

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ЦЕХА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Шерметов Ж.К.

Назирова Х.З.

*Ташкентский государственный технический университет
имени Ислама Каримова*

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

ИСТОРИЯ СТАТЬИ:

Received: 02.06.2026

Revised: 03.06.2026

Accepted: 04.06.2026

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

*механический цех,
электрообеспечение,
энергосбережение,
компенсация реактивной
мощности, УКРМ,
частотно-регулируемый
привод, LED-освещение,
EMS-мониторинг, СЭС,
BESS, технико-
экономическое
обоснование.*

АННОТАЦИЯ:

В статье рассматриваются методика и результаты энергосберегающей модернизации системы электрообеспечения механического цеха АО «O'zelektroapparat-Electroshield». На основе данных последнего энергоаудита с суммарной установленной мощностью оборудования 624,04 кВт выполнен расчёт активной, реактивной и полной мощности, оценены потери в цеховой сети, пиковые нагрузки и резервы энергосбережения. Предложен комплекс мероприятий: установка локального УКРМ 150 квар, применение частотно-регулируемых приводов, модернизация освещения на LED и внедрение EMS-мониторинга. Дополнительно рассмотрено влияние общезаводской солнечной электростанции и системы накопления энергии BESS на режим питания механического цеха. Получен суммарный годовой экономический эффект 610,1 млн сум, из которых 189,7 млн сум обеспечиваются локальными цеховыми мероприятиями с простым сроком окупаемости 4,93 года. Выполнена оценка экологического эффекта: сокращение косвенных выбросов CO₂ составляет около 238 т/год.

1. Введение

Снижение энергоёмкости промышленного производства является одной из приоритетных задач в условиях роста стоимости электроэнергии и ужесточения требований к энергетической эффективности. Для электротехнических предприятий особое значение имеют механические цеха — именно в них сосредоточены металлообрабатывающие станки, электроприводы, компрессоры, сварочные посты, вентиляционные установки и осветительная нагрузка.

Механический цех АО «O'zelektroapparat-Electroshield» формирует смешанный режим электропотребления: активная нагрузка сочетается с реактивной мощностью, пусковыми токами и кратковременными пиками. Такая структура обуславливает нерациональный расход электроэнергии, повышенные потери в цеховой сети и ухудшение режима напряжения. В то же время предприятие располагает собственной энергетической инфраструктурой — солнечной электростанцией мощностью 1,34 МВт, системой накопления энергии BESS 3,34 МВт и общезаводскими средствами компенсации реактивной мощности, — что создаёт дополнительные возможности для оптимизации режима питания цеха.

Цель настоящей работы — разработать и технико-экономически обосновать комплекс мероприятий по энергосберегающей модернизации системы электроснабжения механического цеха на уровне цеховой сети 0,4 кВ. Методологической основой служат расчёт электрических нагрузок по установленной мощности, метод компенсации реактивной мощности по тангенсу угла и балансовый подход к оценке годовой экономии.

2. Характеристика объекта и исходные данные

Механический цех является ключевым производственным участком в структуре АО «O'zelektroapparat-Electroshield». Он обеспечивает механическую обработку деталей, корпусов, крепёжных элементов и других компонентов, применяемых при производстве электротехнического оборудования. Состав нагрузки цеха охватывает несколько функциональных групп электроприёмников с различными режимами работы (таблица 1).

Таблица 1 — Укрупнённая структура электроприёмников механического цеха

Группа электроприёмников	Характер нагрузки	Резерв энергосбережения
Металлообрабатывающие станки	Переменная технологическая нагрузка, периоды холостого хода	EMS-контроль, отключение холостого хода
Станки с ЧПУ	Двигательные и электронные нагрузки, высокая точность режимов	Учёт по станкам, оптимизация графика
Компрессорное оборудование	Длительная нагрузка, чувствительна к утечкам воздуха	ЧРП, контроль давления
Сварочные посты	Резкопеременная нагрузка, ухудшение $\cos\varphi$	Групповой учёт, режимное управление
Вентиляция и насосы	Длительная переменная нагрузка	ЧРП и регуляция графика работы
Освещение	Длительная нагрузка в смену	LED, зональное управление

Исходной базой расчёта послужили материалы последнего энергоаудита механического участка. По данным энергоаудита суммарная установленная мощность оборудования составляет $P_{уст} = 624,04$ кВт. Это значение является фактическим и принято без корректировок. Остальные расчётные параметры определены по принятой методике (таблица 2).

Таблица 2 — Исходные расчётные параметры механического цеха

Показатель	Значение	Комментарий
Установленная мощность Руст	624,04 кВт	По данным энергоаудита
Коэффициент расчётной загрузки k_p	0,55	Для смешанной станочной нагрузки
Расчётная активная мощность P_p	343,22 кВт	$624,04 \times 0,55$
Годовой фонд работы $T_{год}$	3000 ч/год	Производственный участок с дневной загрузкой
Годовое электропотребление Ецех	1029,7 МВт·ч/год	$P_p \times T_{год} / 1000$

3. Расчёт электрических нагрузок и анализ режима мощности

Расчёт нагрузок выполнен по методике коэффициентов использования и спроса. Переход от установленной мощности к расчётной активной нагрузке осуществлён через коэффициент расчётной загрузки $k_p = 0,55$, принятый для смешанной станочной нагрузки:

$$P_p = P_{уст} \cdot k_p = 624,04 \cdot 0,55 = 343,22 \text{ кВт}$$

Для существующего режима принят средневзвешенный коэффициент мощности $\cos\varphi_1 = 0,80$, характерный для смешанной электродвигательной и сварочной нагрузки. При этом $\operatorname{tg}\varphi_1 = 0,75$. Реактивная и полная мощности до модернизации:

$$Q_1 = P_p \cdot \operatorname{tg}\varphi_1 = 343,22 \cdot 0,75 = 257,4 \text{ квар}$$

$$S_1 = P_p / \cos\varphi_1 = 343,22 / 0,80 = 429,0 \text{ кВА}$$

После установки УКРМ целевой коэффициент мощности $\cos\varphi_2 = 0,95$, $\operatorname{tg}\varphi_2 = 0,329$. Требуемая мощность компенсирующего устройства:

$$Q_c = P_p \cdot (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) = 343,22 \cdot (0,75 - 0,329) = 144,5 \text{ квар}$$

С учётом стандартного ряда и резерва регулирования принимается автоматическое УКРМ мощностью 150 квар со ступенчатым регулированием (25 + 25 + 50 + 50 квар). Сводный баланс мощностей до и после компенсации приведён в таблице 3.

Таблица 3 — Баланс мощностей механического цеха до и после компенсации

Показатель	До модернизации	После модернизации	Изменение
Активная мощность P, кВт	343,22	343,22	—
Коэффициент мощности $\cos\varphi$	0,80	0,95	+18,75 %
Реактивная мощность Q, квар	257,4	112,9	-144,5 квар
Полная мощность S, кВА	429,0	361,3	-67,7 кВА

Снижение полной мощности уменьшает токовую загрузку цеховой сети. Поскольку активные потери пропорциональны квадрату тока, относительное снижение потерь оценивается выражением:

$$\Delta P_{\text{пот}} = 1 - (S_2/S_1)^2 = 1 - (361,3/429,0)^2 = 29,1 \%$$

При расчётных потерях в цеховой сети 45 МВт·ч/год экономия от уменьшения токовой нагрузки составляет 13,1 МВт·ч/год. Помимо снижения потерь, пиковая нагрузка цеха до модернизации может достигать 370–390 кВт при одновременной работе станков, компрессоров и вентиляции. После внедрения ЧРП и EMS-контроля расчётный пик снижается до 335–350 кВт.

4. Технические решения по модернизации

4.1. Локальная компенсация реактивной мощности

Автоматическое УКРМ мощностью 150 квар устанавливается непосредственно на стороне 0,4 кВ у распределительного щита механического цеха. Применение локальной компенсации обосновано тем, что реактивная мощность должна генерироваться максимально близко к месту её потребления: в этом случае снижается ток не только на вводе предприятия, но и во внутренних кабельных линиях цеха, что уменьшает нагрев кабелей и улучшает уровень напряжения у электроприёмников.

Ступенчатое регулирование обеспечивает адаптацию к переменному графику механического цеха. Автоматический регулятор отключает лишние ступени в периоды

малой нагрузки, исключая перекомпенсацию и связанные с ней перенапряжения. Расчётные потери в сети снизятся с 45 до 31,9 МВт·ч/год.

4.2. Частотно-регулируемые приводы

ЧРП применяются не для всего электродвигательного парка, а только для механизмов с реально переменной нагрузкой: компрессоров, вентиляционных установок, насосов охлаждающей жидкости и вспомогательных приводов. Для насосов и вентиляторов мощность приблизительно пропорциональна кубу частоты вращения: снижение производительности даже на 20 % даёт сокращение потребляемой мощности более чем на 50 %.

Для нагрузок с постоянной номинальной загрузкой установка ЧРП нецелесообразна. Поэтому оборудование для первоочередного оснащения ЧРП выбиралось по критерию фактического изменения режима. Суммарная мощность выбранной группы составила около 120 кВт; при среднем снижении потребления на 20–25 % годовая экономия составляет 96,5 МВт·ч/год.

4.3. LED-освещение и снижение холостого хода

Замена устаревших светильников на LED-светильники снижает установленную мощность осветительной нагрузки и уменьшает тепловыделение в производственном помещении. Годовая экономия от модернизации освещения принята равной 18,9 МВт·ч/год. Дополнительный эффект обеспечивается зональным включением и отключением освещения в нерабочих зонах.

Снижение холостого хода оборудования — задача организационная, решаемая цифровым контролем: если станок включён, но технологическая операция не выполняется, он продолжает потреблять энергию. EMS-мониторинг позволяет фиксировать такие режимы и формировать управленческие решения по их устранению.

4.4. EMS-мониторинг

EMS реализуется по группам оборудования: станки, ЧПУ, компрессоры, сварочные посты, вентиляция и освещение. Для каждой группы фиксируются активная энергия, максимальная мощность, коэффициент мощности и время работы. Такая детализация позволяет перейти от суммарного учёта к управлению причинами расхода — выявлять группы с нерациональным потреблением и корректировать режимы их работы.

Экономия от EMS-мониторинга принята на уровне 4 % от годового электропотребления цеха: $EEMS = 1029,7 \cdot 0,04 = 41,2$ МВт·ч/год. Данный эффект не является прямой «автоматической» экономией — он достигается через выявление и устранение холостого хода, ненужной работы вентиляции и компрессоров.

=====

4.5. Влияние СЭС и BESS на режим питания цеха

Солнечная электростанция предприятия мощностью 2,94 МВт (действующие 1,34 МВт + планируемое расширение 1,6 МВт) при удельной выработке 1550 кВт·ч/кВт·год генерирует около 4557 МВт·ч/год. Поскольку механический цех работает преимущественно днём, его нагрузка частично совпадает с профилем солнечной генерации. Доля годового потребления цеха, покрываемая общезаводской СЭС, принята 35 %: $E_{СЭС,цех} = 1029,7 \cdot 0,35 = 360,4$ МВт·ч/год. Это не физическое подключение СЭС к цеховой сети, а доля дневной нагрузки, которая в общезаводском балансе замещается солнечной генерацией.

BESS мощностью 3,34 МВт является общезаводской системой. Её вклад для цеха проявляется через снижение общезаводского максимума, в который входит и нагрузка механического участка. Расчётный пик цеха снижается с 385 до 345 кВт (-40 кВт) за счёт режимного управления ЧПП, EMS и долевого участия BESS в сглаживании общего пика предприятия.

5. Техничко-экономическое обоснование

Экономическая часть выполнена на уровне механического цеха. Базой расчёта принято годовое потребление 1029,7 МВт·ч/год, расчётный тариф — 1000 сум/кВт·ч. Все мероприятия разделены на локальные (относятся непосредственно к цеху) и долевые (эффект от общезаводской инфраструктуры). Такое разделение принципиально для корректного определения капитальных затрат и срока окупаемости.

Сводный годовой экономический эффект по всем мероприятиям приведён в таблице 4.

Таблица 4 — Сводный годовой экономический эффект по механическому цеху

Мероприятие	Энергетический эффект	Денежный эффект, млн сум/год	Характер
УКРМ 150 квар	13,1 МВт·ч/год + режимный	33,1	Локальный
ЧПП	96,5 МВт·ч/год	96,5	Локальный
LED-освещение	18,9 МВт·ч/год	18,9	Локальный

EMS-мониторинг	41,2 МВт·ч/год	41,2	Локальный
BESS (снижение пика)	-40 кВт	60,0	Долевой
СЭС (покрытие дневной нагрузки)	360,4 МВт·ч/год	360,4	Долевой
ИТОГО	529 МВт·ч/год + пик	610,1	Комплексный

Из 610,1 млн сум/год локальные цеховые мероприятия обеспечивают 189,7 млн сум/год, а оставшиеся 420,4 млн сум/год — долевой эффект общезаводской инфраструктуры СЭС и BESS. Капитальные затраты рассчитываются только на локальную модернизацию: УКРМ — 180 млн сум, ЧРП — 450 млн сум, LED — 80 млн сум, EMS — 225 млн сум. Суммарный CAPEX составляет 935 млн сум.

$$PP = CAPEX / \text{Эгод} = 935 / 189,7 \approx 4,93 \text{ года}$$

Анализ чувствительности показывает, что проект сохраняет экономическую целесообразность в широком диапазоне тарифов. При тарифе 800 сум/кВт·ч срок окупаемости возрастает до 6,16 года, при тарифе 1500 сум/кВт·ч — снижается до 3,29 года (таблица 5).

Таблица 5 — Анализ чувствительности срока окупаемости к тарифу

Тариф, сум/кВт·ч	Локальный эффект, млн сум/год	CAPEX, млн сум	PP, лет
800	151,8	935	6,16
1000	189,7	935	4,93
1200	227,6	935	4,11
1500	284,6	935	3,29

6. Охрана труда и экологический эффект

Все предлагаемые мероприятия должны внедряться с соблюдением требований электробезопасности. При монтаже УКРМ обязательны разрядные резисторы, защита

от перенапряжений и доступ только для квалифицированного персонала. ЧРП требуют надлежащего заземления экранов кабелей, установки ЕМС-фильтров и соблюдения ограничений на длину моторных кабелей. Установка EMS-счётчиков и датчиков должна выполняться при обесточенной цепи с применением предупредительных плакатов. Систематизированный перечень опасных факторов и мер безопасности приведён в таблице 6.

Таблица 6 — Опасные факторы и меры безопасности

Опасный фактор	Источник	Меры безопасности
Поражение током	Щиты, ЧРП, УКРМ	Заземление, блокировки, допуск персонала
Вращающиеся части	Станки, приводы	Ограждения, аварийный останов
Перегрев оборудования	Двигатели, ЧРП, конденсаторы	Контроль температуры, вентиляция шкафов
Электрическая дуга	Сварочные посты, коммутация	СИЗ, исправная изоляция, огнезащита

Экологический эффект модернизации обусловлен снижением закупки электроэнергии из внешней сети и частичным замещением её солнечной генерацией. Суммарный энергетический эффект мероприятий составляет 529 МВт·ч/год. При коэффициенте удельных выбросов 0,45 кг CO₂/кВт·ч сокращение косвенных выбросов составляет:

$$\Delta \text{ССO}_2 = 529\,000 \cdot 0,45 / 1000 \approx 238 \text{ т CO}_2/\text{год}$$

Этот результат относится конкретно к механическому цеху и является измеримым. Дополнительный экологический эффект связан с сокращением теплового излучения устаревших светильников и снижением лишних механических потерь в приводах, работавших в нерациональных режимах.

7. Заключение

В работе выполнено инженерное обоснование энергосберегающей модернизации системы электроснабжения механического цеха АО «O'zelektroapparat-Electroshield». На основе фактических данных энергоаудита (Pуст = 624,04 кВт) рассчитаны

электрические нагрузки, выявлены основные проблемы электроснабжения и предложен комплекс мероприятий цехового уровня.

Основные результаты работы: компенсация реактивной мощности повышает $\cos\phi$ с 0,80 до 0,95 и снижает полную мощность на 67,7 кВА; потери в цеховой сети уменьшаются на 29,1 %; ЧРП, LED и EMS обеспечивают суммарную экономию 156,6 МВт·ч/год; долевого эффект СЭС составляет 360,4 МВт·ч/год замещения сетевой электроэнергии. Пиковая нагрузка снижается с 385 до 345 кВт.

Локальные цеховые мероприятия дают годовой экономический эффект 189,7 млн сум при CAPEX 935 млн сум и простом сроке окупаемости 4,93 года. С учётом долевого вклада общезаводской инфраструктуры (СЭС и BESS) суммарный эффект достигает 610,1 млн сум/год. Экологический результат — сокращение косвенных выбросов CO₂ на ~238 т/год.

Полученные результаты подтверждают техническую обоснованность и экономическую целесообразность предложенного комплекса мероприятий. Расчётная модель может быть уточнена при получении данных АСКУЭ, фактических графиков нагрузки и коммерческих предложений по оборудованию без изменения принятой методики.

Список литературы

1. Закон Республики Узбекистан «Об энергосбережении».
2. Правила устройства электроустановок. Разделы по электроснабжению промышленных предприятий.
3. ISO 50001:2018. Energy management systems — Requirements with guidance for use.
4. Федоров А.А. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебное пособие.
5. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий.
6. Кудрин Б.И. (ред.) Справочник по электроснабжению промышленных предприятий.
7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.
8. Материалы энергоаудита механического участка АО «O'zelektroapparat-Electroshield».
9. Методические указания по расчёту электрических нагрузок промышленных предприятий.
10. Методики расчёта косвенных выбросов CO₂ при снижении потребления электроэнергии.