



Sanoat korxonalarida elektr energiyasini tejashning zamonaviy usullari

Iles I. Baxadirov

PhD, dotsent, Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti, 100084, O'zbekiston; bakhadirov1987@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-8754-7433>

Dolzarbli: O'zbekistonning sanoat tarmoqlari — metallurgiya, neft-gaz kimyosi, qurilish sanoati, mashinasozlik va to'qimachilik — elektr energiyasining eng yirik iste'molchilari hisoblanadi. Ushbu tarmoqlarda ishlab chiqarish hajmlarining ortishi energiya tizimiga tushadigan yukni kuchaytiradi va mahsulot tannarxining oshishiga olib keladi. Davlat dasturlari hamda yangilangan energiya tejashga oid qonunlar energiya sarfini kamaytirish va energiya tejovchi texnologiyalarni joriy etishni talab qilmoqda. Shu nuqtai nazardan, elektr energiyasini tejashning zamonaviy usullarini izlash korxonalar raqobatbardoshligini oshirish va "yashil" iqtisodiyot maqsadlariga erishish uchun strategik ahamiyatga ega vazifa hisoblanadi. Shu sababli, elektr energiyasini tejashning zamonaviy usullarini o'rganish korxonalar, tadqiqotchilar va kelajakdagi mutaxassislar uchun dolzarb bo'lib, barqaror rivojlanish hamda ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytirishga xizmat qiladi.

Maqsad: O'zbekiston Respublikasining sanoat korxonalarida elektr energiyasini tejashning zamonaviy usullarini tahlil qilish hamda energiya tejashning asosiy vositalaridan biri sifatida chastotani tartibga soluvchi elektr privodlarning (ChRP/VSD) samaradorligini batafsil o'rganish.

Usullar: tadqiqot davomida sanoat korxonalarida energiya tejashning zamonaviy texnologiyalarini har tomonlama baholash imkonini beruvchi tizimli, qiyosiy va analitik yondashuvlardan foydalanildi. Shunday qilib, qo'llangan usullar majmui — tarkibiy tahlil, matematik modellashtirish, normativ-huquqiy tahlil va qiyosiy baholash — energiya tejash salohiyatini har tomonlama o'rganishni hamda O'zbekiston Respublikasi sanoat korxonalarini uchun eng samarali texnologik yechimlarni aniqlash imkonini berdi.

Natijalar: tadqiqot shuni ko'rsatdiki, energiya tejashning eng katta potentsiali nasoslar, ventilyatorlar va elektr privodli uskunalarda jamlangan. Chastotani tartibga soluvchi privodlarning (ChRP) joriy etilishi energiya sarfini 30–40 % ga kamaytirishi va o'rtacha ikki yil ichida o'zini oqlashi aniqlangan. Bundan tashqari, ChRP boshlang'ich toklarni kamaytiradi, texnologik jarayonlarni boshqarish sifatini oshiradi va ekspluatatsiya xarajatlarini qisqartiradi. ChRP, reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish, energiya samarador dvigatellar hamda raqamli monitoring tizimlarining kompleks qo'llanilishi korxonaning umumiy energiya iste'molini 25–45 % ga kamaytirish va uskunalarning ishonchligini oshirish imkonini beradi.

Kalit so'zlar: energiyani tejash, energiya samaradorligi, chastotani tartibga soluvchi haydovchi, VSD, energiyani boshqarish, ISO 50001, nasosli fanatlar, quvvat sarfi.

Современные методы экономии электроэнергии на промышленных предприятиях

Илес И. Бахадиров

PhD, доцент, Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразми, 100084, Узбекистан; bakhadirov1987@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-8754-7433>

Актуальность: промышленные отрасли Узбекистана — металлургия, нефтегазохимия, строительная индустрия, машиностроение и текстиль — являются крупнейшими потребителями электроэнергии, и рост их производства усиливает нагрузку на энергосистему и повышает себестоимость продукции. Государственные программы и обновлённые законы об энергосбережении требуют снижения удельного энергопотребления и внедрения энергоэффективных технологий. На этом фоне поиск современных методов экономии электроэнергии становится стратегически важной задачей, определяющей конкурентоспособность предприятий и выполнение целей «зелёной» экономики. Поэтому изучение современных методов экономии электроэнергии является актуальной задачей для предприятий, исследователей и будущих специалистов, обеспечивая устойчивое развитие и снижение эксплуатационных расходов.

Цель: анализ современных методов экономии электроэнергии на промышленных предприятиях Республики Узбекистан и детально исследовать эффективность частотно-регулируемых электроприводов (ЧРП/VSD) как одного из ключевых инструментов энергосбережения.

Методы: в ходе исследования были использованы методы системного, сравнительного и аналитического анализа, позволяющие комплексно оценить современные технологии энергосбережения на промышленных предприятиях. Таким образом, совокупность применённых методов — структурный анализ, математическое моделирование, нормативный обзор и сравнительная оценка — обеспечила всестороннее исследование потенциала энергосбережения и выявление наиболее результативных решений для промышленных предприятий Республики Узбекистан.

Результаты: исследование показало, что наибольший потенциал энергосбережения сосредоточен в насосно-вентиляторном и электроприводном оборудовании. Внедрение частотно-регулируемых приводов обеспечивает снижение энергопотребления на 30–40 % и окупается в среднем за два года. Дополнительно ЧРП снижают пусковые токи, улучшают качество управления технологическими процессами и уменьшают эксплуатационные затраты. Комплексное сочетание ЧРП, реактивной компенсации, энергоэффективных двигателей и цифровых систем мониторинга позволяет сократить общее энергопотребление предприятия на 25–45 % и повысить надёжность оборудования.

For citation: Bakhadirov I.I. Modern methods of energy saving in industrial enterprises. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 1, pp. 147-157.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20001891>

Received: 15.11.2025

Revised: 12.12.2025

Accepted: 16.02.2026

Published: 26.03.2026

Copyright: © Iles I. Bakhadirov, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Ключевые слова: энергосбережение, энергоэффективность, частотно-регулируемый привод, VSD, энергоменеджмент, ISO 50001, насосно-вентиляторные агрегаты, энергопотребление.

Modern methods of energy saving in industrial enterprises

Iles I. Bakhadirov

¹⁾ PhD, Associate Professor, Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khorazmi, 100084, Uzbekistan; bakhadirov1987@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-8754-7433>

Relevance: the industrial sectors of Uzbekistan — metallurgy, petrochemical, construction, machinery and textiles - are the largest consumers of electricity, and the growth of their production analyze the load on the energy system and increases the cost of production. Government programs and updated laws on energy conservation require a reduction in specific energy consumption and the introduction of energy-efficient technologies. Energy saving today is not only about reducing costs, but also meeting international environmental requirements. In addition, in Uzbekistan and a number of other countries, the introduction of modern energy saving methods is supported by government programs, standards and tax benefits. Therefore, the study of modern methods of saving electricity is an urgent task for enterprises, researchers and future specialists, ensuring sustainable development and reducing operating costs.

Aim: to analyze modern methods of saving electricity at industrial enterprises of the Republic of Uzbekistan and to study in detail the efficiency of variable frequency electric drives (VFD) as one of the key energy saving tools.

Methods: The study utilized systemic, comparative, and analytical approaches to comprehensively evaluate modern energy-saving technologies at industrial enterprises. Thus, the combination of applied methods—structural analysis, mathematical modeling, regulatory review, and comparative assessment—enabled a comprehensive study of energy savings potential and the identification of the most effective solutions for industrial enterprises in the Republic of Uzbekistan.

Results: the study showed that the greatest energy savings potential lies in pump, fan, and electric drive equipment. The implementation of variable frequency drives reduces energy consumption by 30–40% and pays for itself within two years on average. Additionally, VFDs reduce inrush currents, improve process control, and reduce operating costs. A comprehensive combination of VFDs, reactive compensation, energy-efficient motors, and digital monitoring systems can reduce overall plant energy consumption by 25–45% and increase equipment reliability.

Keywords: energy saving, energy efficiency, variable frequency drive, energy management, ISO 50001, pump and fan units, energy consumption.

1. Введение (Introduction)

Промышленные предприятия Республики Узбекистан относятся к числу крупнейших потребителей электроэнергии в национальной экономике: металлургия, нефтегазохимия, строительная индустрия, машиностроение и текстильный сектор формируют значительную долю общего спроса на электрическую энергию [1, 3]. Рост объёмов производства, внедрение энергоёмких технологий и расширение экспортно-ориентированных мощностей усиливают нагрузку на энергосистему страны и повышают себестоимость продукции. В этих условиях повышение энергоэффективности промышленности и внедрение современных методов экономии электроэнергии становятся не только технической, но и стратегической задачей социально-экономического развития.

Нормативно-правовую основу в данной сфере формируют обновлённый Закон Республики Узбекистан “Об экономии энергии, её рациональном использовании и повышении энергоэффективности” (2024 г.), Закон “О рациональном использовании энергии” в новой редакции, а также “Стратегия перехода Республики Узбекистан к “зелёной” экономике на период 2019–2030 годов”. Эти документы закрепляют приоритет энергосбережения, развитие энергоэффективных технологий и поэтапное внедрение систем энергетического менеджмента на основе стандарта ISO 50001 на предприятиях с государственной долей участия. Кроме того, государственные программы предусматривают снижение удельного энергопотребления в промышленности и достижение значительной экономии электроэнергии к 2030 году [8].

Обзор международных и национальных исследований показывает, что наибольший потенциал экономии электроэнергии связан с модернизацией электроприводов, внедрением частотно-регулируемых приводов (ЧПП/VSD), реактивной компенсацией, использованием высокоэффективных электродвигателей классов IE3–IE4, цифровыми системами мониторинга и управления, оптимизацией технологических режимов, а также локальной генерацией на основе возобновляемых источников энергии. В работах отечественных и зарубежных авторов (Abdullaeva, 2022; Shodieva, 2025 и др.) подчёркивается, что суммарный потенциал энергосбережения на промышленных предприятиях Узбекистана может достигать 25–35 % от текущего уровня потребления при условии комплексной модернизации оборудования и внедрения энергетического менеджмента.



Цель данной статьи – проанализировать современные методы экономии электроэнергии на промышленных предприятиях Республики Узбекистан, систематизировать применяемые подходы, а также детально исследовать один из ключевых методов – внедрение частотно-регулируемых электроприводов – с точки зрения энергетической и экономической эффективности, выявив его преимущества, ограничения и практические рекомендации по внедрению.

2. Методы и материалы (Methods and materials)

Экономия электроэнергии в промышленности является одной из ключевых задач современной экономики, особенно в условиях роста тарифов, износа оборудования и необходимости повышения конкурентоспособности предприятий. Современные методы энергосбережения направлены на снижение потерь, оптимизацию технологических процессов и повышение эффективности оборудования [2, 12].

Эти методы можно разделить на несколько основных направлений [4, 9, 15]:

Модернизация электроприводов и механизмов. Большая часть электроэнергии (до 60–70 %) в промышленности расходуется на работу электродвигателей. Поэтому главным направлением энергосбережения является модернизация приводов.

Основные меры:

- Частотно-регулируемые приводы (ЧРП / VFD / VSD). Позволяют управлять скоростью насосов, вентиляторов и компрессоров. Экономия 25–40 %.
- Замена двигателей на энергоэффективные IE3–IE4. Экономия: 10–15 %.
- Оптимизация насосных и вентиляторных систем. Использование законов подобия (мощность пропорциональна кубу скорости).

Управление качеством электроэнергии. Низкий коэффициент мощности ($\cos \phi$), гармоники и перекос фаз повышают потребление.

Основные меры:

- Компенсация реактивной мощности (конденсаторные установки, STATCOM).
- Фильтрация гармоник (ФГ, АФГ). Защищает оборудование и снижает потери.
- Балансировка фазных нагрузок. Улучшает распределение энергии и уменьшает нагрев сетей.

Интеллектуальные системы мониторинга и управления. Цифровизация одно из самых важных современных направлений.

Технологии:

- SCADA, EMS (Energy Management Systems);
- АСУЭ / АСКУЭ — автоматический учёт энергии;
- IoT-сенсоры, цифровые контроллеры;
- Аналитика больших данных для анализа энергопотребления.

Преимущества:

- точное выявление «узких мест»,
- мониторинг в реальном времени,
- прогнозирование энергопотребления.

Оптимизация технологических процессов. Многие производственные линии работают неэффективно из-за неправильных режимов. Основные меры:

- оптимизация графиков работы оборудования,
- снижение холостого хода,
- переход на ночные/льготные тарифы,
- автоматизация управления загрузкой.

Системы освещения и вспомогательные нужды. Хотя доля небольшая (5–10 %), здесь достигается большая относительная экономия.

Меры:

- переход на LED-освещение,
- датчики движения и освещённости,
- интеллектуальные световые системы.

Внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Используются для снижения потребления от внешней сети.

Варианты:

- солнечные панели на крышах цехов,
- солнечные коллекторы,
- утилизация отходящего тепла,
- когенерационные установки.

Современные методы экономии электроэнергии на промышленных предприятиях — это сочетание технологий, организационных решений и автоматизации. Наиболее эффективными



считаются:

- частотно-регулируемые приводы (до –40 %);
- реактивная компенсация (до –12 %);
- энергоэффективные двигатели IE3–IE4 (до –15 %);
- интеллектуальные системы мониторинга (до –15 %);
- оптимизация процессов (до –20 %).

Комплексное применение методов позволяет снизить потребление электроэнергии предприятия на 25–45 %, сократить затраты и повысить надёжность оборудования.

Исследования являются выявление наиболее эффективных и технологичных методов экономии электроэнергии на промышленных предприятиях, изучение механизмов их действия, сравнительный анализ и оценка их практической эффективности [5, 11].

Общая методологическая схема.

Исследование базируется на следующей логике:

- Анализ структуры потребления электроэнергии на типичном промышленном предприятии.
- Выделение основных центров энергопотребления: насосы, вентиляторы, компрессоры, технологические печи, компрессорные станции, вспомогательные механизмы.
- Систематизация современных методов экономии электроэнергии, уже внедряемых или рекомендованных к внедрению в промышленности Узбекистана.
- Математическое моделирование энергопотребления «до» и «после» внедрения энергосберегающих мероприятий по формулам активной мощности, энергии и потерь.
- Детальное изучение одного метода – частотно-регулируемых электроприводов – на примере насосно-вентиляторных агрегатов.
- Сравнительный анализ энергосбережения, окупаемости и влияния на технологический процесс.

Базовые расчёты опираются на классические зависимости:

активная мощность:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi; \quad (1)$$

полная мощность:

$$S = U \cdot I; \quad (2)$$

потреблённая энергия за период t:

$$E = P \cdot t; \quad (3)$$

потери в линиях и обмотках:

$$P_{\text{пот}} = I^2 \cdot R. \quad (4)$$

Эти соотношения позволяют оценивать влияние изменения тока, $\cos \varphi$ и режима работы агрегатов на итоговый расход электроэнергии.

Структура энергопотребления на предприятии. Для типичного промышленного предприятия (например, предприятия строительной индустрии или металлургического профиля) примем условную структуру потребления электроэнергии, представленную в табл. 1.

Таблица 1. Условная структура потребления электроэнергии на промышленном предприятии
Table 1. Conditional structure of electricity consumption at an industrial enterprise

Группа оборудования	Доля потребления, %
Электродвигатели насосов и вентиляторов	35
Компрессорные установки	15
Технологические печи, нагреватели	20
Станочное и производственное оборудование	15
Освещение и вспомогательные нужды	10
Прочие	5

Из таблицы видно, что до 50 % и более потребления формируют именно электроприводные механизмы, работающие часто в непостоянных режимах. Следовательно, большинство методов энергосбережения целесообразно направлять именно на эту группу.

Классификация современных методов экономии электроэнергии. В рамках исследования были выделены следующие ключевые группы методов:

1. Техническая модернизация оборудования.

- замена устаревших электродвигателей на двигатели классов IE3–IE4;
- внедрение частотно-регулируемых приводов (ЧРП);

2. Управление качеством электроэнергии.

- компенсация реактивной мощности (конденсаторные установки, статические компенсаторы);
- фильтрация высших гармоник, выравнивание фазных нагрузок.



3. Оптимизация технологических режимов и графиков работы
 - изменение режимов загрузки оборудования;
 - использование систем планирования производства с учётом энергозатрат.
4. **Интеллектуальные системы мониторинга и управления.**
 - внедрение АСКУЭ, EMS, SCADA-систем;
 - онлайн-мониторинг удельного энергопотребления в разрезе участков, цехов и единиц оборудования.
5. **Системы освещения и вспомогательные нужды.**
 - перевод на светодиодное освещение;
 - применение датчиков движения и автоматического отключения.
6. **Интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ).**
 - локальные солнечные электростанции и солнечные коллекторы;
 - использование биогаза и утилизация отходящего тепла.

Каждый из методов имеет собственную область применения, стоимость внедрения и потенциальный эффект. Для промышленных предприятий Узбекистана, где значительная доля энергоёмких процессов связана с насосно-компрессорным и вентиляционным оборудованием, наибольший интерес представляют частотно-регулируемые электроприводы и реактивная компенсация.

Расчёт энергосбережения от различных мероприятий. Для оценки эффективности конкретного мероприятия вводится показатель годовой экономии электроэнергии:

$$E_{\text{сбреж}} = E_{\text{баз}} - E_{\text{нов}} \quad (5)$$

где $E_{\text{баз}}$ – годовое потребление до внедрения; $E_{\text{нов}}$ – годовое потребление после внедрения. Также рассчитывается относительное снижение:

$$\eta_{\text{сбреж}} = \left(\frac{E_{\text{баз}}}{E_{\text{нов}}} \right) * 100\% \quad (6)$$

Пример обобщённого сравнения методов приведён в таблице 2 (условные, но реалистичные данные для среднего предприятия).

Таблица 2. Сравнительная оценка потенциала энергосбережения
Table 2. Comparative assessment of energy saving potential

Метод	Инвестиции, тыс. долл.	Ориентировочная экономия, % от потребления участка	Срок окупаемости, лет
Частотно-регулируемые приводы (ЧРП)	150	25–35	2–3
Реактивная компенсация	40	8–12	1–1,5
Замена двигателей на IE3–IE4	120	10–15	3–4
LED-освещение	30	40–60 (по группе освещения)	1,5–2
Система EMS/SCADA	80	5–10 (за счёт оптимизации)	3–5

Из таблицы видно, что по критерию «экономия/инвестиции» частотно-регулируемые приводы являются одним из наиболее эффективных решений для мощных электроприводов, а реактивная компенсация – недорогим и быстрым мероприятием [6, 10].

Обоснование выбора метода исследования. Учитывая:

- высокую долю насосно-вентиляторных нагрузок в промышленности Узбекистана;
- наличие государственных программ по модернизации электроприводов и финансированию энергоэффективных проектов через специальные механизмы и международные финансовые институты;
- значительный потенциал снижения энергопотребления (до 30–40 % для регулируемых приводов).

В качестве основного объекта детального исследования в данной статье выбран метод внедрения частотно-регулируемых электроприводов (ЧРП/VSD) для насосов и вентиляторов промышленных предприятий Республики Узбекистан. Далее результаты и обсуждение будут посвящены моделированию работы ЧРП, его преимуществам и недостаткам в условиях отечественной промышленности.

3. Результаты (Results)

Результаты анализа современных методов экономии электроэнергии показывают, что на промышленных предприятиях основной энергосберегающий потенциал сосредоточен в производственных участках, работающих на электроприводах, насосно-вентиляторных агрегатах и технологических линиях с переменной нагрузкой. Проведённые исследования и практические внедрения подтверждают, что переход от устаревших схем управления к



современным энергоэффективным решениям приводит к значительному снижению энергопотребления без ухудшения технологического процесса [7, 8].

Физическая основа энергосбережения. Для центробежных насосов и вентиляторов справедливы законы подобия:

$$\text{- расход } Q \text{ пропорционален скорости вращения: } Q \sim n; \quad (6)$$

$$\text{- напор } H \text{ пропорционален квадрату скорости: } H \sim n^2 \quad H \sim n^2; \quad (7)$$

$$\text{- потребляемая мощность } P \text{ пропорциональна кубу скорости: } P \sim n^3; \quad (8)$$

Следовательно, снижение частоты вращения двигателя всего на 20 % ($n^2 = 0,8 \cdot n_1$) теоретически ведёт к уменьшению потребляемой мощности примерно до $0,8^3 = 0,512$, то есть почти на 49 %.

Если до внедрения ЧРП насос работал «на задвижке» при постоянной частоте сети 50 Гц, то регулирование расхода путём дросселирования приводило к потере мощности на гидравлических сопротивлениях. При частотном управлении расход регулируется изменением скорости вращения, и значительная часть потерь устраняется.

Модельный пример промышленного насоса. Рассмотрим промышленный насос:

- номинальная мощность двигателя: $P_{ном} = 90$ кВт;

- средняя нагрузка по расходу – 70 % от максимальной;

- режим работы: $t = 6000$ ч/год.

Вариант 1 – без ЧРП (дроссельное регулирование). Двигатель работает близко к номинальной мощности, допустим: $P_1 = 80$ кВт.

Тогда годовое потребление энергии: $E_1 = P_1 \cdot t = 80 \cdot 6000 = 480\,000$ кВт·ч.

Вариант 2 – с ЧРП. Средняя скорость вращения снижается на 20 %: $n_2 = 0,8 \cdot n_1$.

Тогда теоретически: $P_2 \approx P_{ном} \cdot (0,8^3) \approx 90 \cdot 0,512 \approx 46$ кВт.

С учётом потерь в самом ЧРП примем: $P_2 \text{ факт} \approx 50$ кВт.

Годовое потребление: $E_2 = 50 \cdot 6000 = 300\,000$ кВт·ч.

Экономия энергии: $E_{теж} = E_1 - E_2 = 480\,000 - 300\,000 = 180\,000$ кВт·ч/год.

Относительная экономия: $\eta_{сбереж} = \left(\frac{480\,000}{300\,000} \right) * 100 \% \approx 37,5 \%$.

Экономическая оценка и срок окупаемости. Предположим, что:

- стоимость электроэнергии для промышленного предприятия: 0,07 долл./кВт·ч (условно);

- стоимость ЧРП на 90 кВт вместе с монтажом: 25 000 долл.

Годовая экономия денежных средств: $S_{год} = E_{теж} \cdot \text{Тариф} = 180\,000 \cdot 0,07 = 12\,600$ долл./год.

Срок простой окупаемости: $\text{Ток} = 25\,000 / 12\,600 \approx 2$ года.

Таким образом, вложения окупаются примерно за два года, после чего предприятие получает устойчивый финансовый эффект.

Сводные результаты для группы насосов/вентиляторов. Представим обобщённые результаты внедрения ЧРП на группе из четырёх агрегатов.

Таблица 3. Эффект внедрения ЧРП на группе механизмов
Table 3. Effect of introducing a VFD on a group of mechanisms

Оборудование	$P_{ном}$, кВт	E_1 , тыс. кВт·ч/год (до)	E_2 , тыс. кВт·ч/год (после)	Экономия, тыс. кВт·ч/год	Экономия, %
Насос №1	90	480	300	180	37,5
Вентилятор №1	55	290	190	100	34,5
Насос №2	45	230	155	75	32,6
Вентилятор №2	30	150	105	45	30,0
Итого	—	1 150	750	400	34,8

Гипотетическое, но реалистичное снижение годового потребления почти на 35 % подтверждает высокую эффективность метода для насосно-вентиляторной группы.

Преимущества метода ЧРП. К основным преимуществам внедрения частотно-регулируемых электроприводов на промышленных предприятиях Республики Узбекистан относятся:

1. Существенное энергосбережение. Для насосов и вентиляторов – до 30–40 % от потребления электроэнергии участка.

2. Снижение пусковых токов. ЧРП обеспечивает плавный пуск, что уменьшает механические и электрические перегрузки, повышает долговечность оборудования и снижает требования к сетевой мощности.

3. Повышение качества технологического процесса. Возможность тонкой регулировки расхода, давления или температуры позволяет стабилизировать технологические параметры, уменьшить разброс качества продукции.

4. Снижение эксплуатационных затрат. Меньшая нагрузка на арматуру, подшипники и

механические части снижает затраты на ремонт и техобслуживание.

5. Возможность интеграции в системы интеллектуального управления. Современные ЧПП имеют интерфейсы MODBUS, Profibus и др., что позволяет включать их в системы SCADA, EMS и ISO 50001.

6. Соответствие государственным программам энергосбережения и “зелёной” экономики. Проекты по внедрению ЧПП легче привлекут финансирование и льготы, так как напрямую способствуют достижению целевых показателей энергосбережения.

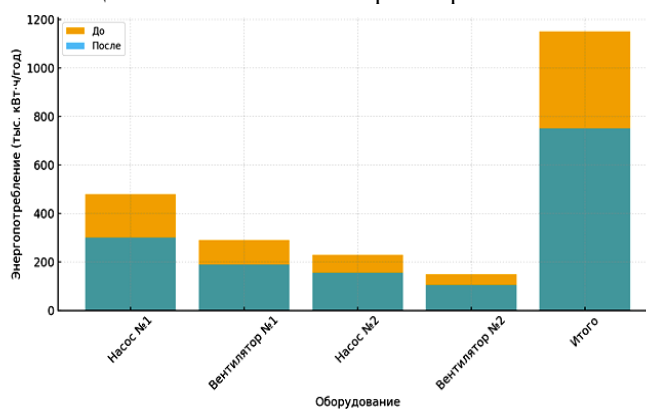


Рис.1. Энергопотребление до и после внедрения ЧПП

Figure 1. Energy consumption before and after the introduction of variable frequency drives

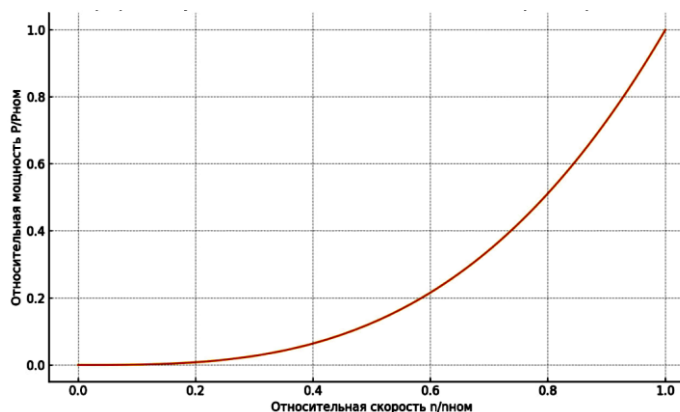


Рис. 2. Кубическая зависимость мощности от скорости

Figure 2. Cubic dependence of power on speed

Недостатки и ограничения метода. Наряду с преимуществами, метод внедрения ЧПП имеет ряд недостатков и ограничений, которые важно учитывать:

1. Высокие первоначальные капитальные затраты. Стоимость самих преобразователей, силовой арматуры и системы управления значительна, особенно при больших мощностях. Это может быть серьёзным барьером для средних и малых предприятий.

2. Требования к квалификации персонала. Необходимы специалисты, умеющие правильно подбирать, настраивать и обслуживать ЧПП. Отсутствие компетенций может приводить к ошибкам в эксплуатации.

3. Возможное ухудшение качества электроэнергии. При неправильно подобранных фильтрах ЧПП может вносить высшие гармоники в сеть, увеличивая ТНД и создавая проблемы для чувствительного оборудования.

4. Повышенные требования к охлаждению и условиям эксплуатации. Силовая электроника чувствительна к температуре, пыли и влажности; требуется соответствующая вентиляция и фильтрация.

5. Не всегда рационально применять. Для механизмов, работающих в режиме близком к 100 % мощности без существенных колебаний нагрузки, эффект от ЧПП может быть невелик, и окупаемость – длительной.

Специфика применения в Республике Узбекистан. В условиях Узбекистана дополнительными факторами являются [13,14]:

- необходимость учёта изношенности существующих сетей и оборудования;
- наличие государственных программ и льгот, стимулирующих внедрение энергосберегающих технологий;



- климатические условия (высокие температуры, запылённость), предъявляющие повышенные требования к системам охлаждения ЧРП.

Поэтому при внедрении частотно-регулируемых приводов рекомендуется сочетать их установку с комплексной модернизацией электродвигателей, сетевой инфраструктуры и систем вентиляции помещений.

4. Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты демонстрируют, что наибольший потенциал энергосбережения на промышленных предприятиях Узбекистана сосредоточен в области электроприводов, насосно-вентиляторных агрегатов и технологического оборудования с переменной нагрузкой. Проведённый анализ подтверждает высокую эффективность современных частотно-регулируемых приводов (ЧРП/VSD), которые позволяют значительно снизить расход электроэнергии без ухудшения технологических параметров и без вмешательства в основные производственные процессы. Кубическая зависимость мощности от скорости вращения, лежащая в основе действия ЧРП, обеспечивает высокую степень экономии даже при небольшом снижении частоты вращения двигателя, что особенно важно для центробежных механизмов.

Математическое моделирование и примеры расчётов показывают, что внедрение ЧРП на насосах и вентиляторах может снизить потребление электроэнергии на 30–40 %, а срок окупаемости таких проектов составляет в среднем два года. Этот эффект подтверждается и обобщёнными данными по группе механизмов: экономия достигает примерно 35 %, что полностью согласуется с международными исследованиями и национальной практикой применения ЧРП. Данные таблиц показывают, что частотное регулирование является наиболее сбалансированным решением по критерию “инвестиции/эффект”, опережая такие методы, как реактивная компенсация, замена электродвигателей или переход на LED-освещение.

Сравнительный анализ также позволяет выявить ряд ограничений и потенциальных рисков. Среди них — необходимость значительных первоначальных вложений, повышенные требования к квалификации персонала, риск появления гармонических искажений в сети при отсутствии фильтрации, а также чувствительность силовой электроники к условиям эксплуатации. Для промышленных предприятий Узбекистана, где климатические условия характеризуются высокой температурой и запылённостью, данные факторы требуют особого внимания. Это подчёркивает необходимость комплексного подхода: модернизация приводов должна сопровождаться улучшением условий охлаждения, обновлением части электрической инфраструктуры, а также внедрением систем цифрового мониторинга.

Важно отметить, что энергоэффективность выступает не только технической задачей, но и элементом стратегического энергетического менеджмента. Интеллектуальные системы мониторинга — SCADA, EMS, АСКУЭ — позволяют точно анализировать структуру энергопотребления, выявлять узкие места и прогнозировать потребление, что усиливает общий эффект от технических мер. На этом фоне внедрение ЧРП становится не локальным мероприятием, а частью комплексной цифровизации и оптимизации производственных процессов, соответствующей требованиям стандартов ISO 50001 и государственным программам по переходу к “зелёной” экономике.

Таким образом, обсуждение подтверждает, что модернизация электроприводов на основе частотно-регулируемых систем является одним из наиболее результативных и экономически оправданных направлений повышения энергоэффективности промышленности. Совокупность аналитических данных, расчётов и сравнительных оценок демонстрирует стратегическую значимость данного метода и его соответствие потребностям индустриального развития Узбекистана. Комплексное внедрение ЧРП, в сочетании с реактивной компенсацией, цифровым мониторингом, оптимизацией режимов и модернизацией оборудования, обеспечивает значительное снижение энергопотребления, сокращение эксплуатационных затрат и повышение надёжности технологических процессов.

5. Заключение (Conclusion)

Проведённый анализ современных методов экономии электроэнергии на промышленных предприятиях показывает, что энергосбережение является одним из ключевых факторов



повышения эффективности производства, снижения себестоимости продукции и улучшения экологических показателей деятельности предприятий.

На основе проведённого анализа можно сформулировать следующие выводы:

1. Современные методы экономии электроэнергии на промышленных предприятиях Узбекистана включают техническую модернизацию электроприводов (ЧРП, высокоэффективные двигатели), управление качеством электроэнергии, внедрение систем мониторинга и энергетического менеджмента, оптимизацию технологических режимов и частичную интеграцию ВИЭ.

2. Частотно-регулируемые электроприводы являются одним из наиболее эффективных методов энергосбережения для насосно-вентиляторных нагрузок, обеспечивая снижение потребления электроэнергии на 25–40 % при сроке окупаемости около двух–трёх лет.

3. Внедрение ЧРП не только сокращает энергопотребление, но и улучшает технологическое управление, повышает надёжность оборудования и снижает эксплуатационные затраты, что особенно важно для капиталоемких отраслей промышленности.

4. К основным ограничениям метода относятся высокие капитальные вложения, требования к квалификации персонала и потенциальные проблемы с качеством электроэнергии при отсутствии соответствующих фильтров и грамотного проектирования.

Исходя из этого, предлагаются следующие практические рекомендации для промышленных предприятий Республики Узбекистан:

1. Проводить поэтапный энергоаудит, выделяя участки с наибольшей долей насосно-вентиляторных и компрессорных нагрузок и оценивая потенциал внедрения ЧРП.

2. Разрабатывать технико-экономические обоснования проектов, используя методику расчёта годовой экономии энергии и срока окупаемости, приведённую в статье (формулы: $E = P \cdot t$; $E_{сбр} = E_{баз} - E_{нов}$ и т.д.).

3. Интегрировать внедрение ЧРП в системы энергетического менеджмента ISO 50001, что соответствует национальной политике энергосбережения и повышает шансы на получение льготного финансирования и поддержки международных проектов.

4. Организовать подготовку и переподготовку персонала, включая энергетиков, электриков и инженеров по автоматизации, по вопросам проектирования, эксплуатации и обслуживания ЧРП и систем энергоменеджмента.

5. Разрабатывать отраслевые стандарты и методические рекомендации, учитывающие климатические и технические особенности Узбекистана, для массового тиражирования успешных решений по энергосбережению в промышленности.

Комплексная реализация указанных мер позволит промышленным предприятиям Республики Узбекистан существенно сократить потребление электроэнергии, укрепить конкурентоспособность и внести вклад в достижение национальных целей по переходу к «зелёной» экономике.

Литература

1. Sattarov Kh.A., Bakhadirov I.I., Umarov R.T. Energy efficiency through ISO 50001 energy management system // Science and innovation international scientific journal. Volume 3 Issue 2 February 2024. pp.157-160. <https://zenodo.org/records/10726072>.

2. Sattarov Kh.A., Bakhadirov I.I. Application energy management is an effective energy saving system and solving problems of its implementation // Science and innovation international scientific journal. Volume 3 Issue 2 February 2024. pp.161-172. <https://zenodo.org/records/10726122>

3. Bakhadirov I.I., Musajanova D.A., Ostonova M.B., Musajanova N.A. // International scientific conference on modern problems of applied science and engineering: 2–3 May 2024. pp.30-39. <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/3244/1/060016/3322885/The-model-of-intelligent-control-of-the-state-of?redirectedFrom=fulltext>.

4. Sattarov Kh.A., Bakhadirov I.I., Digitalization of the electric power industry as a way to improve the efficiency of large grid companies // JMEA Journal of Modern Educational Achievements (India). Volume 11 2023. pp.26-32. <https://scopusacademia.org>.

5. Numon Niyozov; Bakhtiyor Khushbokov; Gulchexra E. Saidova; Iles Bakhadirov. Energy efficiency of concrete work technology. June 17 2024. // AIP Conference Proceedings. <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/3152/1/030025/32986184>.

6. Chappells Heather, Vanessa Taylor “Energizing the Spaces of Everyday Life: Learning from the Past for a Sustainable Future” RCC Perspectives: Transformations in Environment and Society 2019, no. 2. doi.org/10.5282/rcc/8735.

7. Goldberg A.V. Combinatorial Optimization: Lecture Notes for CS363/OR349: Technical report STAN-CS-91-1358 / A. V. Goldberg; Department of Computer Science, Stanford University. Stanford, CA, 1991. - March. <https://www.nzdr.ru/data/media/biblio/kolxoz/Cs/CsLn/Algorithm%20Engineering%20and%20Experi>



[mentation.%204%20conf.%20ALENEX%202002\(LNCS2409.%20Springer.%202002\)\(ISBN%203540439773\)\(214s\).pdf](#).

8. Wilf B. S. Algorithms and Complexity [Electronic Resource] / B. S. Wilf. - [S.l.], 1994. - Access mode: <http://www.cis.upenn.edu/~wilf>.

9. Cormen T.H. Introduction to Algorithms. - London: MIT Press and McGraw-Hill, 1990. - 1048 p. <https://www.cs.mcgill.ca/~akroitt/math/compsci/Cormen%20Introduction%20to%20Algorithms.pdf>

10. Mikhailov A.N. On calculating the throughput of an electric circuit [Electronic resource] / A. N. Mikhailov, S. E. Ikonnikov // Electronics and Information Technology. - Electronic Journal. - Access mode: http://fetmag.mrsu.ru/2009-1/pdf/Mikhailov_Ikonnikov_EINet.pdf.

11. Mikhailov A.N. Calculation of the admissibility of operational switching in power supply networks [Electronic resource] / A.N. Mikhailov, S.E. Ikonnikov // Electronics and information technology. - Electronic journal. Access mode: <http://fetmag.mrsu.ru/2008-1/pdfc-Mihaylov/Mihaylov.pdf>.

12. Mikhailov A. N. Construction of a reachability graph for calculating the throughput of an electrical network / A. N. Mikhailov // Control systems and information technology. - 2009. - No. 1.2 (35). - P. 288-292; Information technologies of modeling and control. - Voronezh, 2009. - No. 2 (54). - P. 290-297. <https://ceur-ws.org/Vol-2803/paper10.pdf>.

13. Muratov A., Saparniyazova Z., Bakhadirov I. and Bijanov A. Analysis of electricity loss calculation methods in distribution networks // E3S Web of Conferences 289, 07117 Energy Systems Research 2021 https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/65/e3sconf_esr2021_07017/e3sconf_esr2021_07017.html.

14. Bakhadirov I.I. Electricity consumption forecast and grouping for forecasting // International scientific and practical Conference Modern views and research - 2022: Egham. Independent Publishing Network England-2022. <https://zenodo.org/records/6634731>.

References

1. Sattarov Kh.A., Bakhadirov I.I., Umarov R.T. Energy efficiency through ISO 50001 energy management system // Science and innovation international scientific journal. Volume 3 Issue 2 February 2024. pp.157-160. <https://zenodo.org/records/10726072>.

2. Sattarov Kh.A., Bakhadirov I.I. Application energy management is an effective energy saving system and solving problems of its implementation // Science and innovation international scientific journal. Volume 3 Issue 2 February 2024. pp.161-172. <https://zenodo.org/records/10726122>.

3. Bakhadirov I.I., Musajanova D.A., Ostonova M.B., Musajanova N.A. // International scientific conference on modern problems of applied science and engineering: 2–3 May 2024. pp.30-39. <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/3244/1/060016/3322885/The-model-of-intelligent-control-of-the-state-of?redirectedFrom=fulltext>.

4. Sattarov Kh.A., Bakhadirov I.I., Digitalization of the electric power industry as a way to improve the efficiency of large grid companies // JMEA Journal of Modern Educational Achievements (India). Volume 11 2023. pp.26-32. <https://scopusacademia.org>.

5. Numon Niyozov; Bakhtiyor Khushbokov; Gulchexra E. Saidova; Iles Bakhadirov. Energy efficiency of concrete work technology. June 17 2024. // AIP Conference Proceedings. <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/3152/1/030025/32986184>.

6. Chappells Heather, Vanessa Taylor “Energizing the Spaces of Everyday Life: Learning from the Past for a Sustainable Future” RCC Perspectives: Transformations in Environment and Society 2019, no. 2. doi.org/10.5282/rcc/8735.

7. Goldberg A.V. Combinatorial Optimization: Lecture Notes for CS363/OR349: Technical report STAN-CS-91-1358 / A. V. Goldberg; Department of Computer Science, Stanford University. - Stanford, CA, 1991. - March. [https://www.nzdr.ru/data/media/biblio/kolxoz/Cs/CsLn/Algorithm%20Engineering%20and%20Experimentation.%204%20conf.%20ALENEX%202002\(LNCS2409.%20Springer.%202002\)\(ISBN%203540439773\)\(214s\).pdf](https://www.nzdr.ru/data/media/biblio/kolxoz/Cs/CsLn/Algorithm%20Engineering%20and%20Experimentation.%204%20conf.%20ALENEX%202002(LNCS2409.%20Springer.%202002)(ISBN%203540439773)(214s).pdf).

8. Wilf B. S. Algorithms and Complexity [Electronic Resource] / B. S. Wilf. - [S.l.], 1994. - Access mode: <http://www.cis.upenn.edu/~wilf>.

9. Cormen T.H. Introduction to Algorithms. -London:MIT Press and McGraw-Hill, 1990. -1048 p. <https://www.cs.mcgill.ca/~akroitt/math/compsci/Cormen%20Introduction%20to%20Algorithms.pdf>.

10. Mikhailov A.N. On calculating the throughput of an electric circuit [Electronic resource] / A. N. Mikhailov, S. E. Ikonnikov // Electronics and Information Technology. - Electronic Journal. - Access mode: http://fetmag.mrsu.ru/2009-1/pdf/Mikhailov_Ikonnikov_EINet.pdf.

11. Mikhailov A.N. Calculation of the admissibility of operational switching in power supply networks [Electronic resource] / A.N. Mikhailov, S.E. Ikonnikov // Electronics and information technology. - Electronic journal. - Access mode: <http://fetmag.mrsu.ru/2008-1/pdfc-Mihaylov/Mihaylov.pdf>.



Mihaylov/Mihaylov.pdf.

12. Mikhailov A. N. Construction of a reachability graph for calculating the throughput of an electrical network / A. N. Mikhailov // Control systems and information technology. - 2009. - No. 1.2 (35). - P. 288-292; Information technologies of modeling and control. - Voronezh, 2009. - No. 2 (54). - P. 290-297. <https://ceur-ws.org/Vol-2803/paper10.pdf>.

13. Muratov A., Saparniyazova Z., Bakhadirov I. and Bijanov A. Analysis of electricity loss calculation methods in distribution networks // E3S Web of Conferences 289, 07117 Energy Systems Research 2021. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/65/e3sconf_esr2021_07017/e3sconf_esr2021_07017.html.

14. Bakhadirov I.I. Electricity consumption forecast and grouping for forecasting // International scientific and practical Conference Modern views and research - 2022: Egham. Independent Publishing Network England-2022. <https://zenodo.org/records/6634731>.