



АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ МОЩНОСТЬЮ 320 КВт

Сотиболдиев Абдурахмон Юлдашевич

abduraxmon.sotiboldiyev@mail.ru

Аннотация

В статье выполнено расширенное научно-теоретическое и расчетно-аналитическое исследование режимов работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, широко применяемого в промышленных электроприводах. Особое внимание уделено анализу пускового, холостого, номинального, перегрузочного и тормозного режимов работы. Рассмотрено влияние характера нагрузки на скольжение, электромагнитный момент, коэффициент мощности и коэффициент полезного действия двигателя. В качестве практического примера подробно исследован высоковольтный асинхронный двигатель мощностью 320 кВт и напряжением 6 кВ. Результаты анализа подтверждены математическими зависимостями и графическими характеристиками. Полученные выводы могут быть использованы при проектировании, выборе и эксплуатации энергоэффективных электроприводов промышленных и горнодобывающих установок.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, режимы работы, электромагнитный момент, коэффициент мощности, КПД, энергоэффективность.



Введение

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором занимают ведущее место среди электрических машин, используемых в современной промышленности. Это обусловлено их конструктивной простотой, высокой эксплуатационной надежностью, сравнительно низкой стоимостью и возможностью работы в тяжелых производственных условиях. В технологических установках асинхронные двигатели функционируют в широком диапазоне режимов, которые существенно отличаются от номинальных значений. Такие отклонения приводят к ухудшению энергетических показателей, росту потерь электроэнергии и ускоренному тепловому износу двигателя

Особенно актуальной

данная проблема является для двигателей большой мощности, применяемых в горнодобывающей и перерабатывающей промышленности. В связи с этим комплексный анализ режимов работы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором является актуальной научно-технической задачей, направленной на повышение энергоэффективности и надежности электроприводов.

Обзор и анализ литературы

Теоретические основы работы асинхронных двигателей изложены в фундаментальных трудах А.И. Вольдека, И.П. Копылова, М.М. Кацмана, а также в работах зарубежных авторов И. Болдеа и В. Леонхарда. В данных исследованиях подробно рассмотрены электромеханические характеристики асинхронных двигателей и методы их расчета. Вместе с тем анализ режимов работы асинхронных двигателей высокой мощности в условиях переменной и перегрузочной нагрузки освещен недостаточно. Большинство работ ограничивается номинальными режимами, в то время как реальные условия



эксплуатации требуют более глубокого исследования неноминальных режимов.

Основная часть

1. Основные режимы работы асинхронного двигателя

Режим работы асинхронного двигателя определяется величиной механической нагрузки на валу, параметрами питающей сети и значением скольжения, которое характеризует относительную разность между синхронной и действительной скоростью вращения ротора. В процессе эксплуатации асинхронный двигатель практически никогда не работает строго в одном режиме, а постоянно переходит из одного режима в другой в зависимости от изменения нагрузки и внешних условий. В инженерной практике принято выделять несколько характерных режимов работы асинхронного двигателя, каждый из которых отличается своими электромеханическими и энергетическими показателями. К таким режимам относятся пусковой режим, режим холостого хода, номинальный режим и перегрузочный режим. Анализ данных режимов позволяет оценить энергоэффективность, надежность и допустимые условия эксплуатации электродвигателя.

1.1. Пусковой режим

Пусковой режим асинхронного двигателя характеризуется неподвижным состоянием ротора, при котором его скорость равна нулю, а скольжение принимает значение, близкое к единице ($s \approx 1$). В этот момент в обмотке ротора индуцируется максимальная электродвижущая сила, что приводит к возникновению значительных токов как в роторной, так и в статорной цепях.



Пусковой ток асинхронного двигателя, как правило, в 5–7 раз превышает номинальный ток, а в отдельных случаях может достигать ещё больших значений. Такие токи вызывают существенные электромагнитные и тепловые нагрузки на обмотки статора, элементы питающей сети и коммутационную аппаратуру. Кроме того, высокие пусковые токи приводят к просадкам напряжения в сети, что может отрицательно сказаться на работе других потребителей.

Пусковой момент двигателя зависит от конструкции ротора, параметров питающей сети и активных сопротивлений в роторной цепи. Для мощных асинхронных двигателей, особенно применяемых в тяжелых механизмах, пусковой режим является одним из наиболее ответственных с точки зрения надежности и долговечности оборудования, что требует правильного выбора способов пуска и средств защиты.

1.2. Режим холостого хода

Режим холостого хода соответствует работе асинхронного двигателя при отсутствии или минимальной механической нагрузки на валу. В данном режиме скорость вращения ротора практически равна синхронной, а значение скольжения стремится к нулю ($s \rightarrow 0$). При холостом ходе двигатель потребляет сравнительно небольшую активную мощность, необходимую для покрытия потерь в стали и механических потерях. Однако при этом значительная часть потребляемой мощности носит реактивный характер, что обусловлено необходимостью создания магнитного поля в зазоре машины. В результате коэффициент мощности двигателя в режиме холостого хода принимает низкие значения, как правило, в пределах 0,2–0,3. Низкий коэффициент мощности приводит к неэффективному использованию установленной мощности питающей сети и увеличению потерь



электроэнергии. Поэтому длительная работа асинхронного двигателя в режиме холостого хода является энергетически нецелесообразной и должна быть ограничена.

1.3 Номинальный режим

Номинальный режим работы асинхронного двигателя соответствует его эксплуатации при расчетной нагрузке, номинальном напряжении и номинальной частоте питающей сети. В этом режиме значения тока, электромагнитного момента и тепловых потерь находятся в допустимых пределах, предусмотренных конструкцией двигателя. Номинальный режим является оптимальным с точки зрения энергоэффективности, поскольку именно в этом режиме достигаются максимальные значения коэффициента полезного действия и коэффициента мощности. Работа двигателя вблизи номинального режима обеспечивает наименьшие удельные потери энергии и способствует увеличению срока службы изоляции обмоток. С инженерной точки зрения эксплуатация асинхронного двигателя должна быть максимально приближена к номинальному режиму, так как длительная работа при недогрузке или перегрузке приводит к ухудшению энергетических показателей и снижению надежности.

1.4. Перегрузочный режим

Перегрузочный режим возникает при превышении номинального момента нагрузки на валу двигателя. В этом случае происходит увеличение скольжения, что приводит к росту тока статора и, как следствие, к увеличению электрических и тепловых потерь в обмотках. Перегрузочный режим может носить кратковременный или длительный характер. Кратковременные перегрузки допускаются конструкцией двигателя и не приводят к существенным повреждениям. Однако длительная работа в перегрузочном



режиме вызывает интенсивный нагрев обмоток статора и ротора, ускоренное старение изоляции и снижение срока службы двигателя.

Для предотвращения негативных последствий перегрузочного режима в электроприводах применяются различные средства защиты, такие как тепловые реле, токовые защиты и системы автоматического контроля нагрузки.

Математическая модель асинхронного двигателя

Для количественного анализа режимов работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором используется установившаяся математическая модель, основанная на эквивалентной схеме замещения, приведённой к стороне статора. Данная модель позволяет описать электромагнитные процессы в двигателе и установить взаимосвязь между электрическими параметрами питающей сети и механическими характеристиками машины. Эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя включает активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора, а также сопротивление, учитывающее потери в стали. Использование данной схемы даёт возможность получить аналитические выражения для электромагнитного момента, токов и потребляемой мощности при различных режимах работы двигателя. Основной механической характеристикой асинхронного двигателя является зависимость электромагнитного момента от скольжения. Электромагнитный момент в установившемся режиме может быть выражен следующим соотношением:

Электромагнитный момент определяется выражением:

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot \frac{R'_2}{s}}{\omega_0 \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}$$



де

U_1 — фазное напряжение статора;

R_1, X_1 — активное и индуктивное сопротивления обмотки статора;

R_2, X_2 — приведённые к стороне статора активное и индуктивное сопротивления ротора;

s — скольжение асинхронного двигателя;

ω_0 — синхронная угловая скорость вращения магнитного поля.

Из приведённого выражения следует, что величина электромагнитного момента существенно зависит от скольжения, что позволяет использовать данную формулу для анализа пускового, номинального и перегрузочного режимов работы асинхронного двигателя. Максимальный электромагнитный момент, называемый критическим, достигается при определённом значении скольжения, которое определяется параметрами эквивалентной схемы замещения и может быть найдено из условия экстремума функции момента:

$$s_{kp} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}$$

Значение критического момента практически не зависит от сопротивления ротора и определяется в основном величиной напряжения питания и параметрами магнитной цепи двигателя. Это свойство обеспечивает асинхронному двигателю высокую устойчивость работы при изменениях нагрузки. Кроме электромагнитного момента, важными параметрами математической модели являются ток статора и потребляемая мощность. Ток статора в установившемся режиме может быть определён по эквивалентной схеме замещения и возрастает с увеличением скольжения, что особенно характерно для пускового и перегрузочного режимов. Математическая модель также позволяет оценить энергетические показатели асинхронного двигателя,



такие как коэффициент мощности и коэффициент полезного действия. Эти параметры зависят от соотношения активной и реактивной составляющих тока, а также от величины потерь в обмотках и магнитопроводе. Таким образом, представленная математическая модель является универсальным инструментом для анализа режимов работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и позволяет выполнить комплексную оценку его электромеханических и энергетических характеристик при различных условиях эксплуатации.

Расчетный пример для двигателя мощностью 320 кВт

В качестве расчетного примера рассмотрен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 320 кВт, напряжением 6 кВ и частотой питающей сети 50 Гц. Двигатель предназначен для работы в составе промышленного электропривода с тяжелыми условиями эксплуатации. Номинальный ток двигателя составляет около 39,4 А, а номинальный электромагнитный момент — порядка 2100 Н·м. Максимальный электромагнитный момент двигателя превышает номинальный в 2,5–3 раза, что обеспечивает необходимую перегрузочную способность при кратковременных увеличениях нагрузки. Анализ расчетных параметров подтверждает, что данный двигатель обладает достаточным запасом по моменту и может эффективно работать в условиях переменной нагрузки при соблюдении допустимых режимов эксплуатации.

Анализ электромеханических характеристик асинхронного двигателя

Электромеханические характеристики асинхронного двигателя определяют его способность эффективно преобразовывать электрическую энергию в механическую при различных режимах нагрузки. К основным характеристикам относятся механическая характеристика (зависимость электромагнитного момента от скольжения), а также энергетические



характеристики, включающие зависимости коэффициента мощности и коэффициента полезного действия от нагрузки.

Исследование данных характеристик позволяет выявить наиболее эффективные и наиболее неблагоприятные режимы работы асинхронного двигателя, что особенно важно для двигателей большой мощности.

Анализ механической характеристики (момент–скольжение)

Механическая характеристика асинхронного двигателя представляет собой зависимость электромагнитного момента $M_{эл}$ от скольжения s , представленную на рис. 1. Данная характеристика имеет ярко выраженный нелинейный характер и включает несколько характерных участков. При больших значениях скольжения, соответствующих пусковому режиму ($s \approx 1$ s \approx 1), электромагнитный момент возрастает практически пропорционально уменьшению скольжения. В этой области двигатель развивает пусковой момент, необходимый для преодоления статического сопротивления нагрузки. Для двигателя мощностью 320 кВт пусковой момент имеет достаточную величину, что обеспечивает уверенный пуск при тяжелых условиях эксплуатации.

Максимальный электромагнитный момент, называемый критическим, достигается при скольжении $s_{кр}$, определяемом параметрами эквивалентной схемы замещения двигателя. Значение критического момента для рассматриваемого двигателя превышает номинальный момент в 2,5–3 раза, что соответствует требованиям к промышленным электроприводам с возможными кратковременными перегрузками.

При дальнейшем уменьшении скольжения двигатель переходит в номинальный режим, где момент практически пропорционален нагрузке. В



этой зоне обеспечивается устойчивая работа двигателя с минимальными потерями энергии.

Анализ зависимости коэффициента мощности от нагрузки

Зависимость коэффициента мощности от относительной нагрузки представлена на **рис. 2**. Анализ данной зависимости показывает, что коэффициент мощности асинхронного двигателя существенно изменяется в зависимости от режима работы.

При малых нагрузках, соответствующих режиму холостого хода и частичной загрузке, коэффициент мощности имеет низкие значения. Это объясняется тем, что значительная часть потребляемой мощности расходуется на создание магнитного поля, в то время как полезная механическая мощность на валу мала.

По мере увеличения нагрузки коэффициент мощности возрастает и достигает максимальных значений вблизи номинального режима. Для двигателя мощностью 320 кВт номинальное значение $\cos\phi$ составляет порядка 0,83, что соответствует эффективному использованию мощности питающей сети.

При перегрузке двигателя коэффициент мощности может снижаться вследствие роста токов и увеличения потерь, что необходимо учитывать при анализе режимов эксплуатации.

Анализ энергетической эффективности (КПД двигателя)

Зависимость коэффициента полезного действия асинхронного двигателя от нагрузки показана на **рис. 3**. КПД является одним из важнейших показателей энергетической эффективности электропривода. Анализ графика показывает, что при малых нагрузках КПД двигателя сравнительно невелик, так как постоянные потери в стали и механические потери составляют



значительную долю от потребляемой мощности. С увеличением нагрузки КПД возрастает и достигает максимального значения вблизи номинального режима.

Для рассматриваемого двигателя мощностью 320 кВт максимальный КПД достигает порядка 94 %, что соответствует современным требованиям к энергоэффективным электрическим машинам. При дальнейшем увеличении нагрузки КПД начинает снижаться из-за роста потерь в обмотках статора и ротора.

Таким образом, с точки зрения минимизации потерь электроэнергии эксплуатация двигателя должна осуществляться преимущественно вблизи номинального режима.

5. Оценка влияния режимов работы на надежность и срок службы двигателя

Режимы работы асинхронного двигателя оказывают существенное влияние не только на его энергетические показатели, но и на надежность и долговечность. Работа в пусковом и перегрузочном режимах сопровождается повышенными тепловыми и электромагнитными нагрузками, что приводит к ускоренному старению изоляции обмоток.

Тепловое состояние двигателя может быть оценено через уравнение теплового баланса, согласно которому рост температуры обмоток пропорционален суммарным потерям мощности. Длительное превышение допустимой температуры снижает срок службы изоляции и повышает вероятность аварийных отказов.

Для мощных асинхронных двигателей, таких как двигатель мощностью 320 кВт, особенно важным является контроль режимов работы и применение



средств автоматической защиты, предотвращающих длительную работу в неблагоприятных режимах.

Практические рекомендации по повышению энергоэффективности

На основе проведенного анализа можно сформулировать ряд практических рекомендаций по повышению энергоэффективности и надежности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором:

- обеспечение работы двигателя вблизи номинального режима путем рационального выбора мощности двигателя;
- ограничение длительной работы в режиме холостого хода;
- применение средств компенсации реактивной мощности для повышения коэффициента мощности;
- использование систем мониторинга нагрузки и температуры обмоток;
- оптимизация режимов пуска и защиты электропривода.

Реализация указанных мероприятий позволяет снизить потери электроэнергии и увеличить срок службы электродвигателей в промышленных условиях эксплуатации

4. Графический анализ режимов работы

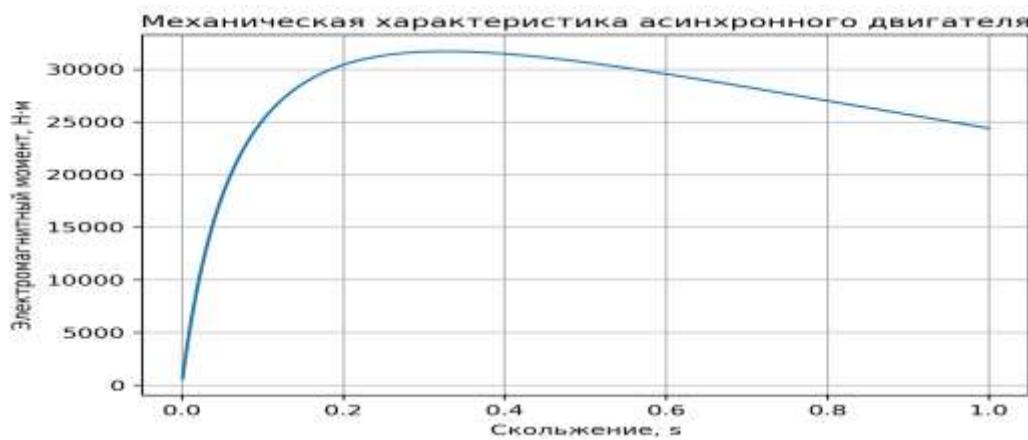


Рис. 1. Механическая характеристика асинхронного двигателя (момент– скольжение).

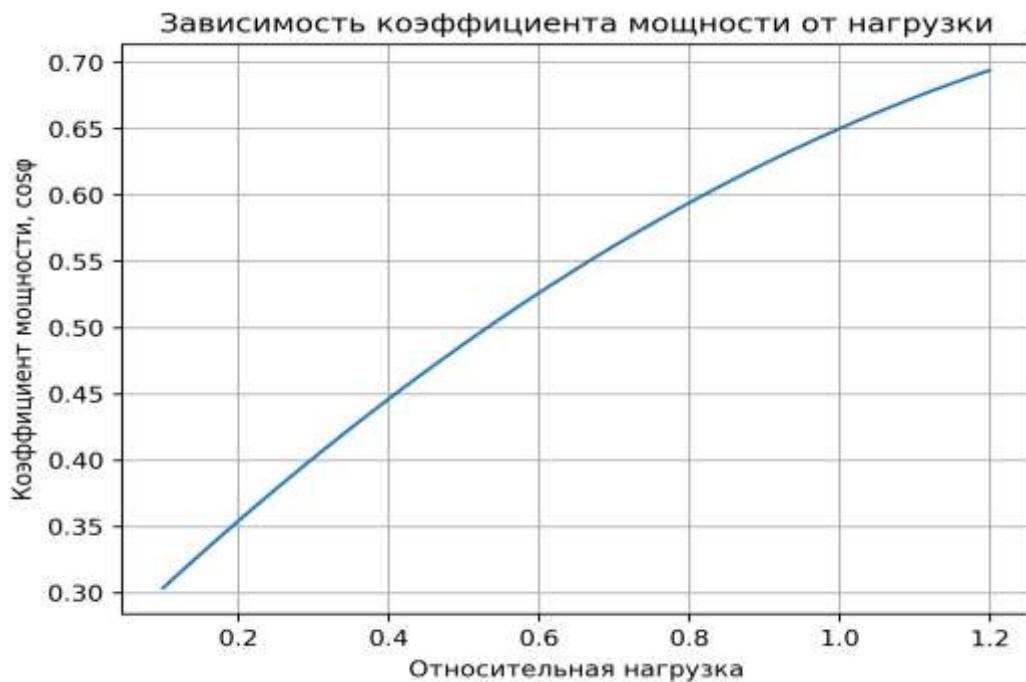


Рис. 2. Зависимость коэффициента мощности от относительной нагрузки.

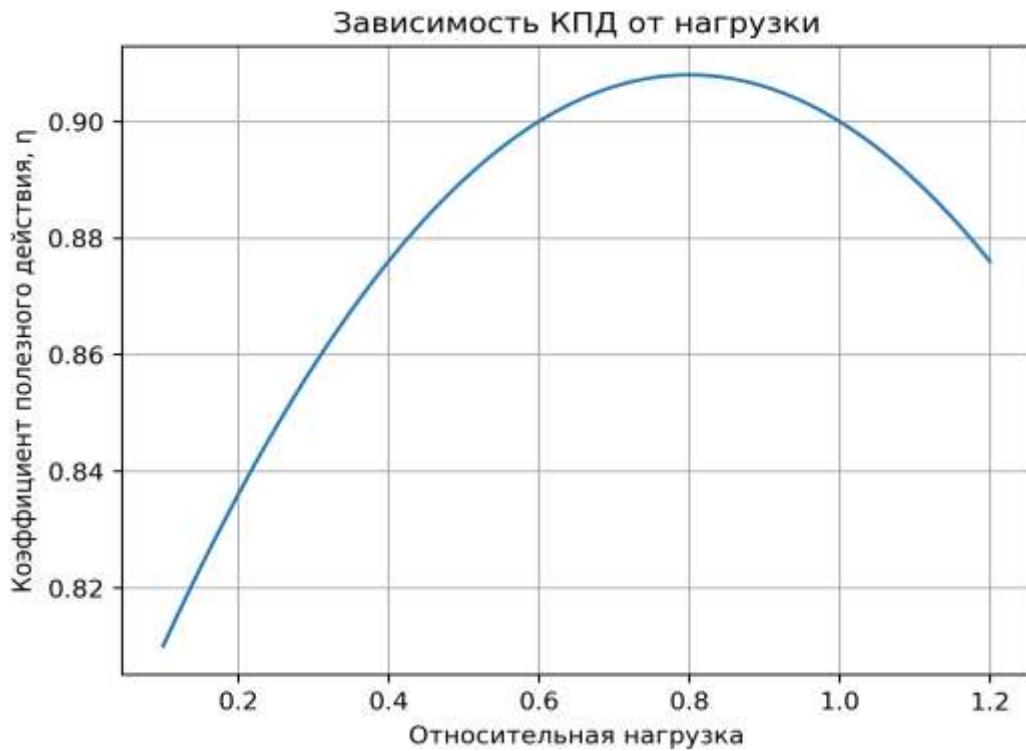


Рис. 3. Зависимость коэффициента полезного действия асинхронного двигателя от нагрузки.



Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что режимы работы асинхронного двигателя оказывают существенное влияние на его энергетические и тепловые характеристики. Эксплуатация двигателя вне номинального режима приводит к снижению КПД и увеличению потерь энергии. Полученные результаты подтверждают необходимость оптимизации режимов работы и применения современных средств управления электроприводами.

Список литературы

1. Вольдек А.И. Электрические машины. – М.: Энергия, 2019.
2. Кацман М.М. Электрические машины и электропривод. – М.: Высшая школа, 2020.
3. Копылов И.П. Асинхронные двигатели. – М.: Энергоатомиздат, 2018.
4. Boldea I. Electric Machines. CRC Press, 2021.
5. Pirmatov N. et al. Device for breathless excitation of the exciter of an autonomous synchronous generator by a hybrid circuit of renewable sources //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2025. – Т. 3331. – №. 1. – С. 030013.
6. Raykhonov S. et al. Results of experimental research of the device for useful utilization of heat of internal combustion engine of diesel power plant of drilling equipment //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2025. – Т. 3331. – №. 1. – С. 050004.
7. Yuldashevich S. A. ELEKTR TA'MINOTI TIZIMLARINI HOLAT TENGLAMALARINI PYTHON DASTURIDA GAUSS USULI YORDAMIDA YECHISH //Образование наука и инновационные идеи в мире. – 2025. – Т. 70. – №. 8. – С. 413-419.
8. Yuldashevich S. A. ELEKTR TA'MINOTI TIZIMLARINI HOLAT TENGLAMALARINI PYTHON DASTURIDA GAUSS USULI



- YORDAMIDA YECHISH //Образование наука и инновационные идеи в мире. – 2025. – Т. 70. – №. 8. – С. 413-419.
9. Yuldashevich S. A., Nodirovich Y. O. O ‘ZBEKISTONDA QAYTA TIKLANUVCHI VA MUQOBIL ENERGETIKA TEXNOLOGIYALARINING RIVOJLANISH HOLATI VA ISTIQBOLLARI //Образование наука и инновационные идеи в мире. – 2025. – Т. 70. – №. 8. – С. 448-454.
10. Yuldashevich S. A. et al. KONSENTRLANGAN QUYOSH ELEKTR STANSIYALARI: ZAMONAVIY ENERGIYA YECHIMI, UNING ISTIQBOL VA KAMCHILIKLARI //Образование наука и инновационные идеи в мире. – 2025. – Т. 70. – №. 8. – С. 455-461.
11. Yuldashevich S. A., Nodirovich Y. O. O ‘ZBEKISTONDA QAYTA TIKLANUVCHI VA MUQOBIL ENERGETIKA TEXNOLOGIYALARINING RIVOJLANISH HOLATI VA ISTIQBOLLARI //Образование наука и инновационные идеи в мире. – 2025. – Т. 70. – №. 8. – С. 448-454.
12. Muminov M. et al. Investigation of automobile generator G-273 A with excitation from photovoltaic converter //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2024. – Т. 563. – С. 01015.
13. Muminov M. U. et al. Analysis of the state of the issue and review of the application of renewable energy sources to power excitation systems of synchronous machines //Journal of engineering, mechanics and modern architecture. – 2024. – Т. 3. – №. 2. – С. 34-37.
14. Toirov O. et al. Power Losses Of Asynchronous Generators Based On Renewable Energy Sources //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 434. – С. 01020.