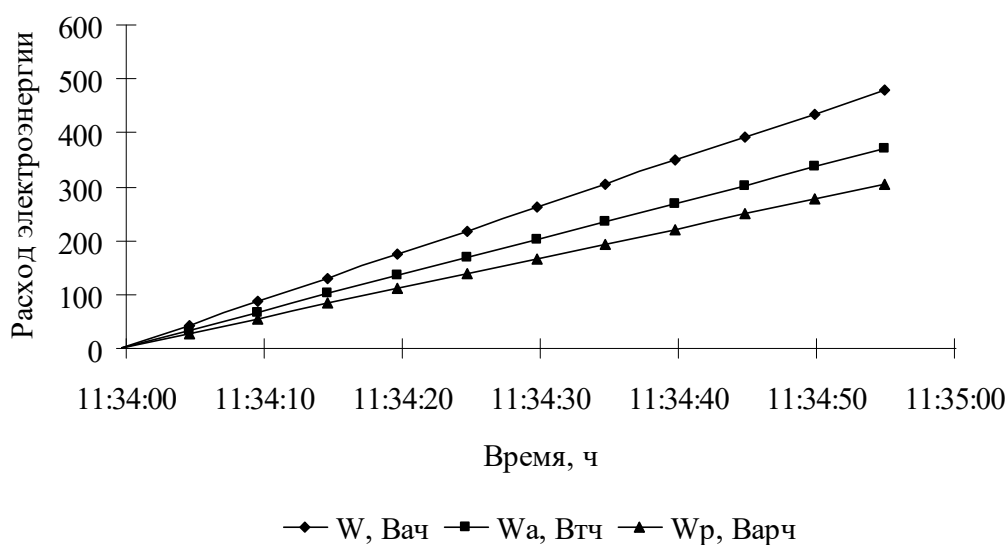


Рис. 4. Изменение расхода электроэнергии во времени
Fig. 4. Changes in energy consumption over time

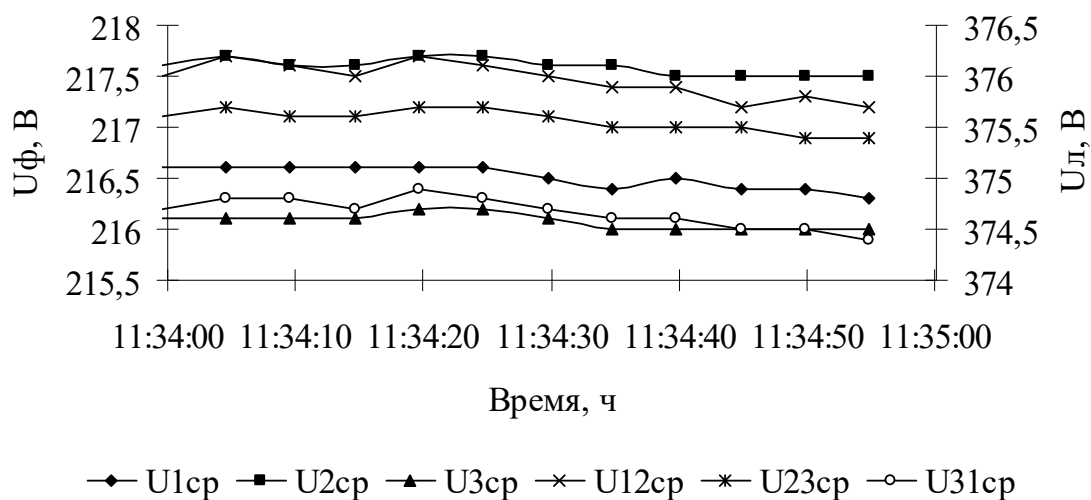


Рис. 5. Изменение фазных и линейных напряжений

Fig. 5. Change in phase and line voltages

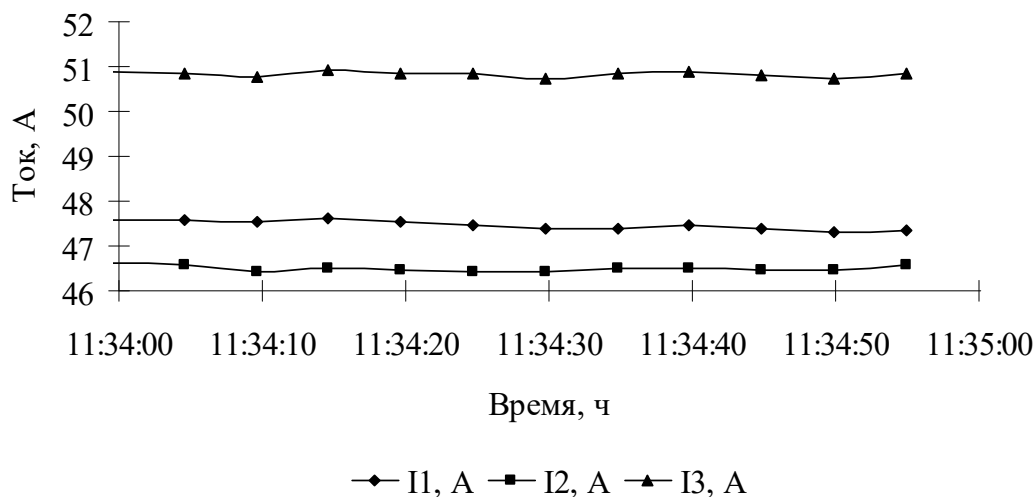


Рис. 6. Изменение фазных токов

Fig. 6. Change of phase currents

В табл. 1 представлены расчетные и измеренные значения мощностей: активной (P), отвечающей за полезную работу, реактивной (Q), создающей электромагнитное поле в оборудовании и носящей индуктивный характер, и полной (S). Помимо мощностных характеристик, в табл. 1 приведены данные о фактическом расходе электроэнергии. Это значения активной (W), реактивной (W_p) и полной (W_a) потребленной энергии за определенный период. Ключевым обобщающим показателем, также отраженным в таблице, является средневзвешенный коэффициент мощно-

сти ($\cos \phi$). Этот интегральный параметр наглядно демонстрирует, какая доля полной мощности преобразуется в полезную работу, а какая тратится на поддержание магнитных полей и является критически важным для оценки потерь в сети и планирования мероприятий по энергосбережению.

Анализ характера изменения мощностей и расхода электроэнергии в течение рассматриваемого периода проводится по графикам, приведенным на рис. 3 и 4.

Графики на рис. 5 демонстрируют динамику средних значений фазных и ли-

нейных напряжений на протяжении анализируемого временного интервала. Параллельно на рис. 6 отображено изменение токовой нагрузки по отдельным фазам.

Проведенный анализ графических данных выявил значительную несимметрию токов в фазах. Средние значения силы тока составили: $I_{1\text{ср}} = 47,5$ А, $I_{2\text{ср}} = 46,5$ А, $I_{3\text{ср}} = 50,8$ А. Данный дисбаланс, при котором ток в третьей фазе существенно

превышает токи в других фазах, является причиной возникновения тока в нулевом проводнике. Результаты измерений показывают, что величина этого тока достигает 4,36 А, что указывает на необходимость проведения мероприятий по балансировке фазной нагрузки для повышения надежности и энергоэффективности системы электроснабжения.

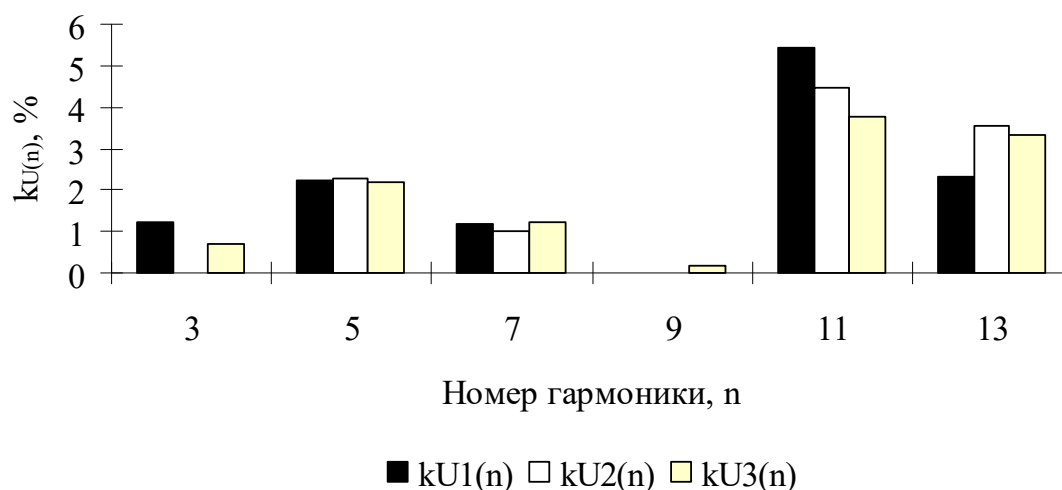


Рис. 7. Гистограмма изменения n-ой гармонической составляющей фазных напряжений
Fig. 7. Histogram of changes in the n-th harmonic component of phase voltages

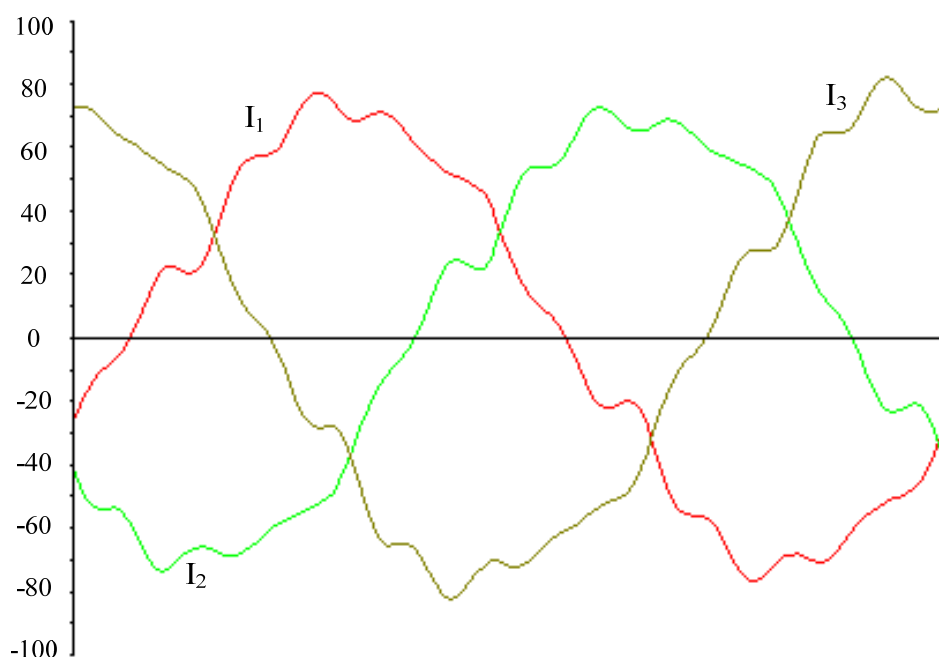


Рис. 8. Осциллограмма изменения фазных токов
Fig. 8. Oscillogram of phase current changes

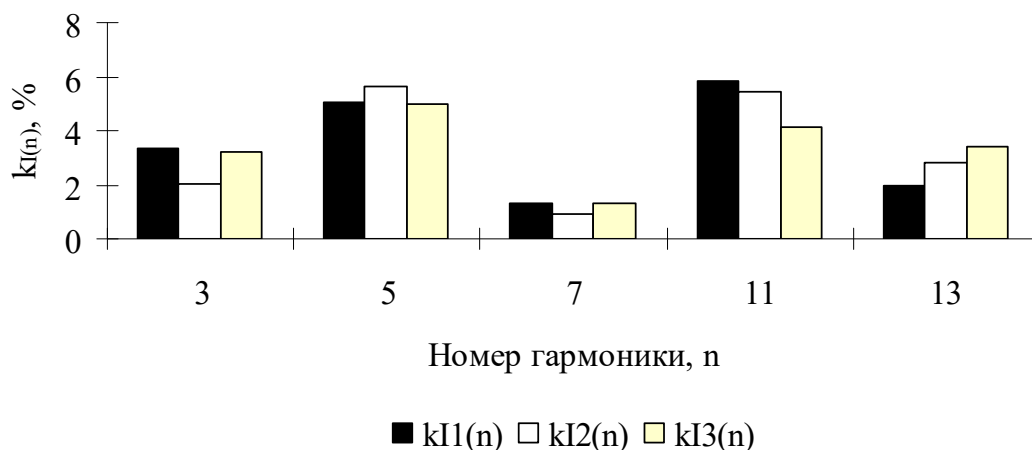


Рис. 9. Гистограмма изменения n-ой гармонической составляющей фазных токов
 Fig. 9. Histogram of changes in the n-th harmonic component of phase currents

Для анализа степени искажения формы напряжения на рис. 7 приведена гистограмма, отображающая значения n-ой гармоники фазных напряжений.

Проведенный анализ гистограммы на рис. 7 позволяет сделать вывод о значительном отклонении формы фазного напряжения от синусоидальной. Данное искажение обусловлено присутствием в спектре сигнала высших гармонических составляющих, а именно 3-й, 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник. Уровень этих искажений варьируется в диапазоне от 0 до 5,41 %, при этом наиболее существенный вклад в деформацию кривой напряжения вносят 11-я и 13-я гармоники.

Отдельно следует отметить наличие в третьей фазе кратковременной 9-й гармонической составляющей, что указывает на специфический характер нелинейной нагрузки, подключенной к этой фазе.

Суммарное воздействие всех гармоник оценивается коэффициентом несинусоидальности напряжения (K_U), который для отдельных фаз составил следующие значения: $K_{U1} = 6,53$ %; $K_{U2} = 6,19$ %; $K_{U3} = 5,66$ %. Превышение этих показателей над установленными нормами свидетельствует о необходимости разработки и внедрения мероприятий по фильтрации высших гармоник, таких как установка пассивных или активных фильтрующих устройств для

обеспечения требуемого качества электроэнергии и надежной работы оборудования.

Осциллограмма изменения фазных токов показана на рис. 8. Величина n-ой гармонической составляющей в фазных токах визуализирована на гистограмме, представленной на рис. 9.

Согласно данным гистограммы на рис. 9, спектральный состав фазных токов характеризуется наличием высших гармонических составляющих. Во всех трех фазах зафиксированы гармоники порядков 3, 5, 7, 11 и 13. Уровень этих искажений варьируется в значительном диапазоне от 0,95 % до 5,82 % от основной гармоники тока.

Наблюдаемая картина типична для работы мощных нелинейных нагрузок, таких как вентиляльные преобразователи и частотные приводы, которые являются источником характерных нечетных гармоник. Превышение уровней гармонических искажений тока установленных норм приводит к дополнительным потерям в проводниках, перегреву трансформаторов и электродвигателей, а также может вызывать ложные срабатывания устройств защиты. Полученные данные подчеркивают необходимость проведения детального анализа источников гармоник и расчета эффективности применения фильтрокомпенсирующих устройств для снижения негативного

воздействия на систему электроснабжения предприятия [19, 20].

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования демонстрируют, что современные насосные установки для горнодобывающих предприятий требуют комплексного подхода к проектированию и эксплуатации. Использование новых строительных материалов и оборудования позволяет значительно повысить надежность и энергоэффективность насосных систем. Технологии XXI века, такие как частотное регулирование, системы автоматизированного управления и мониторинга качества электроэнергии, являются необходимыми элементами современных насосных установок. Выявленные проблемы с гармоническими искажениями требуют внедрения специальных фильтрокомпенсирующих устройств. Дальнейшее развитие должно быть направлено на создание интеллектуальных насосных систем с элементами предиктивного обслуживания и цифровизации, что позволит повысить конкурентоспособность и экологическую безопасность горнодобывающих предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев С.В., Помогаева В.В. Анализ причин отказа работы насосного оборудования при открытом водоотливе. DOI 10.36622/2541-9110.2025.33.2.007 // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2025. № 2 (33). С. 65-75.
2. Карьерные водоотливные установки с путевым отбором воды / А.С. Морин, В.И. Мигунов, К.А. Штреслер, В.Т. Чесноков. DOI 10.25018/0236_1493_2024_3_0_130 // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. № 3. С. 130-140.
3. Ключев Р.В. Анализ энергоэффективности и оптимальных режимов работы оборудования горно-обогатительного комбината. DOI 10.25018/0236_1493_2025_7_0_157 // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 7. С. 157-169.
4. Экологические аспекты хранения хвостов обогащения руд в горном регионе / В.И. Голик, Ю.В. Дмитрак, В.И. Комащенко, Ю.И. Разоренов. DOI 10.18412/1816-0395-2018-6-35-39 // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22, № 6. С. 35-39.
5. Моргоева А.Д., Ключев Р.В., Ляшенко В.И. Прогнозирование нагрузки на электросеть как способ эффективного управления потреблением электрической энергии. DOI 10.53015/18159958_2021_4_39 // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2021. № 4 (66). С. 39-51.
6. Петров В.Л., Кузнецов Н.М., Морозов И.Н. Моделирование электропотребления обогатительной фабрики. DOI 10.17580/gzh.2022.02.11 // Горный журнал. 2022. № 2. С. 72-76.
7. Жуковский Ю.Л., Сусликов П.К. Оценка потенциального эффекта применения технологии управления спросом на горных предприятиях. DOI 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908 // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16, № 3. С. 895-908.
8. Капанский А.А. Методы решения задач оценки и прогнозирования энергетической эффективности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11, № 2 (42). С. 103-115.
9. К проблеме минимизации объемов мобильной пыли при разработке карьеров / В.И. Голик, З.А. Гашимова, М.Ю. Лискова, Ч.Б. Конгар-Сюрюн. DOI 10.24000/0409-2961-2021-11-28-33 // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 11. С. 28-33.
10. Ключев Р.В. Обоснование решений по повышению энергоэффективности вентиляторных установок и подъемных машин в условиях реконструкции

- рудника «Молибден». DOI 10.17073/2500-0632-2024-10-362 // Горные науки и технологии. 2025. № 10 (1). С. 84-94.
11. Durgayandi R., Narayanan M. Effect of harmonics on reduction of unbalance in three-phase four wire composite network. DOI 10.11591/ijeeecs.v30.i1.pp24-32 // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2023. Vol. 30, № 1. P. 24-32.
12. Experimental analysis of the high-order harmonic components generation in few-layer graphene / A.I. Hadarig, C. Vazquez, M. Fernandez [et al.]. DOI 10.1007/s00339-014-8739-y // Applied Physics A. Materials Science & Processing. 2015. Vol. 118. P. 83-89.
13. Kovernikova L.I., Luong V.Ch., Ngo V.C. Specific features of harmonic conditions at the node connecting a pulp-and-paper mill to a supply network // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2020. T. 13, № 1. P. 38-51.
14. Diabatic mechanisms of higher-order harmonic generation in solid-state materials under high-intensity electric fields / T. Tamaya, A. Ishikawa, T. Ogawa, K. Tanaka. DOI 10.1103/PhysRevLett.116.016601 // Phys. Rev. Lett. 2016. Vol. 116. 01660.
15. Ключев, Р.В. Моделирование и оптимизация удельного электропотребления основных технологических процессов горнодобывающего предприятия. DOI 10.25018/0236_1493_2025_4_0_170 // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 4. С. 170-181.
16. 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. DOI 10.1088/1742-6596/2176/1/012076 // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2176, № 1. P. 012076.
17. Oprea S.V., Bara A., Ifrim G. Flattening the electricity consumption peak and reducing the electricity payment for residential consumers in the context of smart grid by means of shifting optimization algorithm. DOI 10.1016/j.cie.2018.05.053 // Computers & Industrial Engineering. 2018. Vol. 122. P. 125-139.
18. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks / B.V. Malozyomov, N.V. Martyushev, S.N. Sorokova [et al.]. DOI 10.3390/math12030480 // Mathematics. 2024. Vol. 12, № 3. P. 480.
19. Hamed M.M., Ali H., Abdelal Q. Forecasting annual electric power consumption using a random parameters model with heterogeneity in means and variances. DOI 10.1016/j.energy.2022.124510 // Energy. 2022. Vol. 255. article 124510.
20. Short- and medium-term power demand forecasting with multiple factors based on multi-model fusion / Q. Ji, S. Zhang, Q. Duan [et al.]. DOI 10.3390/math10122148 // Mathematics. 2022. Vol. 10. article 2148.

REFERENCES

1. Grigoriev S.V., Pomogaeva V.V. Analysis of the causes of pumping equipment failure in open drainage. DOI 10.36622/2541-9110.2025.33.2.007 // Housing and utilities infrastructure. 2025. № 2 (33). P. 65-75.
2. Drainage facilities with underway water intake in open pit mines / A.S. Morin, V.I. Migunov, K.A. Shtresler, V.T. Chesnokov. DOI 10.25018/0236_1493_2024_3_0_130 // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2024. № 3. P. 130-140.
3. Klyuev R.V. Energy efficiency and optimum performance of mining and processing plants and equipment. DOI 10.25018/0236_1493_2025_7_0_157 // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2025. № 7. P. 157-169.
4. Environmental aspects of storing tails of

- ore dressing in a mountain region / V.I. Golik, Yu.V. Dmytrak, V.I. Komashchenko, Yu.I. Razorenov. DOI 10.18412/1816-0395-2018-6-35-39 // Ecological problems of mining industry. 2018. Vol. 22, № 6. P. 35-39.
5. Forecasting the load on the power grid as a way to effectively manage the consumption of electrical energy / A.D. Morgoeva, I.D. Morgoev, R.V. Klyuev, V.I. Lyashenko. DOI 10.53015/18159958_2021_4_39 // News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region. 2021. № 4 (66). P. 39-51.
 6. Petrov V.L., Kuznetsov N.M., Morozov I.N. Modeling power use at processing plant. DOI 10.17580/gzh.2022.02.11 // Gornyi Zhurnal. 2022. № 2. P. 72-76.
 7. Zhukovskiy Yu.L., Suslikov P.K. Assessment of the potential effect of applying demand management technology at mining enterprises. DOI 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908 // Sustainable Development of Mountain Territories. 2024. Vol. 16, № 3. P. 895-908.
 8. Kapansky A.A. Methods for solving the problems of evaluation and forecasting energy efficiency // Kazan state power engineering university bulletin. 2019. Vol. 11, № 2 (42). P. 103-115.
 9. To the problem of minimizing the volume of mobile dust in the development of pits / V.I. Golik, Z.A. Gashimova, M.Yu. Liskova, Ch.B. Kongar-Syuryun. DOI 10.24000/0409-2961-2021-11-28-33 // Occupational Safety in Industry. 2021. № 11. P. 28-33.
 10. Klyuev R.V. Assessment of energy efficiency improvement strategies for ventilation and hoisting systems during the reconstruction of the Molibden mine. DOI 10.17073/2500-0632-2024-10-362 // Mining Science and Technology (Russia) 2025. № 10 (1). P. 8494.
 11. Durgayandi R., Narayanan M. Effect of harmonics on reduction of unbalance in three-phase four wire composite network. DOI 10.11591/ijeecs.v30.i1.pp24-32 // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2023. Vol. 30, № 1. P. 24-32.
 12. Experimental analysis of the high-order harmonic components generation in few-layer graphene / A.I. Hadarig, C. Vazquez, M. Fernandez [et al.]. DOI 10.1007/s00339-014-8739-y // Applied Physics A. Materials Science & Processing. 2015. Vol. 118. P. 83-89.
 13. Kovernikova L.I., Luong V.Ch., Ngo V.C. Specific features of harmonic conditions at the node connecting a pulp-and-paper mill to a supply network // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2020. T. 13, № 1. P. 38-51.
 14. Diabatic mechanisms of higher-order harmonic generation in solid-state materials under high-intensity electric fields / T. Tamaya, A. Ishikawa, T. Ogawa, K. Tanaka. DOI 10.1103/PhysRevLett. 116.016601 // Phys. Rev. Lett. 2016. Vol. 116. 016601.
 15. Klyuev R.V. Modeling and optimization of energy intensity of basic flow processes at mines. DOI 10.25018/0236_1493_2025_4_0_170 // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2025. № 4. P. 170-181.
 16. 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. DOI 10.1088/1742-6596/2176/1/012076 // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2176, № 1. P. 012076.
 17. Oprea S.V., Bara A., Ifrim G. Flattening the electricity consumption peak and reducing the electricity payment for residential consumers in the context of smart grid by means of shifting optimization algorithm. DOI 10.1016/j.cie.2018.05.053 // Computers & Industrial Engineering. 2018. Vol. 122. P. 125-139.
 18. Analysis of a predictive mathematical

- model of weather changes based on neural networks / B.V. Malozyomov, N.V. Martyushev, S.N. Sorokova [et al.]. DOI 10.3390/math12030480 // Mathematics. 2024. Vol. 12, № 3. P. 480.
19. Hamed M.M., Ali H., Abdelal Q. Forecasting annual electric power consumption using a random parameters model with heterogeneity in means and variances. DOI 10.1016/j.energy.2022.124510 // Energy. 2022. Vol. 255. article 124510.
20. Short- and medium-term power demand forecasting with multiple factors based on multi-model fusion / Q. Ji, S. Zhang, Q. Duan [et al.]. DOI 10.3390/math10122148 // Mathematics. 2022. Vol. 10. article 2148.