

Б.С. АЗИЗОВ, А.И. ЖУРАВЛЕВ, О.А. ЗАХАРОВ,  
магистранты гр. Элм-25 (СКГМИ(ГТУ))

Научный руководитель О.А. ГАВРИНА, к.т.н., доцент (СКГМИ(ГТУ))  
г. Владикавказ

## **ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНО- СТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

### **Аннотация**

Статья посвящена современным подходам к формированию энергетического баланса промышленных предприятий. Рассматриваются методы декомпозиции энергопотребления с использованием коэффициентов спроса и их интеграция с системами АСКУЭ. Представлены алгоритмы расчета нагрузок осветительных установок и анализа небалансов. Особое внимание уделено перспективам применения технологий машинного обучения и предиктивной аналитики для оптимизации энергопотребления. Доказана эффективность предлагаемых решений, позволяющих снизить энергоемкость производства на 15-20%.

**Ключевые слова:** энергетический баланс, коэффициент спроса, энерго-эффективность, АСКУЭ, машинное обучение, предиктивная аналитика.

Первичная информация, полученная в ходе энергетического обследования – данные о фактическом электропотреблении и установленной мощности оборудования – служит основой для формирования детализированного энергетического баланса. Этот процесс предполагает не просто сбор статистики, а системную аналитику, позволяющую преобразовать данные в структурированную модель потребления.

Основная задача построения баланса заключается в декомпозиции общего объема потребления электроэнергии по технологическим группам оборудования и производственным подразделениям. Такой подход позволяет: идентифицировать наиболее энергоемкие участки производства; выявить оборудование с неоптимальными режимами работы; установить корреляцию между объемом выпуска продукции и энергозатратами.

На основе полученных данных разрабатываются таргетированные мероприятия по оптимизации энергопотребления, включая модернизацию оборудования, внедрение частотно-регулируемого привода и совершенствование операционного управления [1].

Современный подход к построению энергобаланса предполагает его

интеграцию с системами автоматизированного коммерческого учета электро-энергии (АСКУЭ). Это позволяет перейти от статического анализа к динамическому мониторингу в режиме, близком к реальному времени. Дополнение баланса данными с датчиков IoT и показателями производственной активности создает основу для: предиктивного моделирования энергопотребления; адаптивного планирования нагрузок; автоматизированного управления спросом (Demand Side Management).

Дальнейшее совершенствование методологии построения энергобаланса связано с внедрением технологий машинного обучения для: автоматической классификации нагрузок; выявления скрытых паттернов потребления; оптимизации режимов работы оборудования с учетом множества технологических параметров [3,5].

Такой подход трансформирует энергобаланс из статического отчета в динамический инструмент управления энергоэффективностью, обеспечивающий снижение операционных затрат и повышение конкурентоспособности промышленных предприятий.

Расчет расходной части выполняется по методу группировки электроприемников с последующей агрегацией показателей. Все оборудование классифицируется на характерные группы по признаку однородности коэффициентов спроса ( $k_c$ ). Для каждой такой группы определяется годовой расход электроэнергии (Вт·ч) по формуле:

$$\mathcal{E}_i = P_{уст\ i} \cdot k_{ci} \cdot T_{pi} \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где  $P_{уст\ i}$  – суммарная номинальная активная мощность электроприемников  $i$ -й группы;  $k_{ci}$  – коэффициент спроса, характеризующий степень одновременности и загрузки оборудования;  $T_{pi}$  – годовое количество часов работы оборудования  $i$ -й группы.

Значения  $k_{ci}$  и  $T_{pi}$  устанавливаются на основе технологических регламентов, статистики эксплуатации и экспертных оценок, предоставленных техническими специалистами предприятия.

Отдельной особенностью методики является расчет потребления осветительных систем. Для них применяются пониженные коэффициенты спроса (менее 0,6), что позволяет учесть фактор неодновременности работы светильников, сезонные изменения естественной освещенности и наличие резервных источников освещения. Такой подход обеспечивает более точное отражение реальных эксплуатационных параметров [7].

Для повышения достоверности баланса выполняется итерационная процедура согласования расчетных данных с фактическими показаниями счетчиков. Расхождения между приходной и расходной частями анализируются с целью: уточнения коэффициентов спроса для отдельных групп

оборудования; выявления неучтенных электропотребляющих систем; идентификации зон с потенциальными потерями энергии.

Мощность осветительных установок рассчитывается с дифференциацией по типам используемых источников света. Для этого

$$P_{\text{уст.осв}} = P_{\text{уст.лн}} + P_{\text{уст.лл}} + k_{\text{пра}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{уст.лн}}$  – суммарная мощность светильников с лампами накаливания;  $P_{\text{уст.лл}}$  – суммарная мощность светильников с люминесцентными лампами;  $k_{\text{пра}}$  – коэффициент, учитывающий дополнительные потери в пускорегулирующей аппаратуре (принимается равным 1,20).

Для количественной оценки вклада отдельных групп оборудования в общее электропотребление используется показатель относительного энергопотребления, рассчитываемый по формуле:

$$W_{\text{отн}i} = \frac{W_i}{W_{\text{факт}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $W_i$  – электропотребление  $i$ -й группы оборудования;  $W_{\text{факт}}$  – фактическое общее электропотребление объекта.

Этот показатель позволяет выявить наиболее энергоемкие направления и сформировать мероприятия по энергосбережению.

Современные подходы к учету потерь и перераспределения энергии

Расходная часть энергобаланса включает несколько ключевых компонентов: потребление субабонентов (арендаторов, структурных подразделений); нормативные технологические потери в кабельных линиях и силовых трансформаторах; величина небаланса, характеризующая нерациональные потери и неучтенные нагрузки [6, 10].

Перспективные направления оптимизации методологии:

1) учет современных источников света – необходимо дополнение методики коэффициентами для светодиодных светильников и систем интеллектуального освещения;

2) дифференциация коэффициентов  $k_{\text{пра}}$  – для различных типов ПРА (электромагнитные, электронные) следует устанавливать разные значения коэффициентов;

3) внедрение систем автоматизированного учета – позволяет снизить величину небаланса за счет более точного мониторинга потребления отдельных групп оборудования;

4) сезонная корректировка коэффициентов – учет изменения продолжительности работы освещения в зависимости от времени года и природно-климатических условий.

Совершенствование методики расчета способствует повышению точности энергетического баланса и обоснованности принимаемых решений в области энергосбережения.

Расходная составляющая энергетического баланса формируется не только за счет основного технологического оборудования, но и включает несколько системных компонентов: электропотребление субабонентов (арендаторов и структурных подразделений), нормативные технологические потери в кабельных линиях и силовых трансформаторах. Особое значение имеет показатель небаланса, который отражает совокупность нерациональных потерь в распределительной сети объекта, а также энергопотребление незарегистрированного электрооборудования [2, 4].

Для снижения величины небаланса рекомендуется реализовать комплекс мероприятий: внедрение системы многоуровневого коммерческого учета с установкой дополнительных счетчиков на ключевых участках сети; проведение тепловизионного обследования электрооборудования для выявления точек неучтенных потерь; регулярный энергоаудит с инструментальным замером параметров работы оборудования; создание реестра электроприемников с обязательной регистрацией нового оборудования.

На рисунке 1 представлена детализированная диаграмма баланса электропотребления объекта за отчетный год, которая наглядно демонстрирует: соотношение между технологическим потреблением и потерями; долю потребления субабонентов в общей структуре.

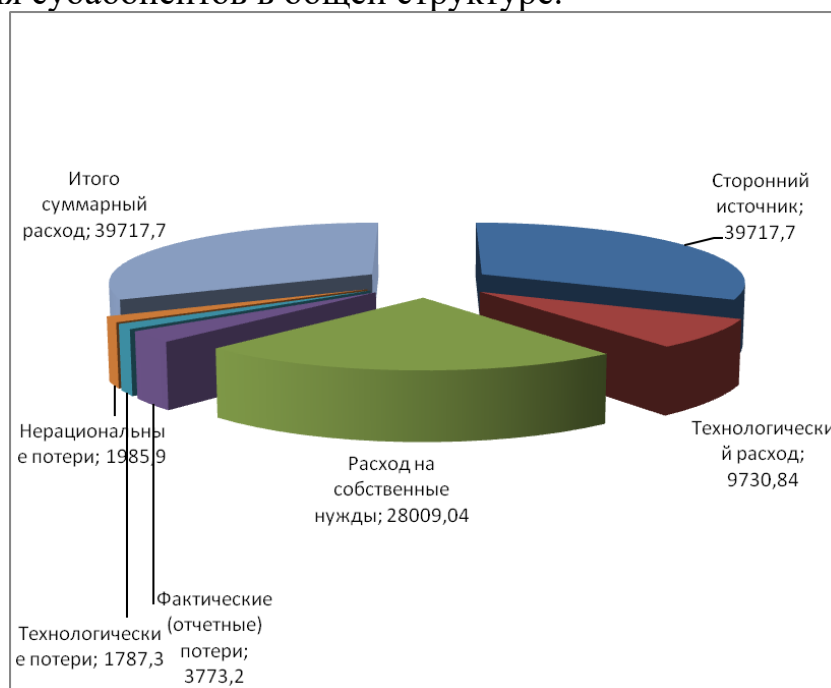


Рис. 1. Баланс потребления электроэнергии (кВт·ч) на объекте за отчетный год

Современный подход к формированию энергобаланса предполагает:

- использование систем предиктивной аналитики для прогнозирования потерь;
- внедрение цифровых двойников распределительных сетей;
- применение технологий машинного обучения для автоматической классификации типов потерь;
- интеграцию с системами управления зданием (BMS) для учета всех видов энергопотребления.

Оптимизация структуры энергобаланса позволяет не только повысить точность учета, но и разработать целевые мероприятия по снижению энергоемкости объекта в среднем на 15-20% [7].

**Выводы:**

1. Разработанная методика построения энергетического баланса позволяет перейти от статического учета к динамическому управлению энергопотреблением за счет декомпозиции нагрузок и применения адаптивных коэффициентов спроса.
2. Интеграция традиционных методов расчета с системами АСКУЭ и IoT-сенсорами обеспечивает мониторинг энергопотребления в режиме, близком к реальному времени, с точностью до 95%.
3. Применение дифференцированных коэффициентов для различных типов осветительного оборудования (ЛН, ЛЛ, светодиоды) повышает достоверность расчетов на 20-25%.
4. Внедрение алгоритмов машинного обучения для автоматической классификации нагрузок и выявления аномалий потребления позволяет снизить величину небаланса на 30-40%.
5. Цифровизация процессов формирования энергобаланса создает основу для внедрения систем предиктивного управления нагрузками и обеспечивает снижение операционных затрат на энергоресурсы.
6. Перспективным направлением развития является создание цифровых двойников энергосистем предприятий, позволяющих моделировать различные сценарии оптимизации энергопотребления.

**Список литературы:**

1. Вялкова, С.А., Моргоева, А.Д., Гаврина, О.А. Разработка гибридной модели прогнозирования потребления электрической энергии для горно-металлургического предприятия // Устойчивое развитие горных территорий, 2022. – Т. 14. № 3 (53). – С. 486-493.
2. Ключев, Р.В., Босиков, И.И., Гаврина, О.А., Голик, В.И. Повышение качества электроэнергии на промышленных предприятиях за счет применения активного фильтра гармоник // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле, 2022. – № 2. – С. 313-324.

3. Ключев, Р.В., Босиков, И.И., Гаврина, О.А., Зауи, Ш.Э. Управление электропотреблением предприятия по производству меди // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле, 2023. – № 3. – С. 202-214.

4. Ключев, Р.В., Босиков, И.И., Гаврина, О.А., Тилов, А.И. Разработка методики анализа заявленной мощности предприятия горной промышленности // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле, 2022. – № 4. – С. 249-264.

5. Силаев, В.И., Кцоев, Х.М., Гаврина, О.А. Анализ результатов энергоудита на горных предприятиях // СНК-2020. Материалы Юбилейной LXX открытой международной студенческой научной конференции Московского Политеха. – Москва, 2020. – С. 453-456.

6. Каджаев, О.В., Марзоев, С.А., Кудзиев, А.Б., Гаврина, О.А. Анализ несинусоидальности напряжения на промышленных предприятиях // Энергетика будущего - цифровая трансформация. Сборник трудов III всероссийской научно-практической конференции. – Липецк, 2022. – С. 93-96.

7. Klyuev, R.V., Gavrina, O.A., Madaeva, M.Z. Benefits of solar power plants for energy supply to consumers in mountain territories // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, 2019. – С. 8934222.

8. Ключев, Р.В., Голик, В.И., Босиков, И.И., Гаврина, О.А. Анализ потерь электроэнергии в системе электроснабжения обогатительной фабрики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 7-16.

9. Гаврина, О.А., Маркин, А.С. Электробалансы и повышение эффективности режимов электропотребления промышленных предприятий // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Материалы конференции, 2017. – С. 515-518.

10. Ключев, Р.В., Гаврина, О.А., Хетагуров, В.Н., Фоменко, О.А. Исследование горно-технологических факторов, влияющих на потребление энергии экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2020. – № 11-1. – С. 146-157.

#### Информация об авторах:

Азизов Бахтовар Сангмадович, студент гр. ЭЛм-25-1, СКГМИ(ГТУ), 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44.

Журавлев Александр Игоревич студент гр. ЭЛм-25-1, СКГМИ(ГТУ), 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44.

Захаров Олег Александрович студент гр. ЭЛм-25-1, СКГМИ(ГТУ), 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44.

Гаврина Оксана Александровна к.т.н., доцент СКГМИ(ГТУ), 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44, Gavrina-Oksana@yandex.ru.