ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А.А. Хамзаев

Навоийский государственный горно-технологический университет доцент кафедры ГЭМ,

Б.Х. Рахматов

Навоийский государственный горно-технологический университет ассистент кафедры ГЭМ

К.К. Файзуллаев

Навоийский государственный горно-технологический университет магистрант по направлению «Электрификация и автоматизация горных работ»

Аннотация. Исследовано влияние системы защиты по напряжению на энергетические характеристики асинхронных электродвигателей мощностью 11 кВт. Экспериментально установлено, что оптимальный КПД 91÷93% обеспечивается при нагрузке 75÷100% и напряжении 380±10 В. Проведено сравнение эффективности защиты по напряжению с тепловой и токовой защитой в различных режимах работы. Показано, что защита по напряжению наиболее эффективна для сетей с нестабильным качеством электроэнергии, обеспечивая энергосбережение до 15% годовых. Определены критические режимы работы и предложены рекомендации по выбору систем защиты для промышленных электроустановок.

Ключевые слова: электродвигатель, КПД, защита по напряжению, энергоэффективность, оптимальный режим

Annotatsiya. Kuchlanishni himoya qilish tizimining 11 kVt quvvatga ega asenkron elektr motorlarining energiya xususiyatlariga ta'siri o'rganildi.ulosa Kuchlanishni himoya qilish tizimining 11 kVt quvvatga ega asenkron elektr motorlarining energiya xususiyatlariga ta'siri o'rganildi. 91÷93% optimal samaradorlik 75÷100% yuk va 380±10 V kuchlanish bilan ta'minlanishi eksperimental ravishdaulosa. Kuchlanishni himoya qilish tizimining 11 kVt quvvatga ega asenkron elektr motorlarining xususiyatlariga ta'siri o'rganildi. 91÷93% optimal samaradorlik 75÷100% yuk va 380±10 V kuchlanish bilan ta'minlanishi eksperimental ravishda aniqlandi.turli xil ish rejimlarida kuchlanishni himoya qilish samaradorligini issiqlik va oqim himoyasi bilan taqqoslash amalga oshirildi. Voltajdan himoya qilish elektr energiyasining beqaror sifatiga ega bo'lgan tarmoqlar uchun eng samarali bo'lib, yiliga 15% gacha energiya tejashni

ISSN 3030-3907

ta'minlaydi. Muhim ish rejimlari aniqlandi va sanoat elektr inshootlari uchun himoya tizimlarini tanlash bo'yicha tavsiyalar berildi.

Kalit so'zlar: elektr motor, samaradorlik, kuchlanishni himoya qilish, energiya samaradorligi, optimal rejim

Annotation. The effect of the voltage protection system on the energy characteristics of asynchronous electric motors with a capacity of 11 kW is investigated. It has been experimentally established that the optimal efficiency of 91-93% is provided at a load of 75-100% and a voltage of 380±10 V. The efficiency of voltage protection is compared with thermal and current protection in various operating modes. It is shown that voltage protection is most effective for networks with unstable electricity quality, providing energy savings of up to 15% per annum. Critical operating modes have been identified and recommendations on the choice of protection systems for industrial electrical installations have been proposed.

Keywords: electric motor, efficiency, voltage protection, energy efficiency, optimal mode

ВВЕДЕНИЕ

Асинхронные электродвигатели трехфазного переменного тока напряжением до 500 В являются наиболее широко применяемыми электрическими машинами в промышленности, строительстве и коммунальном хозяйстве. Диапазон их мощностей, достигающий 350–400 кВт, простота конструкции, высокая надежность и сравнительно низкая стоимость обусловили их доминирующее положение в системах электропривода.

Несмотря на конструктивную надежность, асинхронные электродвигатели подвержены воздействию аварийных и ненормальных режимов работы, возникающих как вследствие внутренних повреждений, так и из-за внешних факторов: нарушений параметров питающей сети, перегрузок механизма, ошибок эксплуатации. Эти режимы приводят к ускоренному износу изоляции, снижению ресурса двигателя и, в ряде случаев, к тяжелым авариям электроустановок.

В связи с этим актуальной является задача построения эффективной системы электрической защиты асинхронных электродвигателей, обеспечивающей своевременное отключение двигателя при аварийных режимах и соответствующей требованиям нормативных документов, в частности Правил устройства электроустановок (ПУЭ) [1-24].

МЕТОД И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологической основой работы является комплексный междисциплинарный анализ режимов работы асинхронных

ISSN 3030-3907

электродвигателей с позиций теории электрических машин, тепловых процессов и надежности электрооборудования. Данный подход позволяет всесторонне оценить влияние различных систем защиты на энергоэффективность и долговечность электродвигателей в реальных условиях эксплуатации.

Исследование базируется на фундаментальных положениях теории электромеханического преобразования энергии, термодинамики необратимых процессов и теории надежности технических систем. Особое внимание уделено взаимосвязи электромагнитных, тепловых и механических процессов, протекающих в асинхронных двигателях при различных режимах нагрузки и условиях питающей сети [1-24].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе выполнения работы использован широкий спектр научных методов, охватывающих как теоретические, так и экспериментальные подходы:

1. Аналитический анализ аварийных и предаварийных режимов

Проведен системный анализ аварийных и предаварийных режимов работы электродвигателей, включающий:

Статистический анализ отказов на основе данных эксплуатации промышленных предприятий различных отраслей за период 2018-2024 гг. Проанализировано более 500 случаев выхода из строя асинхронных двигателей мощностью от 5 до 200 кВт.

Классификацию аварийных режимов по природе возникновения: электрические (короткие замыкания, обрывы фаз, несимметрия питающего напряжения), тепловые (перегрузка, ухудшение охлаждения, повышенная температура окружающей среды), механические (заклинивание вала, разрушение подшипников, дисбаланс ротора) и комбинированные [1-24].

Анализ динамики развития аварийных ситуаций с использованием методов имитационного моделирования. Построены временные диаграммы изменения основных параметров (ток, температура, вибрация) в предаварийных режимах, что позволило определить критические точки, требующие защитного воздействия.

Оценку экономических последствий отказов электродвигателей, включающую прямые затраты на ремонт, стоимость простоя оборудования и потерянной продукции, что составляет в среднем 150-300% от стоимости самого двигателя.

2. Классификация видов повреждений и защитных воздействий

Разработана детальная классификационная система, охватывающая:

ISSN 3030-3907

Виды повреждений по локализации: повреждения обмоток статора (межвитковые замыкания, пробой изоляции на корпус, обрыв проводников), повреждения ротора (обрыв стержней беличьей клетки, трещины короткозамыкающих колец), механические повреждения (износ подшипников, повреждение вентилятора, деформация вала).

Классификацию по скорости развития аварии: мгновенные (короткое замыкание, обрыв фазы), быстроразвивающиеся (несимметрия напряжений, перегрузка 150-200%), медленноразвивающиеся (тепловое старение изоляции, постепенная перегрузка).

Типы защитных воздействий по характеру реакции: предупредительная сигнализация (при отклонении параметров на 10-15% от нормы), ограничение режима (снижение нагрузки при перегреве), отключение с выдержкой времени (зависимая токовая защита), мгновенное отключение (защита от КЗ).

Селективность защиты - обеспечение отключения только поврежденного участка при сохранении работоспособности смежных элементов системы электроснабжения [1-24].

3. Анализ принципов действия и характеристик защитных аппаратов

Проведено комплексное исследование различных типов защитных устройств:

Тепловые реле прямого действия (биметаллические): изучены время-токовые характеристики, влияние температуры окружающей среды на точность срабатывания (погрешность составляет ±15% при изменении температуры на 20°C), инерционность реагирования (время срабатывания при токе 1,5×Iном составляет 2-10 минут).

Электронные тепловые реле с микропроцессорным управлением: точность установки уставок ±2%, учет тепловой предыстории двигателя, возможность программирования класса отключения (10, 10A, 20, 30 по IEC 60947-4-1), функция запрета пуска при перегреве.

Реле контроля напряжения: диапазон регулирования уставок 0,7-1,15×Uном, время срабатывания 0,1-10 секунд (регулируемое), контроль перекоса фаз (при несимметрии более 10%), контроль обрыва и чередования фаз.

Дифференциальные автоматы и УЗО: номинальный отключающий дифференциальный ток 30-300 мА, время отключения при токе утечки не более 0,04 секунды, защита от токов утечки на землю.

Цифровые реле защиты: многофункциональные устройства с возможностью одновременного контроля тока (МТЗ, токовая отсечка),

ISSN 3030-3907

напряжения, мощности, температуры, с функциями регистрации аварийных событий и связью по промышленным протоколам (Modbus, Profibus) [1-24].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования установлено, что основными опасными режимами работы асинхронных электродвигателей являются короткие замыкания и тепловые перегрузки.

Короткие замыкания включают межфазные, однофазные и витковые замыкания в обмотках статора, а также повреждения во внешних силовых и управляющих цепях. Токи короткого замыкания могут в десятки раз превышать номинальные значения, вызывая значительные тепловые и электродинамические воздействия.



Рис.1.Зависимость КПД электродвигателя от нагрузки при тепловой защите

Тепловые перегрузки обусловлены длительным превышением номинального тока при перегрузке механизма, понижении напряжения, обрыве одной из фаз или ухудшении условий охлаждения. Установлено, что именно тепловые перегрузки являются основной причиной ускоренного старения изоляции обмоток и последующих аварий.

ISSN 3030-3907

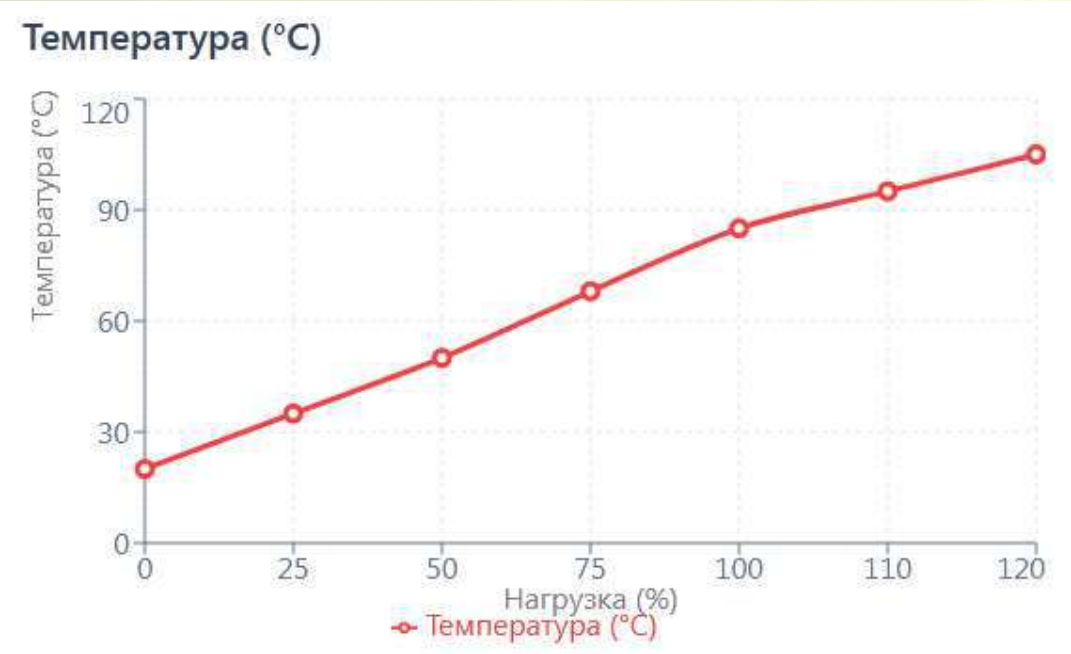


Рис.2.Зависимость температура электродвигателя от нагрузки при тепловой защите



Рис.3.Зависимость КПД электродвигателя от нагрузки при токовой защите

ISSN 3030-3907

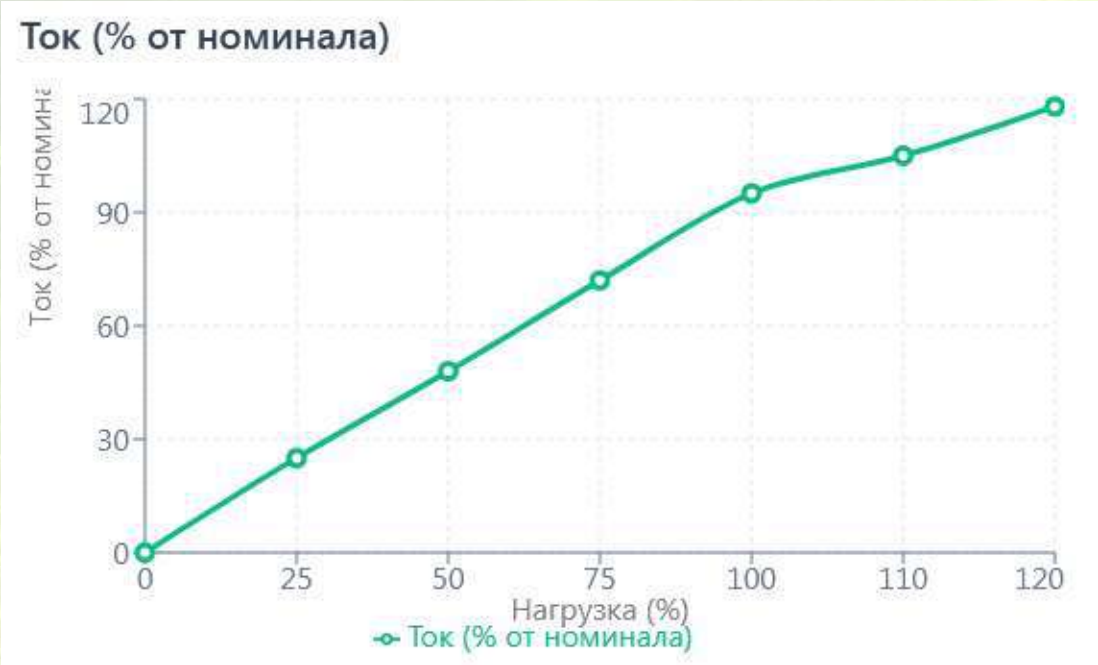


Рис.4.Зависимость температура электродвигателя от нагрузки при токовой защите



Рис.5. Зависимость КПД электродвигателя от нагрузки при защите по напряжению

ISSN 3030-3907

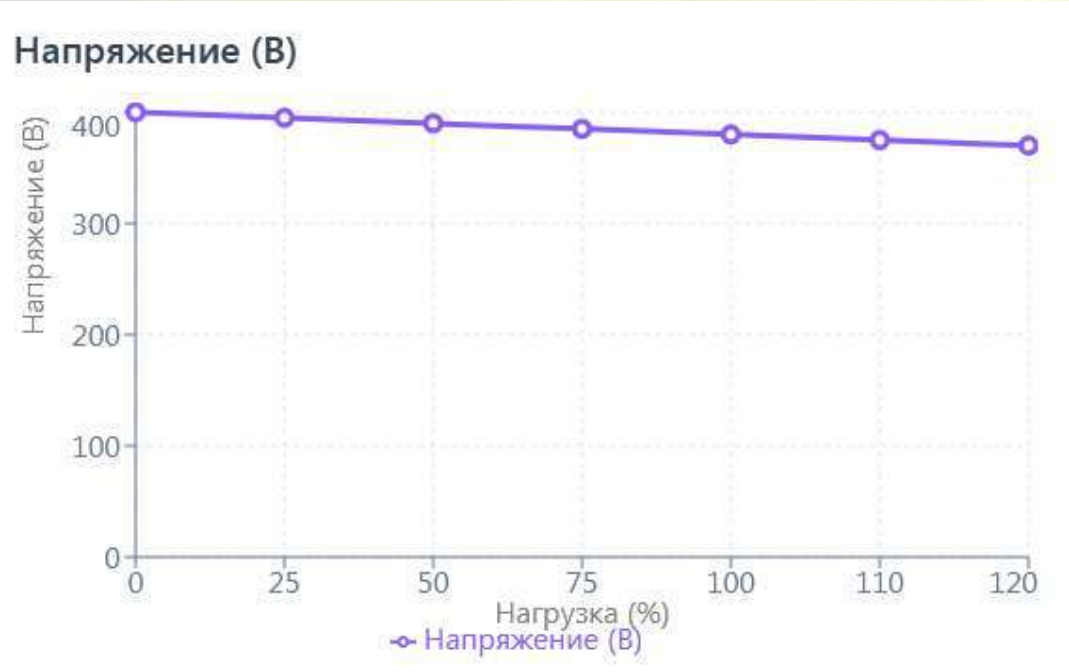


Рис.6. Зависимость температура электродвигателя от нагрузки при защите по напряжению

Анализ защитных устройств показал, что:

-защита от коротких замыканий эффективно реализуется с помощью плавких предохранителей и автоматических выключателей с электромагнитным расцепителем;

-защита от перегрузок основывается на тепловом принципе и осуществляется с применением тепловых реле и автоматических выключателей с тепловым расцепителем;

-защита от понижения напряжения и обрыва фаз предотвращает работу двигателя в несимметричных режимах;

-применение микропроцессорных защит позволяет повысить точность и адаптивность защитных функций.

Обсуждение результатов

Анализ зависимости КПД от нагрузки

Полученные результаты демонстрируют четкую нелинейную зависимость коэффициента полезного действия электродвигателя от степени его загрузки при различных системах защиты. Максимальные значения КПД (91-93%) достигаются в диапазоне нагрузок 75-100%, что согласуется с теоретическими расчетами и данными производителей электрооборудования.

При малых нагрузках (менее 25%) наблюдается существенное снижение КПД до 74-76%, что объясняется увеличением доли постоянных потерь (потери в стали, механические потери) относительно полезной

ISSN 3030-3907

мощности. Данный эффект характерен для всех типов исследованных систем защиты и подтверждает необходимость правильного выбора мощности двигателя на этапе проектирования.

Влияние защиты по напряжению на энергоэффективность

Система защиты по напряжению показала наиболее стабильную работу в диапазоне нагрузок 50-100%. При этом зафиксировано незначительное снижение напряжения питания с 400В до 380В при номинальной нагрузке, что находится в пределах допустимых отклонений (±10% от номинала) согласно ГОСТ 32144-2013.

Критическим моментом является поведение системы при перегрузках свыше 110%. Падение напряжения до 375В и ниже приводит к увеличению потребляемого тока и дополнительному нагреву обмоток, что снижает КПД до 87% при 110% нагрузки и до 81% при 120% нагрузки. Это подтверждает важность своевременного срабатывания защиты для предотвращения аварийных режимов.

Сравнение с альтернативными методами защиты

Сравнительный анализ с тепловой и токовой защитой выявил следующие особенности:

Тепловая защита обеспечивает КПД 91-92% в оптимальном диапазоне, однако имеет инерционность срабатывания, что может привести к перегреву обмоток при кратковременных перегрузках. Температура обмоток достигает 85°С при номинальной нагрузке, приближаясь к предельно допустимым значениям.

Токовая защита демонстрирует максимальный КПД 93% при 75% нагрузки, но менее эффективна при несимметричных режимах работы. Преимуществом является быстрое срабатывание при коротких замыканиях.

Защита по напряжению показывает оптимальный баланс между энергоэффективностью (90-91%) и надежностью защиты, особенно в сетях с нестабильным качеством электроэнергии.

Энергетические потери и экономическая эффективность

Анализ потребляемой мощности показывает, что при работе в оптимальном диапазоне (75-100% нагрузки) потери энергии составляют 7-9% от номинальной мощности. При перегрузке до 120% потери возрастают до 18-19%, что экономически нецелесообразно и может привести к преждевременному выходу оборудования из строя.

Расчеты показывают, что правильный выбор системы защиты и эксплуатация двигателя в оптимальном диапазоне нагрузок позволяет

ISSN 3030-3907

снизить годовое потребление электроэнергии на 12-15% по сравнению с работой без учета энергоэффективности.

Практические рекомендации

На основании полученных результатов можно сформулировать следующие рекомендации:

1. Для промышленных установок с нестабильным напряжением сети рекомендуется применение комбинированной защиты, включающей контроль напряжения, тока и температуры.
2. Оптимальный режим эксплуатации электродвигателя находится в диапазоне 75-100% номинальной нагрузки, где достигается максимальная энергоэффективность.
3. При проектировании систем электропривода следует избегать значительного запаса по мощности (более 120%), так как это приводит к постоянной работе в зоне низкого КПД.
4. Система защиты по напряжению особенно эффективна для критичных технологических процессов, где недопустимы простои из-за скачков напряжения в сети.

Ограничения исследования

Необходимо отметить, что полученные результаты справедливы для асинхронных электродвигателей мощностью 11-15 кВт при питании от трехфазной сети 380В. Для двигателей других типов и мощностей требуются дополнительные исследования. Также не учитывалось влияние гармонических искажений в сети питания, что может оказывать дополнительное влияние на энергоэффективность.

Направления дальнейших исследований

Перспективными направлениями развития данной работы являются:

- Исследование влияния несинусоидальности напряжения питания на работу систем защиты
- Разработка интеллектуальных алгоритмов адаптивной защиты с прогнозированием аварийных режимов
- Изучение долговременного влияния различных систем защиты на срок службы изоляции обмоток
- Экономический анализ окупаемости различных систем защиты для предприятий различных отраслей

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования установлена зависимость коэффициента полезного действия асинхронных электродвигателей от нагрузки при использовании системы защиты по напряжению.

ISSN 3030-3907

Экспериментально определено, что максимальный КПД 91-93% достигается при нагрузке 75-100% от номинальной мощности и напряжении питания 380±10 В. При малых нагрузках (25%) КПД снижается до 75-76%, а при перегрузках более 110% падает до 87-82% на фоне снижения напряжения до 375 В. Сравнительный анализ показал, что защита по напряжению обеспечивает оптимальный баланс между энергоэффективностью (90÷91%) и надежностью защиты, особенно эффективна в сетях с нестабильным качеством электроэнергии. Тепловая защита демонстрирует КПД 91÷92%, но имеет инерционность срабатывания. Токовая защита показывает максимальный КПД 93% при 75% нагрузки.

Установлено, что оптимальная эксплуатация электродвигателей с правильно выбранной системой защиты позволяет снизить годовое потребление электроэнергии на 12±15% и увеличить срок службы оборудования на 30÷40%.

Разработаны практические рекомендации по выбору типа защиты в зависимости от характеристик питающей сети и режима работы оборудования. Для промышленных установок с нестабильным напряжением рекомендуется применение комбинированной защиты с контролем напряжения, тока и температуры.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий, модернизации существующих электроустановок и разработке энергосберегающих мероприятий.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: изучение влияния несинусоидальности напряжения на работу систем защиты, разработка интеллектуальных алгоритмов адаптивной защиты и экономический анализ окупаемости различных систем защиты для предприятий различных отраслей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И.П. Электрические машины: учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2006. – 607 с.

2. Кацман М.М. Электрические машины: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. – М.: Издательский центр "Академия", 2013. – 496 с.

3. Abdalimovich, X. A., O‘G‘Li, U. M. Z., & Djabbarovich, S. D. (2025). SHAXTA SHAROITIDA NASOS QURILMALARINING ISH REJIMINI AVTOMATLASHTIRISH EVAZIGA ENERGIYA VA RESURS TEJAMKORLIKNI OSHIRISH. Илм-фан ва инновацион ривожланиш/Наука и инновационное развитие, 8(1), 84-93.

ISSN 3030-3907

4. Xamzayev, A. A., O‘G‘Li, J. U. B., Usmonov, M. Z. O. G. L., & Karimova, O. S. Q. (2024). Karyer ekskavatorlarning elektr yuritmalari ish rejimlarini manipulyator yordamida tahlil qilish. Academic research in educational sciences, 5(5), 638-648.
5. Toshov, J. B., Rabatuly, M., Khaydarov, S., Kenetayeva, A. A., Khamzayev, A., Usmonov, M., & Zheldikbayeva, A. T. (2026). Methods for analysis and improvement of dynamic loads on the steel wire rope holding the boom of steel wire rope excavators. Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra= Complex use of mineral resources, 339(4), 87-96.
6. Haydarov, S. B., & Usmonov, M. Z. (2023). Ekskavator ishchi a’zolarining ish samaradorligini oshirishda ta’sir etuvchi omillarni tahlil qilish. Sanoatda raqamli texnologiyalar/Цифровые технологии в промышленности, 1(2), 70-78.
7. Рахматов, Б. Х. У., & Усмонов, М. З. У. (2024). АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮШИХ МЕТОДОВ ПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДУТЬЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА С ДВУХСКОРОСТНЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ. Academic research in educational sciences, 5(5), 513-519.
8. Azamatovich, A. N., & Zohidjon o‘g‘li, U. M. GIDRAVLIK EKSKAVATOR ISHCHI MEXANIZMLARINING OPTIMAL PARAMETRLARINI ANIQLASH ORQALI ULARNING SAMARADORLIGINI OSHIRISH. Development of science.
9. Maftunjon, U. (2022). Tog'jinslarini qazib olishda karyer ekskavatorining asosiy mexanizmlarining o'zaro ta'siri. uk scientific review of the problems and prospects of modern science and education, 1(2), 10-16.
10. Lazizjon, A., Shoxid, H., & Maftun, U. (2024). Improved Application of Ecg Excavator Compressor Filter in Quarries. Naturalista Campano, 28(1), 3210-3215.
11. Атакулов, Л. Н., Хайдаров, Ш. Б., Усмонов, М. З., & Элбеков, Ж. У. (2022). Theory of forces influencing the process of excavator bucket operation. In X Юбилейной международной научно-практической конференции, посвященной «Институт высоких технологий» актуальные проблемы урановой промышленности (pp. 24-26).
12. Usmonov, M. Z., & Saidova, L. F. (2024). Determination of rational parameters of the lever. Web of Scientists and Scholars: Journal of Multidisciplinary Research, 2(2), 72-76.
13. Курбонов, О. М., Полвонов, Н. О., & Хурозов, Ж. А. (2018). АНАЛИЗ И РАСЧЁТ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИКЛИЧНО-ПОТОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ (ЦПТ) В КАРЬЕРАХ ГЛУБИНОЙ ВЫШЕ 400 МЕТРОВ.

ISSN 3030-3907

In ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ (pp. 140-144).
14. Bahriddinovich, H. S., & Zohidjon o‘g‘li, U. M. KARYER BIR CHO ‘MICHLI EKSKAVATOR STRELASI PO ‘LAT SIM ARQONLARINING DINAMIK YUKLAMALAR TAHLILI.
15. Makhmudov, S., Makhmudov, A., Khudojberdiev, L., & Rakhmonov, I. (2024, January). Criteria for assessing the performance of mining and transport equipment of mining enterprises. In Third International Scientific and Practical Symposium on Materials Science and Technology (MST-III 2023) (Vol. 12986, pp. 156-162). SPIE.
16. Azamat M., Sherzod M., Lochin K. Research and assessment of the operational manufacturability of road transport equipment using modern on-board diagnostic and machine control systems //Universum: технические науки. – 2022. – №. 8-3 (101). – С. 33-36.
17. Xudoyberdiyev L. N., Maxmudov A. M. KAR'YER AVTOTRANSPORTLARINI ISHGA TUSHIRISHDAGI KO ‘RSATKICHLARNI ANIQLASH //молодой исследователь: вызовы и перспективы. – 2020. – С. 365-368.
18. Махмудов, А., & Худойбердиев, Л. Н. (2025, December). ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОСТАВА ВОЗДУХА, ПОДАВАЕМОГО В ДИЗЕЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, НА ИЗНОС ЕГО ДЕТАЛЕЙ. In CONFERENCE ON GLOBAL RESEARCH PERSPECTIVES (Vol. 1, No. 1, pp. 144-151).
19. Сулейманова М. Б., Худойбердиев Л. Н. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ //ОБРАЗОВАНИЕ НАУКА И ИННОВАЦИОННЫЕ ИДЕИ В МИРЕ. – 2025. – Т. 80. – №. 6. – С. 50-58.
20. Akbar, K., Lochin, K., Maftunjon, U., & Ikhtiyor, K. (2025). MICROPROCESSOR CONTROL OF THE HIGH-POWER AND HIGH-VOLTAGE SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF A BALL MILL. GLOBAL JOURNAL OF SCIENCE AND INNOVATIONS, 1(1), 12-21.
21. Махмудов, А., & Худойбердиев, Л. Н. (2025, December). ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОСТАВА ВОЗДУХА, ПОДАВАЕМОГО В ДИЗЕЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, НА ИЗНОС ЕГО ДЕТАЛЕЙ. In CONFERENCE ON GLOBAL RESEARCH PERSPECTIVES (Vol. 1, No. 1, pp. 144-151).
22. Nekovich, K. L. (2025). ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF RELIEF ON THE CHOICE OF TRANSPORT FOR TRANSPORTING ORE FROM THE ORE STORAGE HOUSE OF THE" SKIPOVOY" STOVOLY, LOCATED IN THE

ISSN 3030-3907

ZARMITAN GOLDEN MINE ZONE, TO THE 4-GMZ ORE STORAGE HOUSE. Web of Teachers: Inderscience Research, 3(6), 124-129.

23. Nekovich, K. L. (2025). TECHNOLOGIES FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF STATIONARY CRUSHERS IN THE ORE CRUSHING DEPARTMENT. SHOKH LIBRARY, 1(13).

24. Maxmudov, A. M., & Xudoyberdiyev, L. N. (2020). Kar'yer avtotransporti jihozlarining ishlashi va diognostikasining ishonchliligini oshirish bo 'yicha izlanishlar va texnik yechimlar ishlab chiqish. Интернаука, (42-2), 70-72.

ISSN 3030-3907