

УДК:621.592.3

DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_24

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ПУТИ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY AND WAYS TO REDUCE ELECTRICITY LOSSES IN THE ELECTRICAL INDUSTRY OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

©2025

Гаврина Оксана Александровна¹, кандидат технических наук, доцент
кафедры электроснабжения промышленных предприятий

Ключев Роман Владимирович², доктор технических наук, заведующий
кафедрой электроснабжения промышленных предприятий

Ярцев Денис Андреевич³, аспирант кафедры электроснабжения
промышленных предприятий

Гаврин Игорь Александрович⁴, студент кафедры электроснабжения
промышленных предприятий

Gavrina Oksana Aleksandrovna¹, Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises

Klyuev Roman Vladimirovich², Doctor of Technical Sciences, Head
of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises

Yartsev Denis Andreevich³, Postgraduate Student of the Department of Power
Supply of Industrial Enterprises

Gavrin Igor Aleksandrovich⁴, student of the Department of Power Supply of
Industrial Enterprises

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

E-mail: Gavrina_Oksana@yandex.ru

E-mail: kluev-roman@rambler.ru

E-mail: F.gus@bk.ru

E-mail: gavr2354@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9712-9075>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3777-7203>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7288-1291>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4126-8385>

Аннотация: Статья посвящена комплексному анализу энергоэффективности электрохозяйства крупного металлургического предприятия – Никелевого завода. В работе систематизирована информация о структуре энергопотребления, составе основного электрооборудования, включая парк печных трансформаторов и силовых трансформаторов 6/0,4 кВ. Проведено детальное исследование динамики электропотребления за четырехлетний период, выявившее тенденцию к его снижению, преимущественно за счет технологических сегментов. Центральное место в исследовании занимает оценка уровня потерь мощности в низковольтной (0,4 кВ) и высоковольтной (6 кВ) приводных системах. Расчеты проведены для номинального и фактического режимов работы электродвигателей. Установлено, что средний уровень потерь в низковольтном приводе составляет 12,19 %, с максимальными значениями

в плавильном (14,18 %) и обжиговом (13,59 %) цехах. Для высоковольтного асинхронного привода средние потери достигают 9,88 %. Выявлены ключевые проблемы: массовая работа оборудования с низким коэффициентом загрузки, неоптимальный подбор мощности электродвигателей и наличие единиц оборудования с экстремально высокими удельными потерями. На основе проведенного анализа сформулирован комплекс практических рекомендаций по оптимизации энергопотребления, включая внедрение частотно-регулируемых приводов, модернизацию парка электродвигателей, внедрение систем мониторинга и компенсации реактивной мощности, что позволит существенно снизить эксплуатационные расходы и повысить энергоэффективность производства.

Ключевые слова: энергоаудит, энергоэффективность, потери электроэнергии, электропривод, трансформаторное оборудование, коэффициент загрузки, металлургическое предприятие.

Для цитирования: Анализ энергоэффективности и пути снижения потерь электроэнергии в электрохозяйстве металлургического предприятия / О.А. Гаврина, Р.В. Ключев, Д.А. Ярцев, И.А. Гаврин // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 4 (80). – С. 24–36. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_24.

Abstract: This article presents a comprehensive analysis of the energy efficiency of the electrical system at a large metallurgical enterprise, the Nickel Plant. The paper systematizes information on the energy consumption structure and the composition of the main electrical equipment, including the fleet of furnace transformers and 6/0.4 kV power transformers. A detailed study of electricity consumption dynamics over a four-year period revealed a downward trend, primarily due to technological segments. The study focuses on assessing the level of power losses in the low-voltage (0.4 kV) and high-voltage (6 kV) drive systems. Calculations were performed for the nominal and actual operating modes of the electric motors. It was found that the average loss level in the low-voltage drive is 12.19 %, with maximum values in the smelting (14.18 %) and roasting (13.59 %) shops. For the high-voltage asynchronous drive, average losses reach 9.88 %. Key issues were identified: widespread equipment operation with low load factors, suboptimal electric motor power selection, and the presence of equipment with extremely high specific losses. Based on the analysis, a set of practical recommendations for optimizing energy consumption was developed, including the implementation of variable frequency drives, modernization of electric motor fleets, and the implementation of reactive power monitoring and compensation systems. This will significantly reduce operating costs and improve production energy efficiency.

Keywords: energy audit, energy efficiency, energy losses, electric drive, transformer equipment, load factor, metallurgical enterprise.

For citation: Analysis of energy efficiency and ways to reduce electricity losses in the electrical industry of a metallurgical enterprise / O.A. Gavrina, R.V. Klyuev, D.A. Yartsev, I.A. Gavrinn // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 4 (80). – P. 24–36. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_24.

ВВЕДЕНИЕ

Современная мировая металлургическая промышленность характеризуется высокой энергоемкостью производственных процессов. В условиях растущей стоимости энергоресурсов и ужесточения экологических требований задача повышения энергоэффективности становится не просто одним из факторов экономии, а ключевым элементом стратегии конкурентоспособности и устойчивого развития предприятий. Особенно это актуально для цветной металлургии, техно-

логические цепочки которой, такие как производство никеля и кобальта, связаны со значительными затратами электрической энергии на всех переделах — от подготовки сырья до получения готового продукта. Снижение удельных расходов электроэнергии напрямую влияет на себестоимость конечной продукции, что определяет актуальность глубоких и всесторонних исследований в данной области [1, 2].

Энергоэффективность металлургического комплекса зависит от множества факторов, среди которых можно выделить: техниче-

ское состояние и КПД основного и вспомогательного оборудования, оптимальность режимов его эксплуатации, уровень потерь в электрических сетях и системах электропривода, а также эффективность организации управления энергопотоками. Значительный резерв для экономии скрыт именно в системах электропривода, которые являются основными потребителями электроэнергии на любом промышленном предприятии [3, 4]. Неоптимальная загрузка электродвигателей, использование устаревших моделей с низким КПД, отсутствие систем регулирования скорости приводят к существенным непроизводительным потерям мощности, которые могут достигать 15–30 % от потребляемой энергии.

Объектом данного исследования выступает Никелевый завод — ключевое производственное предприятие в составе Заполярного филиала ПАО «ГМК «Норильский никель».

Завод обладает сложным, многоуровневым электрохозяйством, включающим мощные печные трансформаторы для плавильных и обжиговых печей, а также разветвленную сеть трансформаторных подстанций 6/0,4 кВ и тысячи единиц низковольтного и высоковольтного приводного оборудования. Замкнутый технологический цикл предприятия, предполагающий комплексное использование сырья и побочных продуктов, предъявляет высокие требования к надежности и эффективности системы электроснабжения [5, 6].

Целью настоящей работы является комплексный анализ энергоэффективности электрохозяйства Никелевого завода, количественная оценка потерь электроэнергии в системах электропривода и разработка на этой основе практических рекомендаций по снижению энергопотребления и повышению эффективности использования электроэнергии.

Для достижения поставленной цели в ходе исследования решались следующие задачи:

1. Провести обзор структуры предприятия и его электрохозяйства, проанализировать состав и характеристики основного электрооборудования, в частности, парка силовых и печных трансформаторов [7, 8].

2. Исследовать динамику и структуру общего электропотребления предприятия за многолетний период для выявления основных тенденций и потенциала экономии.

3. Выполнить расчет потерь электроэнергии в низковольтной (0,4 кВ) приводной системе по производственным цехам, идентифицировать оборудование с наибольшим уровнем потерь и проанализировать причины их возникновения.

4. Оценить уровень потерь в высоковольтном (6 кВ) приводе, отдельно проанализировав асинхронные и синхронные электродвигатели.

5. На основе проведенного анализа разработать комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на снижение потерь и оптимизацию энергопотребления [9, 10].

Методологической основой исследования послужили методы сравнительного анализа, статистической обработки данных электропотребления, а также расчетные методики определения потерь мощности в электродвигателях в номинальном и фактическом режимах работы с использованием данных инструментальных замеров.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты и сформулированные рекомендации могут быть использованы руководством и инженерно-техническими службами Никелевого завода для планирования и реализации программ энергосбережения, а также адаптированы для применения на других аналогичных предприятиях цветной металлургии [11, 12].

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДПРИЯТИЯ

Никелевый завод — одно из ключевых производственных предприятий в составе Заполярного филиала «Норильский никель». Он специализируется на выпуске никеля и кобальта, а также производит побочную продукцию: хлор и водород.

Основное сырьё, используемое в металлургическом процессе, включает:

- известняк, песчаник и уголь, поставляемые Управлением закладочных технологических и строительных материалов (УЗТСМ);

- никелевый шлак и серную кислоту, поступающие с Медного завода (МЗ);
- фاینштейн от Надеждинского металлургического завода (НМЗ);
- богатые руды с рудников «Комсомольский» и «Таймырский»;
- вкраплённые руды из рудника «Медвежий»;
- металлосодержащие оборотные материалы НМЗ и МЗ.

Производственная структура завода состоит из нескольких технологических цехов:

- агломерационная фабрика (АФ), функционирующая как автономный агломерационный цех (АЦ);
- плавильный цех (ПЦ);
- цех электролиза никеля (ЦЭН);
- хлорно-кобальтовый цех (ХКЦ);
- обжиговой цех (ОЦ).

Агломерационный цех специализируется на подготовке медно-никелевых концентратов к последующей плавке путём их агломерации. Параллельно здесь осуществляется утилизация бедных газов обжига с получением бисульфита натрия.

Плавильный цех выполняет переработку низкосортного сырья и промежуточных металлосодержащих продуктов в фاینштейн — промежуточный сплав, содержащий цветные металлы.

Обжиговой цех обеспечивает разделение фاینштейна на медный и никелевый концентраты, что позволяет выделить целевые металлы для дальнейшей переработки.

Хлорно-кобальтовый цех ориентирован на выпуск кобальтовой продукции, включая металлический кобальт огневого рафинирования и оксид кобальта.

Цех электролиза никеля является завершающим звеном технологической цепочки, где производится конечная продукция — чистый никель электролитный.

Технологическая цепочка предприятия представляет собой замкнутый цикл, где каждый передел выполняет строго определённую функцию. Особенностью производства является комплексное использование сырья — даже отходящие газы и промежуточные продукты находят практическое применение.

Например, бисульфит натрия, получаемый из отходящих газов агломерации, мо-

жет использоваться в химической промышленности или для очистки технологических выбросов [13, 14].

Современные тенденции развития металлургического производства требуют от предприятия постоянного совершенствования технологических процессов. Перспективными направлениями являются: внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами; оптимизация энергопотребления за счёт рекуперации тепла отходящих газов; разработка методов более глубокого извлечения ценных компонентов из сырья; снижение экологической нагрузки через совершенствование газоочистного оборудования.

Эффективность работы всего предприятия в значительной степени зависит от слаженного функционирования всех технологических переделов и оптимальной организации материальных потоков между цехами.

ОСНОВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТП

В рамках проведения энергоаудита Никелевого завода была собрана и систематизирована информация о структуре электрохозяйства предприятия, включая состав основного электрооборудования и распределительных сетей, а также проанализированы данные об электропотреблении за несколько лет.

Энергоснабжение плавильных печей завода обеспечивается парком из 18 специальных печных трансформаторов, основные технические характеристики и места установки которых приведены в табл. 1.

Электроснабжение технологического и вспомогательного оборудования низковольтного напряжения (0,4 кВ) организовано через 64 трансформаторные подстанции, на которых суммарно установлено 127 силовых трансформаторов с номинальным напряжением 6/0,4 кВ.

Анализ структуры электрохозяйства показывает, что предприятие обладает разветвленной и многоуровневой системой электроснабжения. Наличие трансформаторов различной мощности и классов напряжения свидетельствует о сложном технологическом процессе, требующем разных уровней энергоснабжения [15, 16].

Характеристики печных трансформаторов

Table 1

Characteristics of furnace transformers

№ п/п	Тип трансформатора	Мощность, МВА	Напряжение, кВ	Место установки	
				№ КПП	№ печи
Плавильный цех (ПЦ)					
1-9	TTVU-640-0	25	35/0,2-0,8	№1-№3	РТП-3, РТП-4, РТП-5
Обжиговой цех (ОЦ)					
1-5	ЭТЦПК-12500/10	12,5	6/0,2-0,5	№1-№4, КПП РНБ-5	РНБ-1 - РНБ-5
6	ЭТЦНК-20000/35	20	35/0,2-0,5	КПП ОКБ-892	ОКБ-892
Хлорно-кобальтовый цех (ХКЦ)					
1-3	ЭПТМ-1000	1,0	0,38/0,036	№1-№3	Грамолина-1 - Грамолина-3

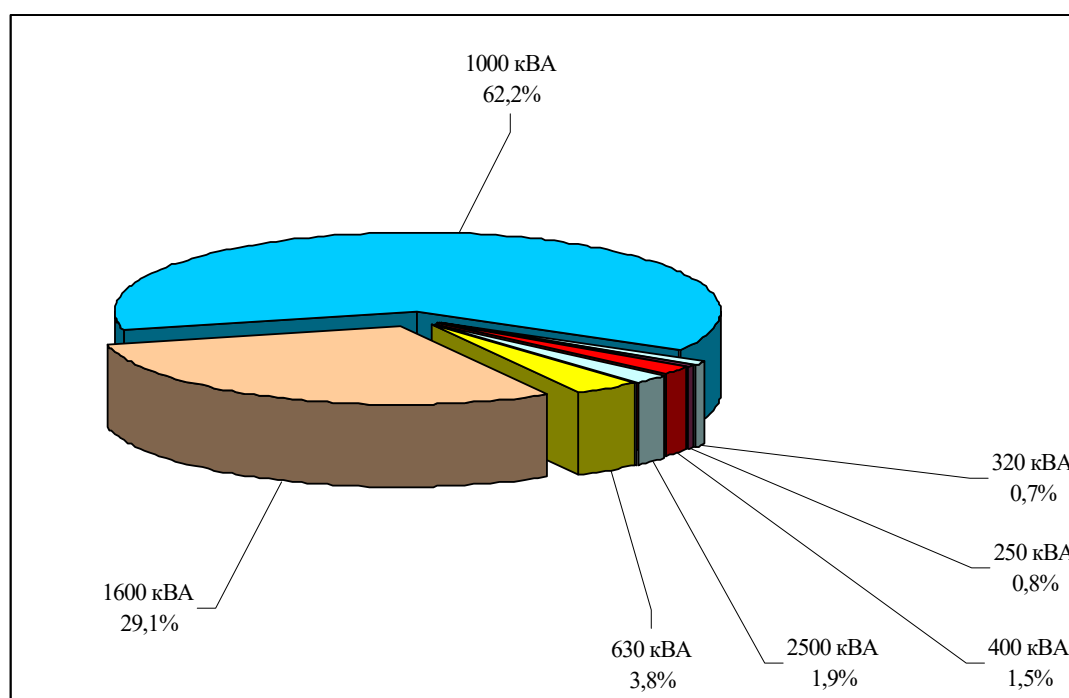


Рис. 1. Анализ распределения трансформаторов 10(6) кВ по диапазонам их номинальной мощности

Fig. 1. Analysis of the distribution of 10(6) kV transformers by their rated power ranges

Для повышения энергоэффективности системы электроснабжения рекомендуется:

- провести детальный анализ нагрузочных характеристик трансформаторов для выявления возможностей оптимизации их работы;
- рассмотреть вопрос внедрения системы компенсации реактивной мощности;

– разработать программу поэтапной замены устаревшего трансформаторного оборудования на более энергоэффективные модели;

– внедрить систему мониторинга и управления нагрузками для выравнивания суточного графика электропотребления.

Особое внимание следует уделить транс-

форматорам плавильного цеха как наибольшим потребителям электроэнергии, где даже незначительное повышение КПД может дать существенный экономический эффект.

На рис. 1 представлен анализ распределения трансформаторов 10(6) кВ по диапазонам их номинальной мощности.

Анализ данных (рис. 1) показывает, что трансформаторы мощностью 1000 кВА составляют основу электрохозяйства предприятия – их совокупная доля в общем парке оборудования превышает 62 %.

Такая концентрация оборудования одного типа имеет как преимущества, так и риски. К преимуществам можно отнести: унификацию запасных частей и технического обслуживания; снижение затрат на обучение персонала; упрощение системы мониторинга и диагностики.

Однако существует и значительный риск – высокая зависимость от одного типа оборудования может привести к системным

проблемам при выявлении конструктивных недостатков или дефиците запчастей.

Для оптимизации структуры трансформаторного парка рекомендуется: провести анализ нагрузки трансформаторов 1000 кВА для выявления возможностей замены части из них на менее мощные модели в слабонагруженных узлах; разработать программу постепенной диверсификации парка с внедрением трансформаторов мощностью 630 кВА и 1600 кВА в соответствующих точках сети; внедрить систему мониторинга технического состояния доминирующей группы трансформаторов для прогнозирования их остаточного ресурса.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

На рис. 2 представлен анализ изменения объемов электропотребления предприятием на протяжении четырехлетнего периода.

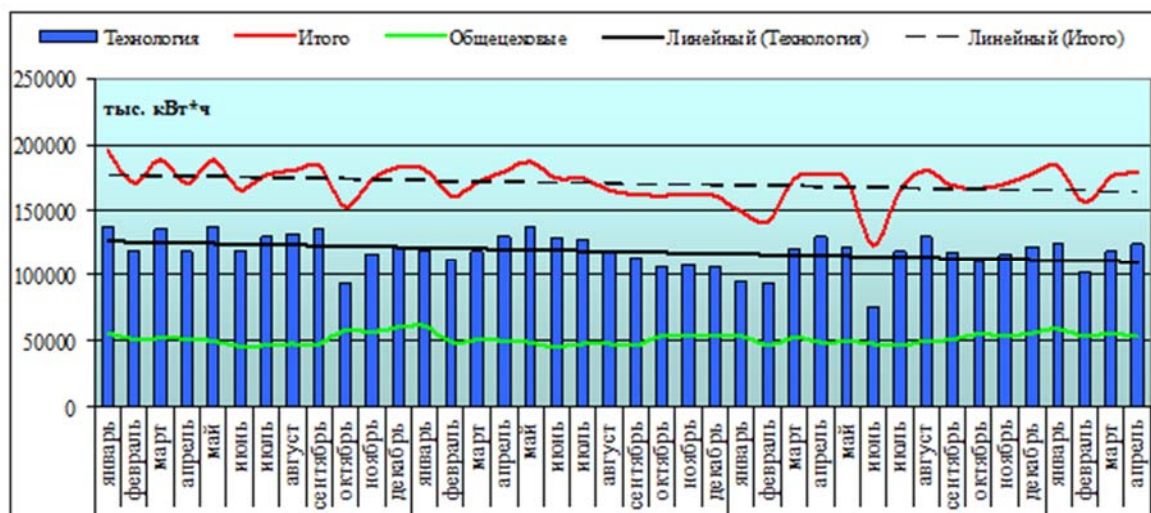


Рис. 2. Анализ изменения объемов электропотребления предприятием на протяжении четырехлетнего периода

Fig. 2. Analysis of changes in the volume of electricity consumption by an enterprise over a four-year period

Анализ графиков электропотребления (рис. 2) демонстрирует относительно стабильный характер нагрузки предприятия с небольшой тенденцией к снижению. Основной вклад в общее уменьшение потребления электроэнергии вносит сокращение технологических расходов. Расчет среднемесяч-

ных показателей за четырёхлетний период выявил следующую структуру затрат:

- на технологические нужды – 119,1 млн кВт·ч;
- на общепроизводственные и общезаводские нужды – 51,4 млн кВт·ч;

- общее потребление по предприятию – 170,5 млн кВт·ч.

Наблюдаемое снижение технологического энергопотребления, вероятно, связано с поэтапным внедрением энергосберегающих мероприятий и оптимизацией производственных процессов. Однако для более точного выявления причин данной динамики необходим детальный поцеховой анализ.

Для дальнейшего повышения энергоэффективности рекомендуется: внедрение системы детального мониторинга энергопотребления по основным переделам производства; разработка и реализация целевой программы по снижению общезаводских расходов, которые составляют значительную долю (около 30 %) в общем балансе; проведение технического аудита крупных энергопотребляющих установок для выявления резервов экономии; изучение возможности рекуперации вторичных энергетических ресурсов технологических процессов [17, 18].

Стабильность общего графика нагрузки является положительным фактором для энергосистемы, но требует оптимизации внутривидового распределения для снижения себестоимости продукции.

УРОВЕНЬ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ПРИВОДНОЙ СИСТЕМЕ 0,4 КВ

Для определения объемов непроизводительных затрат электроэнергии в системе электропривода предприятия был выполнен расчёт потерь для электродвигателей в двух режимах: номинальном и фактическом (текущем). Поскольку данные о реальном коэффициенте полезного действия (КПД) приводов отсутствовали, в основу расчётов были положены следующие допущения:

1. Режим эксплуатации электроприводов в момент проведения замеров принимается за типовой (нормальный) режим работы, который сохраняется неизменным на протяжении всего года.

2. Значение КПД для всех анализируемых приводов принято постоянным и составляющим 90 %.

Полученные результаты позволяют оце-

нить потенциал энергосбережения за счёт оптимизации работы электропривода. Снижение потерь может быть достигнуто за счёт:

- внедрения частотно-регулируемых приводов для работы оборудования в оптимальных режимах;
- замены устаревших электродвигателей на современные энергоэффективные модели;
- регулярного проведения технического обслуживания и контроля качества электроэнергии.

Для более точной оценки необходимо в дальнейшем уточнить реальные значения КПД приводов при различных нагрузках, а также провести детальный анализ графиков работы оборудования в течение года.

В качестве примера рассчитаем потери электроэнергии для двигателя транспортера 21 СТ ($P_n = 200$ кВт) в плавильном цехе для номинального и фактического режимов работы.

Расчет номинальных потерь:

$$\Delta P_n = \frac{(1-\eta)}{\eta} \cdot P_n, \quad (1)$$

$$\Delta P_n = \frac{(1-0,92)}{0,92} \cdot 200 = 17,39 \text{ кВт},$$

где $\eta = 0,92$ – коэффициент полезного действия двигателя.

Расчет текущих потерь:

$$\Delta P_{\text{тек}} = 0,35 \cdot \Delta P_n + k_z \cdot 0,65 \cdot \Delta P_n, \quad (2)$$

$$\Delta P_{\text{тек}} = 7,51 \text{ кВт},$$

где $k_z = 0,21$ – коэффициент загрузки двигателя.

Проведенный расчет наглядно демонстрирует значительную разницу между номинальными и фактическими потерями электроэнергии. Текущие потери составляют всего 43 % от номинальных, что напрямую связано с низким коэффициентом загрузки двигателя (21 %). Данная ситуация свидетельствует о неоптимальном выборе мощности электродвигателя для конкретно-

го технологического процесса.

Анализ расчетных данных по потерям электроэнергии в низковольтном приводе 0,4 кВ выявил следующую картину по производственным цехам.

Средний уровень потерь по предприятию составил 12,19 %. Наибольшие потери наблюдаются в плавильном цехе (14,18 %) и обжиговом цехе (13,59 %), что объясняется высокой концентрацией транспортерного и насосного оборудования с низкими коэффициентами загрузки. В хлорно-кобальтовом цехе потери составляют 13,86 %, при этом выявлены отдельные единицы оборудования с экстремально высокими удельными потерями, такие как вентилятор АР-3 (73,43 %) и насос Н-7-1 (133,94 %), работающие в режиме значительной недогрузки.

Наименьшие потери зафиксированы в цехе электролиза никеля (10,43 %) и агломерационном цехе (12,74 %), что свидетельствует о более оптимальном подборе и использовании электродвигателей.

Критические проблемы, выявленные в ходе анализа:

1. Многочисленные случаи работы оборудования с низким коэффициентом загрузки, приводящие к повышенным относительным потерям (например, дробилки № 6 и № 7 в агломерационном цехе с потерями 65–74 %).

2. Значительная доля потерь в транспортерном оборудовании, особенно в плавильном и обжиговом цехах, где отдельные транспортеры демонстрируют уровень потерь 25–60 %.

3. Наличие оборудования с экстремально высокими удельными потерями, требующего немедленного вмешательства.

Для повышения энергоэффективности рекомендуется:

- провести детальный анализ рабочего цикла транспортера для обоснования возможности установки двигателя меньшей мощности;

- рассмотреть вопрос внедрения частотно-регулируемого привода, который позволит точно согласовать скорость движения транспортера с технологической необходимостью и дополнительно снизить потери;

- организовать регулярный мониторинг коэффициента загрузки для всего насосного

и вентиляторного оборудования предприятия;

- разработать методику оптимального подбора электродвигателей с учетом реальных, а не паспортных нагрузок.

Эти мероприятия позволят не только снизить эксплуатационные расходы, но и продлить срок службы электрооборудования за счет работы в оптимальном режиме [19, 20].

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРИВОДЕ НА НАПРЯЖЕНИИ 6 КВ

На предприятии эксплуатируются электродвигатели двух основных типов: асинхронные и синхронные. Расчет потерь электроэнергии для асинхронных двигателей напряжением 6 кВ выполнен по методике, аналогичной используемой для низковольтных двигателей 0,4 кВ.

Анализ расчетных данных показывает следующее распределение потерь:

- средний уровень потерь в высоковольтном асинхронном приводе по предприятию составляет 9,88 %. Наибольшие потери наблюдаются в обжиговом цехе (12,60 %), где отдельные дымососы демонстрируют исключительно высокие показатели – до 30,17 %, что свидетельствует о недогрузке оборудования;

- в агломерационном цехе зафиксирован средний уровень потерь 9,88 %, однако здесь выявлены проблемные единицы оборудования, такие как транспортер А-14 с потерями 30,97 % и конвейер СВ-7 с показателем 20,12 %. При этом мощное насосное и вентиляторное оборудование показывает относительно хорошие результаты (8,14–8,96 %);

- плавильный цех демонстрирует один из лучших показателей – 9,61 %, за исключением вентилятора № 8В с потерями 16,86 %. Цех электролиза никеля имеет наименьший уровень потерь среди всех подразделений – 8,66 %.

Ключевые проблемы:

- критическая недогрузка дымососов в обжиговом цехе;

- неоптимальная работа отдельных транспортеров в агломерационном цехе;

• значительный разброс показателей внутри цехов.

Общий резерв снижения потерь оценивается в 1,5–2 процентных пункта, что может обеспечить существенную экономию электроэнергии.

Потери мощности в электродвигателе при установившейся работе определяются как сумма двух составляющих:

$$\Delta P = K + V(\Delta P_1), \quad (3)$$

где K – это постоянные потери, величина которых не зависит от нагрузки двигателя;

$V(\Delta P_1)$ – переменные потери, возникающие в обмотках.

Расчёт номинальных потерь выполняется по формуле (1).

Переменные потери при номинальной нагрузке определяются по выражению:

$$V_{\text{ном}} \left(\Delta P_{\text{ном}} \right) = 3 \cdot I_{\text{ном}}^2 \cdot R^2, \quad (4)$$

где $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток статора;

R – активное сопротивление обмотки статора.

Постоянные потери могут быть найдены из выражения:

$$K = \Delta P_{\text{ном}} - V_{\text{ном}}. \quad (5)$$

Текущие переменные потери, определяемые на основе инструментальных измерений тока статора (I_T), рассчитываются по формуле:

$$V_T = \Delta P_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{I_T}{I_{\text{ном}}} \right)^2. \quad (6)$$

Суммарные текущие потери в двигателе определяются как:

$$\Delta P_T = K + V_T. \quad (7)$$

Согласно данным расчетов, средняя величина потерь электроэнергии в синхронных электродвигателях 6 кВ достигает

5,44 % от общего объема потребления. При годовом электропотреблении асинхронного привода 6 кВ в 2007 году в размере 247061,2 тыс. кВт·ч абсолютные потери за год составили 13440 тыс. кВт·ч.

Анализ структуры потерь по производственным цехам.

Наибольшие потери наблюдаются в агломерационном цехе – 6,59 %, где особенно выделяются вентиляторы СДВ-16-51-12 с потерями 10,25–11,34 %, что свидетельствует о работе в режиме значительной недогрузки. Обжиговой цех демонстрирует схожий показатель – 6,10 %, при этом все вентиляторные установки имеют потери в диапазоне 5,65–6,93 %. Плавильный цех характеризуется наиболее эффективной работой синхронного привода с минимальными потерями – 3,49 %, где нагнетатели СТД показывают относительно низкие значения потерь (2,48–4,22 %).

Ключевые проблемы: критическая недогрузка вентиляторов СДВ-16-51-12 в агломерационном цехе; стабильно высокий уровень потерь в вентиляторном оборудовании обжигового цеха; значительный разброс показателей эффективности внутри цехов.

Рекомендации:

1. Приоритетная оптимизация работы вентиляторного оборудования в агломерационном и обжиговом цехах.

2. Внедрение системы адаптивного управления производительностью вентиляторов.

3. Разработка программы модернизации наименее эффективных двигателей.

4. Внедрение системы постоянного мониторинга коэффициента загрузки.

Снижение потерь в синхронном приводе до 4,5 % позволит сэкономить около 2 500 тыс. кВт·ч электроэнергии ежегодно.

ВЫВОДЫ

Проведенное комплексное исследование энергоэффективности электрохозяйства Никелевого завода позволило сформулировать следующие выводы:

1. Предприятие обладает сложным, разветвленным и многоуровневым электрохозяйством, характеризующимся высокой концентрацией трансформаторов одного типа (1000 кВА), что создает риски системных сбоев, но также открывает возможности для унификации обслуживания.

2. Анализ электропотребления за четырехлетний период демонстрирует положительную тенденцию к его снижению при сохранении стабильного графика нагрузки. Однако значительная доля общезаводских расходов (около 30 %) указывает на наличие резервов для дальнейшей оптимизации.

3. Ключевой проблемой энергоэффективности являются значительные потери в системах электропривода. Установлено, что средний уровень потерь в низковольтном приводе (0,4 кВ) составляет 12,19 %, при этом в отдельных цехах (плавильный, обжиговой, хлорно-кобальтовый) этот показатель превышает 13,5 %. Наибольший вклад вносят транспортное, насосное и вентиляционное оборудование, работающее с низким коэффициентом загрузки (часто ниже 30 %).

4. В высоковольтном асинхронном приводе (6 кВ) средние потери достигают 9,88 %, с максимальными значениями в обжиговом цехе (12,60 %). Синхронный привод демонстрирует лучшую эффективность (средние потери 5,44 %), однако и здесь выявлены проблемные зоны, такие как вентиляторы в агломерационном цехе с потерями более 10 %.

5. Основными причинами высоких потерь являются неоптимальный подбор мощности электродвигателей под реальную технологическую нагрузку, отсутствие систем регулирования скорости (частотно-регулируемых приводов) и работа значительной части оборудования в режиме хронической недогрузки.

На основе выявленных проблем разработан комплекс рекомендаций, реализация которых позволит существенно повысить энергоэффективность предприятия. К ним относятся: внедрение частотно-регулируемых приводов для насосов, вентиляторов и транспортеров; оптимизация

структуры трансформаторного парка и внедрение компенсации реактивной мощности; разработка программы поэтапной замены устаревших электродвигателей на энергоэффективные модели; создание системы детального мониторинга энергопотребления и коэффициента загрузки ключевого оборудования. Реализация предложенных мер позволит не только снизить эксплуатационные расходы на электроэнергию на сотни тысяч киловатт-часов ежегодно, но и повысить надежность работы электрооборудования и снизить экологическую нагрузку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров В.Л., Кузнецов Н.М., Морозов И.Н. Моделирование электропотребления обогатительной фабрики. DOI 10.17580/gzh.2022.02.11 // Горный журнал. 2022. № 2. С. 72-76.
2. Моргоева А.Д., Ключев Р.В., Ляшенко В.И. Прогнозирование нагрузки на электросеть как способ эффективного управления потреблением электрической энергии. DOI 10.53015/18159958_2021_4_39 // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2021. № 4 (66). С. 39-51.
3. Разработка метода решения задач системного анализа в природно-промышленной системе / А.А. Соколов, А.Ю. Аликов, И.И. Босиков, Ю.С. Петров // Перспективы науки. 2010. № 4 (6). С. 83-85.
4. Жуковский Ю.Л., Сусликов П.К. Оценка потенциального эффекта применения технологии управления спросом на горных предприятиях. DOI 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908 // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16, № 3. С. 895-908.
5. Капанский А.А. Методы решения задач оценки и прогнозирования энергетической эффективности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11, № 2 (42). С. 103-115.

6. Wang Y., Zhang N., Chen X. A short-term residential load forecasting model based on lstm recurrent neural network considering weather features. DOI 10.3390/en14102737 // Energies. 2021. Vol. 14. article 2737.
7. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform / Y. Zhukovskiy, D. Batueva, A. Buldysko, M. Shabalov. DOI 10.1088/1742-6596/1333/6/062033 // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1333 (6).
8. Sokolov A.A., Fomenko O.A., Ignatev I.V. Development of algorithms for control and control of electric power parameters based on information-measuring system data. DOI 10.1088/1742-6596/2176/1/012076 // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2176, № 1. P. 012076.
9. Mathematical logic model for analysing the controllability of mining equipment / P.V. Shishkin, B.V. Malozyomov, N.V. Martyushev [et al.]. DOI 10.3390/math12111660 // Mathematics. 2024. Vol. 12, № 11. P. 1660.
10. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks / B.V. Malozyomov, N.V. Martyushev, S.N. Sorokova [et al.]. DOI 10.3390/math12030480 // Mathematics. 2024. Vol. 12, № 3. P. 480.
11. Oprea S.V. Bara A., Ifrim G. Flattening the electricity consumption peak and reducing the electricity payment for residential consumers in the context of smart grid by means of shifting optimization algorithm. DOI 10.1016/j.cie.2018.05.053 // Computers & Industrial Engineering. 2018. Vol. 122. P. 125-139.
12. An adaptive methodology based on predictive deep learning and context aware clustering for electricity power usage mining and optimization at different granularity levels / P.D. Patil, R. Patil, P. Ahire [et al.]. DOI 10.1016/j.prime.2024.100628 // e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. 2024. Vol. 8. P. 100628.
13. Albuquerque P.C., Cajueiro D.O., Rossi M.D.C. Machine learning models for forecasting power electricity consumption using a high dimensional dataset. DOI 10.1016/J.ESWA.2021.115917 // Expert Syst Appl. 2022. Vol. 187. article 115917.
14. Balovtsev S.V., Merkulova A.M. Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises. DOI 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170 // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2024. № 3. P. 170-181.
15. Short- and medium-term power demand forecasting with multiple factors based on multi-model fusion / Q. Ji, S. Zhang, Q. Duan [et al.]. DOI 10.3390/math10122148 // Mathematics. 2022. Vol. 10. article 2148.
16. Zhou C., Chen X. China's energy consumption: Combining machine learning with three-layer decomposition approach. DOI 10.1016/j.egy.2021.08.103 // Predicting Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 5086-5099.
17. Gagnon Ph., Hayashi Y. Theoretical properties of Bayesian Student-t linear regression.. DOI 10.1016/j.spl.2022.109693 // Statistics & Probability Letters. 2022. Vol. 193. article 109693.
18. An Improved residential electricity load forecasting using a machine-learning-based feature selection approach and a proposed integration strategy / A. Yousaf, R.M. Asif, M. Shakir [et al.]. DOI 10.3390/su13116199 // Sustainability. 2021. Vol. 13. article 6199.
19. Hamed M.M., Ali H., Abdelal Q. Forecasting annual electric power consumption using a random parameters model with heterogeneity in means and variances. DOI 10.1016/j.energy.2022.124510 // Energy. 2022. Vol. 255. article 124510.
20. Kante M., Li Y., Deng S. Scenarios Analysis on Electric Power Planning Based on Multi-Scale Forecast: A Case Study of Taoussa. DOI 10.3390/en14248515 // Mali

from 2020 to 2035. *Energies*. 2021. Vol. 14. article 8515.

REFERENCES

1. Petrov V.L., Kuznetsov N.M., Morozov I.N. Modeling power use at processing plant. DOI 10.17580/gzh.2022.02.11 // *Gornyi Zhurnal*. 2022. № 2. P. 72-76.
2. Forecasting the load on the power grid as a way to effectively manage the consumption of electrical energy / A.D. Morgoeva, I.D. Morgoev, R.V. Klyuev, V.I. Lyashenko. DOI 10.53015/18159958_2021_4_39 // *News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region*. 2021. № 4 (66). P. 39-51.
3. Development of the technique for system analysis problem-solving in physical industrial system / A.A. Sokolov, A.Yu. Alikov, I.I. Bosikov, Yu.S. Petrov // *Science prospects*. 2010. № 4 (6). P. 83-85.
4. Zhukovskiy Yu.L., Suslikov P.K. Assessment of the potential effect of applying demand management technology at mining enterprises. DOI 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908 // *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024. Vol. 16, № 3. P. 895-908.
5. Kapansky A.A. Methods for solving the problems of evaluation and forecasting energy efficiency // *Kazan state power engineering university bulletin*. 2019. Vol. 11, № 2 (42). P. 103-115.
6. Wang Y., Zhang N., Chen X. A short-term residential load forecasting model based on lstm recurrent neural network considering weather features. DOI 10.3390/en14102737 // *Energies*. 2021. Vol. 14. article 2737.
7. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform / Y. Zhukovskiy, D. Batueva, A. Buldysko, M. Shabalov. DOI 10.1088/1742-6596/1333/6/062033 // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1333 (6).
8. Sokolov A.A., Fomenko O.A., Ignatev I.V. Development of algorithms for control and control of electric power parameters based on information-measuring system data. DOI 10.1088/1742-6596/2176/1/012076 // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2176, № 1. P. 012076.
9. Mathematical logic model for analysing the controllability of mining equipment / P.V. Shishkin, B.V. Malozyomov, N.V. Martyshev [et al.]. DOI 10.3390/math12111660 // *Mathematics*. 2024. Vol. 12, № 11. P. 1660.
10. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks / B.V. Malozyomov, N.V. Martyshev, S.N. Sorokova [et al.]. DOI 10.3390/math12030480 // *Mathematics*. 2024. Vol. 12, № 3. P. 480.
11. Oprea S.V. Bara A., Ifrim G. Flattening the electricity consumption peak and reducing the electricity payment for residential consumers in the context of smart grid by means of shifting optimization algorithm. DOI 10.1016/j.cie.2018.05.053 // *Computers & Industrial Engineering*. 2018. Vol. 122. P. 125-139.
12. An adaptive methodology based on predictive deep learning and context aware clustering for electricity power usage mining and optimization at different granularity levels / P.D. Patil, R. Patil, P. Ahire [et al.]. DOI 10.1016/j.prime.2024.100628 // *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2024. Vol. 8. P. 100628.
13. Albuquerque P.C., Cajueiro D.O., Rossi M.D.C. Machine learning models for forecasting power electricity consumption using a high dimensional dataset. DOI 10.1016/J.ESWA.2021.115917 // *Expert Syst Appl*. 2022. Vol. 187. article 115917.
14. Balovtsev S.V., Merkulova A.M. Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises. DOI 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170 // *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2024. № 3. P. 170-181.
15. Short- and medium-term power demand forecasting with multiple factors based on multi-model fusion / Q. Ji, S. Zhang, Q. Duan [et al.]. DOI 10.3390/math10122148

- // Mathematics. 2022. Vol. 10. article 2148.
16. Zhou C., Chen X. China's energy consumption: Combining machine learning with three-layer decomposition approach. DOI 10.1016/j.egy.2021.08.103 // Predicting Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 5086-5099.
 17. Gagnon Ph., Hayashi Y. Theoretical properties of Bayesian Student-t linear regression.. DOI 10.1016/j.spl.2022.109693 // Statistics & Probability Letters. 2022. Vol. 193. article 109693.
 18. An Improved residential electricity load forecasting using a machine-learning-based feature selection approach and a proposed integration strategy / A. Yousaf, R.M. Asif, M. Shakir [et al.]. DOI 10.3390/su13116199 // Sustainability. 2021. Vol. 13. article 6199.
 19. Hamed M.M., Ali H., Abdelal Q. Forecasting annual electric power consumption using a random parameters model with heterogeneity in means and variances. DOI 10.1016/j.energy.2022.124510 // Energy. 2022. Vol. 255. article 124510.
 20. Kante M., Li Y., Deng S. Scenarios Analysis on Electric Power Planning Based on Multi-Scale Forecast: A Case Study of Taoussa. DOI 10.3390/en14248515 // Energies. 2021. Vol. 14. article 8515.