

УДК 621.311.24:628.94

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ (НА ПРИМЕРЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ СВЕТОДИОДНЫХ СИСТЕМ)

*Сериков М. А., Тищенко А.М., студенты*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Савилова Ю.И. – канд. физ. наук, доцент*

**Аннотация.** В статье рассматривается экономическая эффективность применения возобновляемых источников энергии в современных реалиях. Проведен анализ ключевых методов оценки, включая расчет нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) и учет полных системных издержек. На конкретном примере – внедрении светодиодных систем освещения на промышленных объектах – показана связь между физическими процессами в полупроводниках и итоговыми финансовыми показателями (ROI, LCOE, совокупная стоимость владения). Отдельное внимание уделено особенностям развития ВИЭ в Республике Беларусь.

**Ключевые слова.** Возобновляемые источники энергии, экономическая оценка, LCOE, системные издержки, светодиодное освещение, энергоэффективность, промышленность, солнечная энергетика, ветроэнергетика, Республика Беларусь.

**Введение.** Вопросы экономической эффективности возобновляемой энергетики сегодня выходят на первый план. С одной стороны, технологии ВИЭ стремительно дешевеют, с другой – требуют пересмотра традиционных подходов к оценке затрат. Понимание реальной стоимости «зеленой» электроэнергии необходимо для грамотного планирования энергоперехода как в глобальном масштабе, так и на уровне отдельных предприятий и регионов. Особую актуальность эта тема приобретает в условиях роста тарифов на электроэнергию и ужесточения экологических требований.

В структуре энергопотребления промышленных предприятий освещение занимает заметную долю – порядка 18–20% от общего объема [1]. При этом традиционные источники света, такие как ртутные лампы (ДРЛ) и натриевые трубчатые лампы (ДНаТ), обладают рядом недостатков: высокое энергопотребление, сильный нагрев, содержание токсичных компонентов и быстрое падение светового потока со временем [1]. Попытки применить классические методы экономического анализа к проектам в области ВИЭ и энергоэффективности выявили их несовершенство – они не учитывают системные эффекты, внешние факторы и специфику структуры капитальных затрат. Это подтолкнуло исследователей к разработке более совершенных подходов.

Экономическая оценка ВИЭ представляет собой комплексную междисциплинарную задачу, объединяющую технические параметры (коэффициент использования установленной мощности, режимы работы, требования к резервированию) с инвестиционными показателями (капитальные и операционные затраты, ставки дисконтирования, сроки окупаемости). Конечная цель – определить реальную стоимость электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла установки, включая строительство, эксплуатацию и утилизацию.

В традиционной энергетике цена киловатт-часа во многом определяется стоимостью топлива. В возобновляемой энергетике картина иная: высокие первоначальные вложения (CAPEX) компенсируются низкими эксплуатационными расходами (OPEX), ведь энергия солнца, ветра или воды бесплатна. Массовый переход на светодиодное освещение позволяет сократить энергопотребление до 70% по сравнению с люминесцентными аналогами [1]. Однако для корректного сравнения ВИЭ с традиционной генерацией необходимо учитывать не только прямые затраты, но и системные издержки на интеграцию переменных источников в энергосистему, затраты на резервирование мощностей и экологические последствия [2].

**Физические основы энергоэффективности светодиодов.**

Светодиод работает на базе полупроводникового кристалла с p–n-переходом. Прохождение тока вызывает рекомбинацию электронов и дырок, в результате которой испускаются фотоны – возникает видимое свечение. В отличие от газоразрядных ламп, LED-системы обладают принципиально иными характеристиками. Эффективность источника света оценивается световой отдачей – отношением светового потока (в люменах) к потребляемой мощности (в ваттах). У ламп ДРЛ этот показатель составляет всего 33–46 лм/Вт, а с учетом загрязнения отражателей реальная эффективность через год падает до 20–23 лм/Вт [1]. Лампы ДНаТ показывают лучшую начальную отдачу (до 83 лм/Вт), но имеют низкий индекс цветопередачи, что ограничивает их применение в цехах с высокими требованиями к зрительной работе [1]. Современные промышленные светодиоды обеспечивают световую отдачу свыше 120–150 лм/Вт, а отдельные модели достигают 164 лм/Вт [1, 3]. К тому же направленность излучения LED позволяет свести к минимуму потери в оптической системе – ее КПД достигает 95–98%.

Еще один важный параметр – скорость деградации светового потока. У ДРЛ за первые три месяца падение составляет 30%, а за год – 40% [1]. Лампы ДНаТ за год теряют около 20% яркости [1]. У качественных светодиодов потери за первый год не превышают 2–4% [1]. Ресурс LED-светильников, определяемый по стандарту L70 (снижение светового потока до 70% от номинала), достигает 50–100 тысяч часов [1, 5]. Правда, этот показатель сильно зависит от температуры р–п-перехода: перегрев ускоряет деградацию кристалла и разрушение люминофора. Поэтому эффективный теплоотвод – обязательное условие долгой службы.

Поскольку светодиоды питаются постоянным током, им нужны специальные устройства – драйверы. Дешевые модели без коррекции коэффициента мощности ( $\lambda$ ) искажают форму тока, снижая  $\lambda$  до 0,5 и ниже. Это ведет к росту реактивной мощности и дополнительным потерям в кабелях. Современные драйверы оснащаются активными корректорами, которые поднимают  $\lambda$  до 0,95–0,99 [3], уменьшая нагрузку на сеть и снижая пульсации света до безопасного уровня (менее 5%).

Методология экономической оценки.

Зачем вообще нужна детальная экономическая оценка ВИЭ? Во-первых, она позволяет объективно сравнить конкурентоспособность разных технологий в конкретных условиях. Во-вторых, помогает рассчитать полные приведенные затраты на производство энергии с учетом дисконтирования. В-третьих, служит основой для выработки мер господдержки и оптимизации структуры генерирующих мощностей.

Сегодня в мировой практике сложились два основных подхода: анализ нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) и концепция полных системных издержек. LCOE учитывает капитальные и операционные затраты, а также коэффициент использования установленной мощности. Для проектов по замене освещения применяют схожие показатели: совокупную стоимость владения (TCO), возврат инвестиций (ROI) и срок окупаемости.

Простой срок окупаемости  $T = K / D$ , где  $K$  – начальные вложения (стоимость оборудования и монтажа),  $D$  – ежегодная экономия от снижения энергопотребления и затрат на обслуживание [4]. В промышленных масштабах корректнее использовать дисконтированный срок окупаемости (DPP) и чистый дисконтированный доход (NPV), которые учитывают стоимость капитала во времени [4].

В формуле ежегодного дохода ( $D$ ) ключевую роль, помимо снижения энергопотребления (в ваттах) в 3–4 раза, играет радикальное сокращение затрат на обслуживание. Промышленные цеха часто имеют высокие потолки, что усложняет замену ламп. Традиционные лампы ДРЛ требуют замены каждые 6 000 – 10 000 часов, люминесцентные – около 10 000 часов [1, 5]. Для замены осветительного оборудования на высоте требуется привлечение промышленного альпинизма или спецтехники. Для справки, стоимость работ указана по данным для РФ (в ценах 2025 года): замена одного светильника/лампы на высоте более 3 метров стоит от 350 руб. (около 12,5 бел. руб.), на высоте более 6 метров — от 500 руб. (около 18 бел. руб.), а свыше 9 метров — от 700 руб. (около 25 бел. руб.) за штуку [1]. Кроме того, отражатели традиционных светильников требуют частой протирки от производственной пыли (иначе светопотери достигают 50%) [1].

LED-светильники с герметичным корпусом (класс защиты IP66 и выше) и собственной оптикой не нуждаются в обслуживании на протяжении всего срока службы – 50–100 тысяч часов, что соответствует 12–20 годам работы в две смены [1]. Отсутствие затрат на высотные работы и закупку сменных ламп резко увеличивает  $D$  и сокращает срок окупаемости LED-проектов до 1–3 лет [4].

Применение интеллектуальных систем управления (датчики освещенности, протоколы DALI, 1–10V) позволяет дополнительно снизить энергопотребление на 40–80% [3]. Хотя такие решения удлинляют срок окупаемости до 8–9 лет из-за более высоких начальных инвестиций, они дают максимальную долгосрочную экономию и позволяют адаптировать освещение под биоритмы персонала.

Помимо проектного анализа, на макроуровне используются три ключевых показателя: LCOE (удельные затраты на производство), NPV (абсолютная эффективность) и IRR (внутренняя норма доходности). Концепция полных системных издержек добавляет к ним три группы параметров: затраты на балансировку сети и поддержание устойчивости, стоимость резервирования мощностей, а также внешние эффекты – экологические и социальные (снижение выбросов, уменьшение зависимости от импорта топлива). Выбор того или иного варианта развития энергосистемы всегда сопряжен с сопоставлением этих затрат и выгод.

С помощью сложных экономико-математических моделей было доказано, что традиционный показатель LCOE может недооценивать системно значимые технологии и переоценивать эффективность отдельных опций, поскольку игнорирует затраты на интеграцию переменных ВИЭ [5]. При доле ВИЭ в энергобалансе свыше 20–30% полная системная стоимость электроэнергии может значительно превышать «голый» LCOE из-за необходимости строить резервные мощности, модернизировать сети и внедрять накопители. Подход полной системной стоимости становится все более востребованным для создания сбалансированных и надежных энергосистем [5].

Суть этого подхода – учет всех издержек на производство, передачу, распределение и резервирование, а также требований к надежности. Он предполагает, что затраты на интеграцию ВИЭ

(модернизация сетей, балансировка, резервы) – не второстепенны, а составляют неотъемлемую часть реальной стоимости энергии в системах с высокой долей «зеленой» генерации [5].

Макроэкономические факторы развития ВИЭ.

Эффективность внедрения ВИЭ зависит не только от прямых технико-экономических показателей, но и от широкого спектра макроэкономических и институциональных факторов. Исследования на примере стран Евросоюза, где доля ВИЭ наиболее высока, показывают значимость неценовых драйверов. С помощью регрессионного анализа установлено, что ключевыми факторами, обеспечивающими развитие «зеленой» энергетики, являются: уровень коррупции (прозрачность институтов), наличие национальной правовой базы, объем выбросов парниковых газов, а также государственные расходы на научно-исследовательские работы [8]. Интересно, что цены на углеводороды, хоть и важны, не являются доминирующим фактором. Это подтверждает тезис о том, что для успешного энергоперехода необходима последовательная государственная политика, снижение инвестиционных рисков и поддержка инноваций, а не только надежда на высокие цены на газ или нефть [8]. Выпуск «зеленых» облигаций также становится действенным инструментом привлечения финансирования [8].

Яркая иллюстрация ограниченности традиционных методов планирования – масштабный блэкаут на Пиренейском полуострове 28 апреля 2025 года. Из-за высокой доли солнечной генерации (около 60% в момент аварии), низкой инерции инверторных источников и отсутствия эффективного управления реактивной мощностью произошел каскадный сбой мощностью 31 ГВт. Миллионы людей остались без электричества на срок до 16 часов, экономике был нанесен серьезный урон [5]. Этот случай показал, что системные издержки – не абстракция, а реальные риски, которые необходимо учитывать.

Региональный подход к оценке ВИЭ.

Эффективность возобновляемой энергетики сильно зависит от местных условий: климата, инфраструктуры, структуры существующей генерации. Поэтому глобальные методики вроде LCOE нужно адаптировать к конкретному региону. Ключевые понятия здесь – коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), себестоимость с учетом логистики и подключения к сетям, интеграционный потенциал энергосистемы. КИУМ отражает реальную выработку в данных климатических условиях и напрямую влияет на экономику проекта.

Региональное энергетическое планирование позволяет оценить целесообразность инвестиций в ВИЭ с учетом природных, инфраструктурных, экономических и социальных факторов. Такой подход уже доказал свою состоятельность: инвестиции в ВИЭ растут быстрее всего именно там, где есть благоприятные природные условия и последовательная господдержка.

Ситуация в Республике Беларусь.

Развитие ВИЭ в нашей стране имеет свою специфику. С одной стороны, нет собственных крупных запасов углеводородов и исторически высока зависимость от импорта газа. С другой – работает Белорусская АЭС мощностью 2,4 тыс. МВт, которая кардинально изменила структуру генерации. Тем не менее потенциал возобновляемых источников постепенно реализуется. На начало 2023 года суммарная мощность ВИЭ-установок достигла 631,5 МВт – это в 14 раз больше, чем в 2010 году. В структуре преобладает солнечная энергетика (43,2%), далее идут ветроэнергетика (19,3%), биоэнергетика (15,9%) и гидроэнергетика (15,2%) [7].

Важным инструментом государственного регулирования выступает система квотирования. В апреле 2024 года Республиканская межведомственная комиссия утвердила квоты на создание установок ВИЭ на период 2025–2029 годов общей электрической мощностью 43,186 МВт [7]. Распределение квот наглядно демонстрирует приоритеты энергетической политики: наибольший объем выделен для геотермальных установок и тепловых насосов (13,186 МВт) и установок на биомассе (11,28 МВт), что подчеркивает ставку на использование местных видов топлива, прежде всего древесины. Также предусмотрены квоты для биогазовых (10 МВт), ветро- (3 МВт), солнечных (1 МВт) и малых гидроэлектростанций (1 МВт). Это распределение не только стимулирует развитие конкретных технологий, но и дает бизнесу четкий сигнал о направлениях инвестиций [7].

Влияние систем накопления на тарифную политику.

В условиях энергетического перехода актуальной задачей для Беларуси становится разработка экономически обоснованных механизмов тарифного регулирования, учитывающих особенности интеграции ВИЭ. Как показывают исследования белорусских ученых, применение систем накопления энергии (СНЭ) способствует повышению эффективности использования генерирующих мощностей, снижению затрат на регулирование режимов и стабилизации оптовых цен на электроэнергию [8]. СНЭ позволяют сглаживать пиковые нагрузки и балансировать спрос и предложение, что критически важно при растущей доле переменных ВИЭ. Внедрение накопителей — это не просто технологическое решение, а инструмент экономической политики, позволяющий управлять структурой себестоимости электроэнергии и делать «зеленую» генерацию более предсказуемой для сети [8].

Объем производства первичной энергии из ВИЭ в валовом потреблении ТЭР в 2022 году составил 8,3%, к 2035 году планируется довести ее до 9% [7]. Промышленные предприятия Беларуси, особенно в АПК, где освещение потребляет до 20–25% электроэнергии [1], обладают высоким потенциалом для

внедрения светодиодных технологий. Это одно из самых быстро окупаемых направлений энергосбережения.

Рынок светодиодных решений: драйверы и барьеры.

Промышленный и коммерческий сегменты рынка LED-освещения Беларуси демонстрируют устойчивый рост, который, по прогнозам, продолжится до 2031 года [8, 9]. Ключевыми драйверами выступают государственные программы по энергоэффективности и растущий спрос предприятий на модернизацию. Наиболее востребованной продукцией в промышленности являются светильники типа «хай-бэй» (High Bay) для цехов с высокими потолками, а также линейные светильники и панели для офисных и складских помещений [9].

Помимо очевидных преимуществ (экономия электроэнергии до 80% при использовании систем с датчиками), важную роль играют неценовые факторы. Среди барьеров для ускоренного внедрения выделяются все еще относительно высокие первоначальные инвестиции, а также необходимость адаптации систем к местным условиям эксплуатации [8]. Однако развитие технологий, включая появление интеллектуальных (Smart LED) и IoT-совместимых систем, открывает новые возможности для тонкой настройки энергопотребления и интеграции освещения в общую систему управления предприятием [9].

Государственная политика в сфере ВИЭ строится на принципе экономической целесообразности: поддерживаются те технологии, которые могут конкурировать по цене с традиционной генерацией (с учетом дешевой атомной энергии). Приоритет отдается местным видам топлива (древесина) и тем ВИЭ, которые хорошо интегрируются в существующую энергосистему без резкого роста тарифов.

Подводя итог сравнению двух подходов – LCOE и полных системных издержек – можно сказать, что они дополняют друг друга. LCOE прост и удобен для первичного сравнения технологий, но не учитывает системные эффекты. Полная системная стоимость сложнее, требует больше данных, зато дает более объективную картину для долгосрочного планирования на национальном уровне.

Закключение.

Экономическая эффективность светодиодного освещения в промышленности подтверждается как физическими параметрами, так и расчетами. Благодаря высокой световой отдаче (свыше 120 лм/Вт), медленной деградации кристалла и качественным драйверам с корректором мощности LED-системы позволяют радикально сократить как прямые затраты на электроэнергию, так и косвенные расходы на обслуживание. Дисконтированный срок окупаемости таких проектов в среднем составляет 1–3 года [4].

В более широком контексте экономическая оценка ВИЭ и энергоэффективных решений остается активной областью исследований. Учет всех системных издержек и внешних эффектов – сложная, но необходимая задача для построения устойчивой энергетики будущего. Накопление практического опыта и совершенствование методик, включая концепцию полной системной стоимости, помогут принимать более взвешенные решения на всех уровнях – от отдельного предприятия до государства.

#### Список использованных источников

1. Промышленное LED-освещение: особенности выбора и окупаемость [Электронный ресурс] / Sea Light. – 2025. – Режим доступа: <https://sea-light.ru/blog/promyshlennoe-led-osveshchenie/>. – Дата доступа: 19.03.2026.
2. IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2024 – International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2025 – 204 p.
3. LCM-40 LED драйвер с КKM // Компэл [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.compel.ru/infosheet/MW/LCM-40>. – Дата доступа: 17.03.2026.
4. Светодиодное освещение предприятия: полный расчет экономии и окупаемости // DL Group [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://deledzavod.ru/stati/svetodiодное-osveshhenie-predpriyatiya-polnyj-raschet-ekonomii-i-okupaemosti/>. – Дата доступа: 17.03.2026.
5. UNECE and partners launch initiative to develop a full system cost approach to guide investments towards resilient and carbon-neutral electricity systems // United Nations Economic Commission for Europe [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://unece.org/climate-change/press/unece-and-partners-launch-initiative-develop-full-system-cost-approach-guide>. – Дата доступа: 17.03.2026.
6. Quantified Carbon. Understanding the Full System Cost of the Electricity System – Study prepared for UNECE, 2025.
7. Belarus sets quotas for building installations that use renewable energy sources in 2025-2029 // BelTA – Belarusian Telegraph Agency. – 2 April 2024. – Режим доступа: <https://eng.belta.by/economics/view/belarus-sets-quotas-for-building-installations-that-use-renewable-energy-sources-in-2025-2029-157209-2024/>. – Дата доступа: 19.03.2026.
8. Кравченко В.В., Якимович Е.М. Анализ и оптимизация режимов работы мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях профицита электроэнергетических мощностей в Объединенной энергетической системе Беларуси. Часть 1 // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2024. – Т. 67, № 3. – С. 236-250. – DOI:
9. Обзор рынка светодиодного освещения Республики Беларусь 2024-2031: аналитический отчет / 6Wresearch. – Нью-Дели, 2024. – 75 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.6wresearch.com/industry-report/belarus-lighting-market>. – Дата доступа: 19.03.2026.

UDC 621.311.24:628.94

## **ECONOMIC ASSESSMENT OF THE USE OF ENERGY SOURCES (USING THE EXAMPLE OF INDUSTRIAL LED SYSTEMS)**

*Serikov M. A., Tishchenko A.M., students*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Savilova Yu.I. – Candidate of Physical Sciences. Associate Professor*

Annotation. The article examines the economic efficiency of using renewable energy sources in modern realities. The analysis of key assessment methods, including the calculation of the normalized cost of electricity (LCOE) and accounting for total system costs, is carried out. Using a specific example – the introduction of LED lighting systems in industrial facilities – the relationship between the physical processes in semiconductors and the final financial indicators (ROI, LCOE, total cost of ownership) is shown. Special attention is paid to the peculiarities of renewable energy development in the Republic of Belarus.

Keywords. Renewable energy sources, economic assessment, LCOE, system costs, LED lighting, energy efficiency, industry, solar energy, wind energy, Republic of Belarus.