

Е.Б. Домалатов<sup>1\*</sup>, К.С. Чежимбаева<sup>2</sup>, М.Б. Жаркымбекова<sup>2</sup>, М.Ш. Сакитжанов<sup>2</sup><sup>1</sup>Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,  
070000, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан<sup>2</sup>Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева,  
050000, г. Алматы, Республика Казахстан\*e-mail: [domalatovkz@gmail.com](mailto:domalatovkz@gmail.com)

## ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКИХ, ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ ВНЕДРЕНИЯ IOT В ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ИНФРАСТРУКТУРУ SMART GRID

### Аннотация

В статье рассматриваются возможности применения технологий Интернета вещей (IoT) в электроэнергетике при формировании интеллектуальных сетей Smart Grid. Цель исследования заключается в количественной оценке экономической и экологической эффективности внедрения IoT-решений, а также в анализе их социального эффекта для повышения надёжности электроснабжения, снижения операционных затрат и интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Объектом исследования выступают распределительные сети среднего и низкого напряжения, включающие интеллектуальные счётчики (AMI), датчики на фидерах, системы автоматического восстановления после аварий (FLISR) и сервисы управления спросом (DR). Методология исследования основана на применении моделей оценки эффективности (NPV, IRR, TCO, срок окупаемости), Difference-in-Differences и стандарта IPMVP Option C для верификации измерений. Для оценки экологического эффекта использовались расчёты выбросов по ISO 14064-1 и GHG Protocol. Проведён числовой пример для распределительной компании среднего масштаба, включающей 50 000 интеллектуальных счётчиков. Результаты исследования показывают, что внедрение IoT позволяет достичь совокупного экономического эффекта более 600 млн KZT в год при масштабе 300 тыс. потребителей, повысить надёжность электроснабжения и улучшить качество обслуживания потребителей. Экологический эффект выражается в существенном сокращении выбросов CO<sub>2</sub>, а социальный – в снижении длительности отключений, повышении прозрачности учёта и повышении доверия со стороны конечных пользователей. Практическая значимость работы заключается в разработке воспроизводимой модели оценки, применимой для планирования инвестиций, тарифного регулирования и ESG-отчётности. Таким образом, цифровизация сетей на базе IoT подтверждает свою экономическую и экологическую целесообразность и должна рассматриваться как стратегическое направление долгосрочной модернизации электроэнергетического сектора.

**Ключевые слова:** IoT, Smart Grid, интеллектуальный счётчик, технико-экономический анализ, устойчивое развитие, экологическая безопасность, социальный эффект.

### Введение

Современная электроэнергетика переживает системную трансформацию под воздействием технологических, экономических и экологических факторов. Рост глобального спроса на электроэнергию в условиях электрификации транспорта, цифровизации экономики и повышения уровня жизни сопровождается структурными изменениями в энергосистемах, связанными с увеличением доли распределённой генерации (солнечные панели, ветровые установки, накопители энергии). Эти процессы изменяют традиционную централизованную топологию энергосетей и усиливают роль информационно-коммуникационных технологий для обеспечения баланса, устойчивости и надёжности электроснабжения [1-2].

Одной из наиболее острых проблем остаются технические и коммерческие потери электроэнергии, которые, по данным Международного энергетического агентства, в распределительных сетях разных стран достигают 4-6 %, а в отдельных развивающихся рынках – свыше 10 %, что приводит к прямым финансовым потерям и росту избыточной генерации [3]. Сокращение потерь напрямую влияет на снижение выбросов CO<sub>2</sub>, поскольку каждый сэкономленный мегаватт-час электроэнергии эквивалентен уменьшению объёма сжигаемого топлива [4].

В ответ на данные вызовы концепция Smart Grid (интеллектуальной энергосистемы)

предлагает интеграцию цифровых технологий, сенсорных систем и адаптивного управления. В её основе лежит использование данных для реализации балансировки в реальном времени, прогнозирования нагрузки, интеграции ВИЭ и управления спросом [5-6]. Международные исследования показывают, что внедрение «умных сетей» способствует повышению надёжности, эффективности и адаптивности энергосистем [7].

Особое место в развитии Smart Grid занимает IoT – совокупность интеллектуальных счётчиков, датчиков, контроллеров и коммуникационных модулей, формирующих «цифровую нервную систему» энергетики [8]. Применение IoT позволяет реализовывать новые функциональные сценарии: управление пиковыми нагрузками (Demand Response), предиктивное обслуживание оборудования, автоматическое восстановление сети (FLISR – Fault Location, Isolation and Service Restoration) и снижение коммерческих потерь [9-10]. Практические проекты подтверждают эффективность таких решений: внедрение систем AMI (Advanced Metering Infrastructure) сокращает затраты на ручное снятие показаний и снижает уровень неучтённого потребления [11], технологии FLISR уменьшают длительность и частоту отключений (SAIDI, SAIFI) [12], а системы мониторинга состояния оборудования продлевают срок службы активов и снижают аварийность [13].

В то же время переход к IoT сопровождается рядом ограничений и вызовов: высокими капитальными затратами на оборудование и телекоммуникационную инфраструктуру, рисками кибербезопасности, отсутствием унифицированных стандартов и дефицитом квалифицированных специалистов по обработке потоковых данных [14]. Несмотря на наличие большого количества прикладных исследований, большинство из них концентрируется на технических аспектах внедрения IoT, тогда как комплексные оценки экономической и экологической эффективности остаются недостаточно разработанными. Недостаточно исследованы вопросы количественного измерения совокупного эффекта, включающего как снижение потерь и повышение надёжности, так и сокращение углеродных выбросов.

Учитывая данные пробелы, необходимость настоящего исследования определяется потребностью в разработке методического подхода, позволяющего интегрировать экономическую и экологическую оценку IoT-решений в единую модель анализа эффективности Smart Grid. Это особенно важно в контексте формирования устойчивой энергетики и перехода к низкоуглеродной экономике [15].

Целью настоящего исследования является проведение комплексного анализа экономических и экологических эффектов внедрения IoT-технологий в инфраструктуру Smart Grid. В работе рассматриваются архитектурные особенности IoT в энергетике, ключевые сценарии применения, методика количественной оценки эффективности (NPV, IRR, TCO, CO<sub>2</sub>), а также иллюстративный пример для условной распределительной компании. Такой подход позволяет соединить теоретическую и практическую перспективы, формируя научную основу для принятия инвестиционных и управленческих решений в сфере цифровой энергетики.

Научный вклад исследования заключается в разработке интегрированной модели оценки экономических, экологических и социальных эффектов внедрения IoT в Smart Grid. В отличие от существующих подходов, предложенная методика позволяет количественно оценивать совокупный эффект цифровизации с использованием методов Difference-in-Differences и стандарта IPMVP. Полученные результаты подтверждают высокий потенциал IoT в повышении эффективности и устойчивости энергосистем [16].

### **Материалы и методы исследования**

Исследование носит прикладной и количественный характер, направленный на комплексную оценку экономической (NPV, IRR, TCO, срок окупаемости) и экологической (сокращение выбросов, снижение потерь, интеграция ВИЭ) эффективности внедрения технологий IoT в инфраструктуру интеллектуальных сетей Smart Grid.

Объектом исследования являются распределительные сети среднего и низкого напряжения, включающие интеллектуальные системы учёта (AMI), датчики на фидерах,

устройства автоматического восстановления после аварий (FLISR), платформу сбора и анализа данных, а также сервисы управления спросом (DR) и распределённой генерацией (DERM).

Границы исследования (system boundary) определяются по двум векторам:

- Технический вектор – от точки отпуска энергии на стороне подстанции до приборов учета у конечного потребителя, включая телеметрию и каналы связи.

- Экологический вектор – операционные эффекты (сокращение потерь и пиковой генерации) включаются обязательно, а анализ жизненного цикла оборудования (LCA) выполняется по расширенному контуру при наличии инвентаризационных данных (ISO 14040/14044).

Фиксация границ проводится в протоколе исследования и используется при расчёте выбросов парниковых газов в соответствии с ISO 14064-1 и GHG Protocol (Scope 2, включая локально-маржинальные факторы) [17].

Исходные данные и источники структурируются в три слоя: (а) инфраструктура и события (телеметрия IoT, топология фидеров, отключения), (б) энергетика и рынок (профили нагрузки/цен, факторы выбросов), (в) стоимости (CAPEX/OPEX, VOLL, стоимость мощности). Ключевые источники: система AMI/MDMS, SCADA/DMS/OMS, журналы FLISR, биллинговая система, а также официальные каталоги коэффициентов выбросов и методики M&B (IPMVP) [18]. Для репрезентативности используется минимум 12-24 месяцев «до» и 12-24 месяца «после» внедрения (если это натурный эксперимент/пилот).

Таблица 1 - Основные параметры модели и используемые источники данных

Параметр	Обозн.	Ед.	Источник
Отпуск в сеть	$E_{in}$	МВт·ч	SCADA/баланс
Поставлено потребителям	$E_{out}$	МВт·ч	AMI/биллинг
Потери в сети	Loss	%	$1 - E_{out}/E_{in}$ (IEA-бенчм.)
Пиковая нагрузка	$P_{max}$	МВт	AMI/SCADA
SAIDI/SAIFI/EENS	-	мин/клиент; ед/клиент; МВт·ч	IEEE Std 1366 методика
Цена энергии/ мощности	$C_E$ , $C_{cap}$	Тг/МВт·ч; Тг/МВт·год	Рынок/регулятор
Фактор выбросов	$EF_t$	тCO <sub>2</sub> /МВт·ч	Грид-временные/ маржинальные справочники
Стоимость углерода	$P_{CO_2}$	Тг/т	ETS/внутр. цена

Примечание: составлено авторами на основе IEEE Std 1366, IPMVP, GHG Protocol, данных AMI/SCADA/OMS и рыночных параметров тарифного регулирования.

Методика и модели анализа, включая построение базового сценария, основаны на формировании контрфактического базиса («что произошло бы без внедрения IoT»), при котором в зависимости от структуры данных применяются:

- **DiD**: сравнение «пилотных» фидеров с контрольной группой до/после внедрения (проверка параллельных трендов) [19].

- **Синтетический контроль**: построение взвешенной комбинации контрольных фидеров, имитирующей поведение пилота до внедрения.

- **IPMVP Option C (whole-facility)**: нормирование потребления/потерь по погоде, календарю и производственной активности с использованием регрессионной модели или GAM.

Ключевые показатели (KPI) определяются на основе расчёта метрик надёжности в соответствии со стандартом IEEE Std 1366 [20]:

Потери:  $Loss = 1 - \frac{E_{out}}{E_{in}}$ . Надёжность рассчитывается по IEEE Std 1366:

$$SAIDI = \frac{\sum_i U_i N_i}{\sum_i N_i}, \quad SAIFI = \frac{\sum_i \lambda_i N_i}{\sum_i N_i}, \quad EENS = \sum_i P_i U_i, \quad (1)$$

где  $U_i$  – длительность,  $\lambda_i$  – частота,  $N_i$  – число потребителей,  $P_i$  – средняя отключённая мощность. Эффект управления спросом оценивается через снижение пиковой нагрузки ( $\Delta P_{max}$ ) и коэффициент нагрузки ( $LF = \bar{P}/P_{max}$ ).

Экономическая модель основана на анализе экономической эффективности проекта с использованием показателей полной стоимости владения (TCO), чистой приведённой стоимости (NPV), внутренней нормы доходности (IRR) и срока окупаемости:

$$TCO = CAPEX_0 + \sum_{t=1}^N \frac{OPEX_t}{(1+r)^t}, \quad NPV = -CAPEX_0 + \sum_{t=1}^N \frac{\Delta CF_t}{(1+r)^t} \quad (2)$$

Годовой денежный эффект агрегирует по сценариям:

$$\Delta CF_t = B_{AMI,t} + B_{Loss,t} + B_{Reliab,t} + B_{DR,t} + B_{CO2,t} - \Delta OPEX_t. \quad (3)$$

Здесь  $B_{Loss,t} = \Delta E_{loss,t} \cdot C_E$ ,  $B_{Reliab,t} = VOLL \cdot \Delta EENS_t$  и  $B_{DR,t} = C_{cap} \cdot \Delta P + \sum \tau (P_{peak,\tau} - P_{offpeak,\tau}) \Delta E_t$  [5; 9; 10].

Экологическая модель направлена на оценку совокупного эффекта в виде суммы сокращённых выбросов  $CO_2$ , достигаемого за счёт снижения технических потерь, смещения потребления из «грязных» часов в «чистые» и интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ):

$$\Delta CO_2 = \underbrace{\Delta E_{loss} \cdot EF}_{\text{потери}} + \underbrace{\sum_t \Delta E_t \cdot (EF_t^{peak} - EF_t^{offpeak})}_{DR\text{-перенос}} + \underbrace{E_{RES}^{accepted} \cdot EF_{substitution}}_{\text{вытеснение}} \quad (4)$$

$$B_{Loss} = \Delta E_{Loss} \cdot C_E, \quad B_{Reliab} = VOLL \cdot \Delta EENS, \quad (5)$$

Монетизация при наличии цены/квот:  $V_{CO_2} = \Delta CO_2 \cdot P_{CO_2}$ . При расширенных границах учитывается LCA устройств IoT (производство/утилизация) по ISO 14040/14044.

Алгоритм моделирования основан на последовательной оценке технических, прогнозных, аспектов надёжности и верификационных аспектов функционирования интеллектуальных сетей. В части анализа электрического режима статические потери определяются на основе профилей тока и напряжения ( $I^2R$ ), а также по упрощённой схеме «до/после» с учётом поправок на погодные условия и изменение нагрузки. Для проверки достоверности расчётов применяются моделирование потокораспределения и анализ репрезентативных фидеров, что позволяет валидировать результаты и снизить методологическую неопределённость.

Прогнозирование краткосрочной нагрузки и выработки ВИЭ, необходимое для расчёта параметров управления спросом (DR) и факторов выбросов, выполняется с использованием моделей ARIMA, ETS и градиентного бустинга. Применяется перекрёстная валидация по сезонам [21], что обеспечивает устойчивость и точность прогнозов.

Оценка надёжности осуществляется на основе данных журналов OMS, фиксирующих время локализации и восстановления после аварий. Полученные показатели конвертируются в изменения метрик  $\Delta SAIDI$ ,  $\Delta SAIFI$  и далее – в  $\Delta EENS$  и  $B_{Reliab}$  через показатель стоимости недоотпуска электроэнергии (VOLL) [22].

Этап измерения и верификации (M&V) реализуется с использованием регрессионного нормирования по методологии IPMVP Option C, применяемой как базовая метрика для оценки влияния систем AMI, потерь и программ управления спросом. В отчётности учитывается уровень неопределённости, что повышает достоверность результатов [23-24].

Дизайн эксперимента строится на принципах каузальной идентификации: при поэтапном внедрении решений используется кластерная рандомизация фидеров (A/B-design) либо

квазиэкспериментальные подходы, такие как DiD и метод синтетического контроля. В модели дополнительно включаются ковариаты – температура, влажность, календарные фиктивные переменные, структура потребителей и аварийные ситуации. Для проверки робастности выполняются плацебо-тесты и варьирование временных окон оценки, что позволяет выявить устойчивость причинно-следственных связей.

Анализ чувствительности и неопределённости проводится для параметров, обладающих наибольшим влиянием на результаты моделирования – стоимости электроэнергии (CE), мощности ( $C_{cap}$ ), факторов выбросов ( $EF_t$ ), VOLL, изменения пиковой нагрузки ( $\Delta P_{max}$ ) и доли неучтённого потребления. Для этого выполняется варьирование значений в диапазонах P10-P90, однофакторный анализ чувствительности (торнадо-диаграмма), а также моделирование методом Монте-Карло с количеством итераций от 10 до 50 тысяч. Такой подход позволяет получить распределения показателей NPV, IRR и доверительные интервалы по  $\Delta CO_2$ , обеспечивая статистическую устойчивость результатов.

Исследование соблюдает принципы научной и этической добросовестности: не затрагивает персональные данные, опирается исключительно на официальные и согласованные источники информации, гарантирует конфиденциальность, прозрачность и корректность обработки данных. Применяемая методология и алгоритмы обеспечивают воспроизводимость результатов, а также возможность их независимой проверки и последующей верификации в аналогичных условиях.

### Результаты и их обсуждение

В рамках проведённого исследования результаты оценки внедрения IoT-технологий (AMI, FLISR и DR) в инфраструктуру Smart Grid интерпретируются в логике устойчивого развития и рассматриваются по трём взаимосвязанным направлениям: экономическому, экологическому и социальному. Такой подход позволяет оценить не только финансовую целесообразность цифровизации сетевой инфраструктуры, но и её вклад в повышение экологической безопасности и качества жизни потребителей электроэнергии.

Для обеспечения логической связи между методикой исследования и полученными результатами расчёты выполнены на основе иллюстративного сценария для распределительной компании, обслуживающей 300 тыс. потребителей. При этом на пилотном этапе рассматривается внедрение 50 тыс. интеллектуальных счётчиков, а также использование датчиков на фидерах, систем FLISR и сервисов управления спросом. Все итоговые показатели получены на основе авторской модели, представленной в формулах (1) – (5), с применением нормированных параметров нагрузки, потерь, надёжности и факторов выбросов. Такой формат демонстрирует воспроизводимость методики и её применимость к практическим задачам цифровой модернизации электроэнергетики. На основе нормированных данных получены следующие значения ключевых параметров: снижение потерь электроэнергии составило  $\Delta Loss = 0,6$  п.п. при общем отпуске в сеть  $E_{in} = 1\,300\,000$  МВт·ч, что соответствует годовому сокращению потерь  $\Delta E_{loss} = 7\,800$  МВт·ч; снижение пиковой нагрузки достигло 12 МВт, а показатель надёжности  $\Delta SAIDI$  уменьшился на 15 мин/клиент/год.

Для расчётов экономической эффективности приняты следующие исходные параметры в тенге: стоимость электроэнергии  $CE = 12\,770$  KZT/МВт·ч, стоимость мощности  $C_{cap} = 30\,768\,000$  KZT/МВт·год, средняя отключённая мощность 0,9 кВт/клиента, а показатель стоимости недоотпуска электроэнергии  $VOLL = 2\,000$  KZT/кВт·ч.

Результаты расчётов, выполненных в рамках проведённого исследования, представлены в таблице 2. Они отражают иллюстративный пример оценки экономического и экологического эффекта от внедрения IoT-технологий (AMI, FLISR и DR) в энергетическую инфраструктуру. В качестве базы для анализа рассмотрен сценарий, охватывающий 300 тыс. потребителей, с сопоставлением двух альтернативных вариантов – «Без IoT» и «С IoT», что позволяет количественно оценить влияние цифровизации на показатели эффективности, надёжности и устойчивости энергосистемы.

Анализ данных (таблица 2, рисунки 1-3) показывает, что внедрение комплекса IoT-технологий (AMI, FLISR, DR) обеспечивает выраженный мультипликативный эффект,

проявляющийся в экономической, экологической и социальной плоскостях функционирования энергосистемы. Совокупный экономический эффект достигает около 606,6 млн KZT в год, что подтверждает высокую инвестиционную привлекательность цифровизации сетевой инфраструктуры.

Таблица 2 - Сравнительные расчётные показатели экономической, экологической и социальной эффективности внедрения IoT-технологий (AMI, FLISR, DR) в энергетическую инфраструктуру

Показатель	Без IoT	С IoT	Эффективность
Снижение потерь, млн KZT/год	0	99,6	+99,6
Управление спросом (DR), млн KZT/год	0	369,2	+369,2
Надёжность, млн KZT/год	0	135,0	+135,0
Монетизация CO <sub>2</sub> , млн KZT/год	0	2,76	+2,76
Совокупный эффект, млн KZT/год	0	606,6	+606,6
Выбросы CO <sub>2</sub> , т/год	≈11 743	≈5 872	-5 871
Снижение SAIDI, мин/клиент/год	0	15	-15
Социальный эффект	базовый уровень обслуживания	повышение надёжности, прозрачности учёта и качества обслуживания	положительный

Примечание: составлено авторами на основе расчётов по формулам (1,5).

Наибольший вклад в совокупный результат обеспечивает сегмент управления спросом – 369,2 млн KZT/год, что свидетельствует о высокой эффективности использования гибких нагрузок и оптимизации пиковой генерации. Вторым по значимости фактором выступает повышение надёжности энергоснабжения, эквивалентное 135,0 млн KZT/год, за счёт сокращения времени локализации и восстановления после аварийных событий, реализуемого посредством систем FLISR. Дополнительный эффект в 99,6 млн KZT/год формируется за счёт снижения технических потерь, достигаемого благодаря интеграции интеллектуальных счётчиков и оптимизации режимов работы распределительных сетей.

Отдельное внимание заслуживает экологический компонент, выраженный в снижении выбросов CO<sub>2</sub> почти вдвое – с ≈11 743 т/год до ≈5 872 т/год. Монетизация углеродного эффекта при действующих ценовых ориентирах (ETS/внутренние углеродные цены) составляет около 2,76 млн KZT/год, что, несмотря на относительную долю в общем эффекте, демонстрирует потенциал для дальнейшей интеграции механизмов углеродного регулирования в экономическую оценку энергетических проектов.

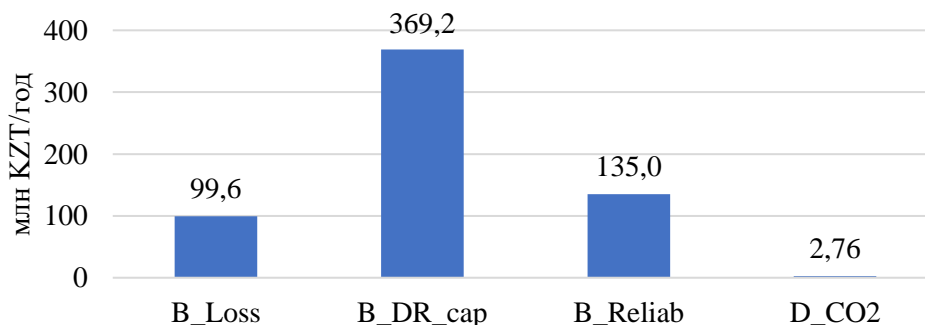


Рисунок 1 - Экономический и экологический эффект по категориям (млн KZT/год)  
Примечание: построено авторами по результатам моделирования.

Несмотря на относительно небольшой денежный эквивалент экологического эффекта, связанный с сокращением выбросов CO<sub>2</sub>, его значение остаётся стратегически важным в

контексте ESG-отчётности и долгосрочных целей устойчивого развития. Этот показатель отражает не только экологическую ответственность предприятия, но и потенциал интеграции углеродных механизмов (ETS, внутренние цены на углерод) в общую экономическую модель энергетических проектов.

Для наглядного представления совокупных результатов исследования были построены графические зависимости, отражающие влияние внедрения IoT-технологий (AMI, FLISR и DR) на ключевые показатели эффективности энергосистемы. Визуализация позволяет продемонстрировать различия между сценариями «Без IoT» и «С IoT», выявить масштабы экономического и экологического эффекта, а также подтвердить количественные выводы, полученные в ходе моделирования.

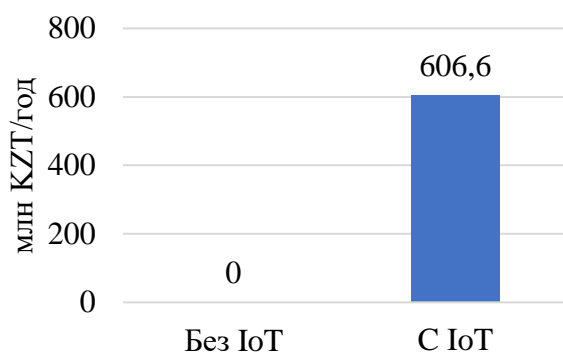


Рисунок 2- Совокупный экономический эффект (млн KZT/год)

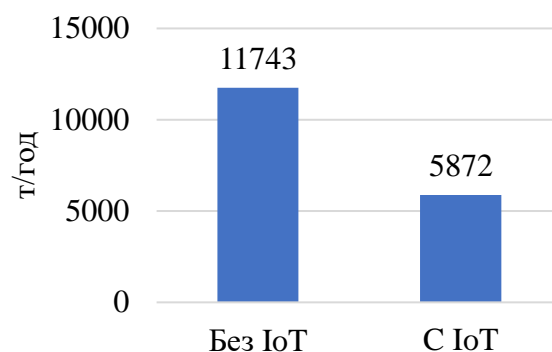


Рисунок 3 - Экологический эффект: выбросы CO<sub>2</sub> (т/год)

Примечание: построено авторами по результатам моделирования

Примечание: построено авторами по результатам моделирования

Для обеспечения достоверности и воспроизводимости результатов исследования проведён комплекс процедур контроля качества:

- 1) Валидация метрологических данных – проверка точности измерений IoT-датчиков, включая синхронизацию временных меток и оценку систематических ошибок счётчиков.
- 2) Тестирование устойчивости модели – анализ чувствительности к пропускам данных и временным сдвигам (missing-robust test).
- 3) Независимая проверка расчётов – повторная обработка данных другим аналитиком или скриптом в формате «чёрного ящика» для исключения субъективных искажений.
- 4) Отчётность по стандарту IPMVP – документирование исходных серий, методик и кода расчётов с возможностью обезличенной верификации.

Эти меры обеспечивают высокую степень прозрачности, доверия и научной корректности проведённых расчётов.

Предложенная методология предполагает наличие исторических данных достаточной глубины и стабильности архитектуры сети. В энергосистемах с частыми реконфигурациями или изменением топологии фидеров возможно смещение оценок эффективности. Для корректного расчёта выбросов предпочтительно использование временных (почасовых) маргинальных коэффициентов, поскольку усреднённые значения могут как завышать, так и занижать эффект управления спросом. При отсутствии полного анализа жизненного цикла (LCA) экологический эффект отражает только операционную фазу функционирования оборудования.

Наряду с прямыми экономическими и экологическими результатами внедрение IoT-технологий в Smart Grid сопровождается и значимым социальным эффектом, который также должен учитываться в логике устойчивого развития. Социальная значимость цифровизации

энергосистемы проявляется прежде всего в повышении качества и надёжности электроснабжения для конечных потребителей. Снижение показателя SAIDI на 15 мин/клиент/год означает уменьшение средней продолжительности перебоев в подаче электроэнергии, что непосредственно влияет на качество жизни населения, устойчивость работы социальных объектов, малого бизнеса и цифровых сервисов.

Дополнительный социальный эффект связан с повышением прозрачности взаимодействия между энергокомпанией и потребителем. Использование интеллектуальных счётчиков АМІ позволяет обеспечить более точный и оперативный учёт потребления, минимизировать спорные ситуации при начислении платежей, а также расширить возможности для осознанного управления индивидуальным энергопотреблением. Это способствует укреплению доверия со стороны потребителей и повышает общую управляемость спроса.

Системы FLISR, в свою очередь, обеспечивают более быстрое обнаружение аварийных участков, их локализацию и восстановление электроснабжения, что особенно важно в условиях высокой социальной чувствительности к перебоям в электроснабжении. Для населения это означает сокращение времени отключений, а для операторов критической инфраструктуры – повышение устойчивости функционирования объектов здравоохранения, образования, связи и коммунального хозяйства. Таким образом, социальный эффект внедрения IoT в Smart Grid проявляется в повышении надёжности энергоснабжения, улучшении качества обслуживания потребителей, росте прозрачности расчётов и укреплении энергетической безопасности на уровне повседневного функционирования общества. В совокупности с экономическими и экологическими эффектами это подтверждает соответствие цифровизации сетевой инфраструктуры принципам устойчивого развития.

Представленные результаты наглядно демонстрируют, что внедрение IoT-инфраструктуры формирует комплексный мультипликативный эффект, включающий экономические, экологические и социальные преимущества. Экономический эффект обусловлен оптимизацией технологических процессов, управлением спросом и повышением надёжности; экологический – снижением углеродных выбросов и повышением энергоэффективности; социальный – улучшением качества электроснабжения, сокращением продолжительности отключений и повышением прозрачности взаимодействия между энергокомпанией и потребителями. Наибольший экономический вклад обеспечивают программы управления спросом, доля которых составляет свыше 60% совокупного эффекта, что согласуется с мировой практикой – гибкость нагрузки является ключевым фактором повышения эффективности генерации и снижения затрат на резервные мощности [24].

Значительный результат наблюдается и по направлению повышения надёжности, что выражается в сокращении показателей SAIDI и SAIFI и, как следствие, уменьшении недоотпуска электроэнергии. Эффект от снижения технических потерь также положителен, хотя его масштаб относительно ниже, однако он имеет критическое значение для распределительных сетей с высоким уровнем потерь и может возрастать при масштабировании проектов.

Экологический компонент, несмотря на сравнительно небольшой денежный эквивалент ( $\approx 2,76$  млн KZT/год), имеет стратегическое значение. Снижение выбросов почти в два раза соответствует международным тенденциям декарбонизации энергетики и способствует повышению устойчивости предприятий в условиях формирования углеродных рынков и усиления климатического регулирования.

Следует отметить, что в расчётах не учитывались немонетарные выгоды, такие как снижение коммерческих потерь и краж электроэнергии, оптимизация затрат на обслуживание, повышение прозрачности операций и доверия потребителей. Включение данных факторов в модель может существенно улучшить инвестиционный профиль проекта. В то же время сохраняются риски, связанные с высокими капитальными затратами, необходимостью модернизации ИТ-инфраструктуры и обеспечения кибербезопасности.

В целом результаты исследования подтверждают, что внедрение IoT-технологий

является эффективным инструментом повышения экономической, экологической и социальной устойчивости энергосистем. Полученные эффекты проявляются в снижении потерь и операционных затрат, сокращении выбросов CO<sub>2</sub>, а также в повышении качества и надёжности электроснабжения для конечных потребителей. В совокупности это позволяет рассматривать IoT как ключевой элемент формирования интеллектуальных сетей нового поколения, соответствующих требованиям цифровой и зелёной экономики и принципам устойчивого развития.

### Заключение

Проведённое исследование позволило подтвердить гипотезу о высокой эффективности интеграции IoT-технологий в инфраструктуру Smart Grid и её способности оказывать комплексное воздействие на экономические, экологические и социальные параметры функционирования энергосистемы. Полученные результаты демонстрируют, что при масштабе в 300 тыс. потребителей внедрение интеллектуальных систем (AMI, FLISR, DR) формирует совокупный эффект свыше 600 млн KZT в год, при этом достигается сокращение выбросов CO<sub>2</sub> почти в два раза по сравнению с базовым сценарием «Без IoT».

Таким образом, исследование вносит вклад в развитие научного знания в области цифровой энергетики и устойчивого управления энергоресурсами, предлагая обоснованную модель оценки экономических, экологических и социальных эффектов цифровизации сетей. Разработанный методический подход, основанный на интеграции показателей NPV, IRR, TCO и ΔCO<sub>2</sub>, а также на применении механизмов Difference-in-Differences и IPMVP Option C, подтверждает воспроизводимость и объективность результатов, что обеспечивает возможность его использования в аналогичных исследованиях и практических проектах.

С практической точки зрения, результаты исследования могут использоваться при формировании национальных программ цифровизации энергетики, разработке тарифных и инвестиционных механизмов поддержки Smart Grid, а также при подготовке ESG- и углеродной отчётности энергетических компаний.

В дальнейшем представляется целесообразным развитие исследования в направлениях:

- расширения модели до уровня национальной энергосистемы с учётом региональных различий в профилях нагрузки и выбросов;
- включения в расчёт жизненного цикла (LCA) IoT-оборудования для более полной экологической оценки;
- анализа сценариев углеродного ценообразования и его влияния на инвестиционную привлекательность цифровых проектов.

В совокупности полученные результаты подтверждают, что IoT-технологии выступают не только инструментом повышения эффективности энергосистем, но и важным фактором их устойчивой трансформации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Gungor V.C., Sahin D., Kocak T., et al., "Smart Grid and Smart Homes: Key Players and Pilot Projects," in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 6, no. 4, Dec. 2012. - P. 18-34
- 2 Fang X., Misra S., Xue G., Yang D. "Smart Grid – The New and Improved Power Grid: A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, no. 4, Fourth Quarter 2012. - P. 944-980
- 3 IEA. Electricity Grids and Secure Energy Transitions [Electronic resource]. – IEA, 2022/2023. - Available at: – URL: <https://www.iea.org/reports/electricity-grids-and-secure-energy-transitions> (accessed: 13.10.2025)
- 4 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), ed. Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press; 2023
- 5 U.S. DOE. Grid Modernization Multi-Year Program Plan – U.S. Department of Energy, 2016. – Available at: URL: <https://energy.gov/sites/prod/files/2016/01/f28/Grid%20Modernization%20Multi-Year%20Program%20Plan.pdf> (дата обращения: 13.10.2025)
- 6 ETIP SNET (European Technology & Innovation Platform Smart Networks for Energy Transition). R&I Roadmap 2020-2030. – European Union, 2020. – Available at: - URL: <https://smart-networks-energy->

- [transition.ec.europa.eu/sites/default/files/publications/Roadmap-2020-2030\\_June-UPDT.pdf](https://transition.ec.europa.eu/sites/default/files/publications/Roadmap-2020-2030_June-UPDT.pdf) (дата обращения: 13.10.2025)
- 7 Khanna A., Kaur S. Internet of Things (IoT), Applications and Challenges: A Comprehensive Review. *Wireless Pers Commun* 114, - 2020. - P.1687–1762
  - 8 Zanella A., Bui N., Castellani A., et al. "Internet of Things for Smart Cities," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 1, Feb. – 2014. - P. 22-32.
  - 9 S.S.R. Depuru, L.Wang, V. Devabhaktuni and N. Gudi, "Smart meters for power grid – Challenges, issues, advantages and status," 2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Phoenix, AZ, USA, - 2011, P. 1-7
  - 10 NERC. Reliability Considerations from Integration of Smart Grid. – December 2010. – Available at: - URL: [https://www.nerc.com/pa/RAPA/ra/Reliability%20Assessments%20DL/SGTF\\_Report\\_Final\\_posted\\_v1.1.pdf](https://www.nerc.com/pa/RAPA/ra/Reliability%20Assessments%20DL/SGTF_Report_Final_posted_v1.1.pdf) (дата обращения: 13.10.2025).
  - 11 Electric Power Research Institute (EPRI). Technology Innovation: Insights and Innovations. Third Quarter 2021 – Palo Alto, CA: EPRI, - 2021. – Available at: URL: <https://restservice.epri.com/publicdownload/000000003002023051/0/Product> (дата обращения: 13.10.2025)
  - 12 Uluski R., Borlase S. ISGT NA '24 Tutorial 3: Implementing Fault Location Isolation and Service Restoration (FLISR) on Distribution Circuits with High DER Penetration – Strategies for Success (Slides). – IEEE Power & Energy Society, 2024.
  - 13 Booth A., Mohr N., Peters P. The digital utility: New opportunities and challenges – McKinsey & Company, 2016. – Available at: - URL: <https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/the-digital-utility-new-opportunities-and-challenges> (дата обращения: 13.10.2025).
  - 14 Mohammadi M., Al-Fuqaha A., Sorour S., Guizani, M. Deep Learning for IoT Big Data and Streaming Analytics: A Survey // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2018. – Vol. 20, no. 4. – P. 2923–2960.
  - 15 International Organization for Standardization (ISO). ISO 14064-1:2018. Greenhouse gases – Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals – Geneva: ISO, 2018. – Available at: - URL: <https://www.iso.org/standard/66453.html> (accessed: 13.10.2025).
  - 16 International Organization for Standardization (ISO). ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. – Geneva: ISO, 2006. – Available at: - URL: <https://www.iso.org/standard/37456.html> (дата обращения: 13.10.2025).
  - 17 International Organization for Standardization (ISO). ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. – Geneva: ISO, 2006. – Available at: - URL: <https://www.iso.org/standard/38498.html> (дата обращения: 13.10.2025).
  - 18 World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development. GHG Protocol Scope 2 Guidance: An Amendment to the GHG Protocol Corporate Standard. – Washington, DC: WRI; Geneva: WBCSD, 2015. – Available at: - URL: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/Scope%202%20Guidance.pdf> (дата обращения: 13.10.2025).
  - 19 Efficiency Valuation Organization (EVO). International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP): Core Concepts. EVO 10000-1:2016. – Ottawa: EVO, 2016. – Available at: - URL: <https://evo-world.org/en/products-services-mainmenu-en/protocols/ipmvp> (дата обращения: 13.10.2025).
  - 20 International Energy Agency (IEA). Energy Statistics Data Browser: Transmission and distribution losses (electricity) – Paris: IEA, 2022. – Available at: - URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser> (дата обращения: 13.10.2025).
  - 21 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). IEEE Std 1366-2022. IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. – New York: IEEE. - 2022. – 44 p.
  - 22 Electric Power Research Institute (EPRI). Advanced Metering Infrastructure (AMI) Reference Architecture – Palo Alto, CA: EPRI, 2021. – Product ID: 3002021854. - Available at: - URL: <https://restservice.epri.com/publicattachment/91782> (дата обращения: 13.10.2025).
  - 23 Federal Energy Regulatory Commission (FERC). 2019 Assessment of Demand Response and Advanced Metering – Washington, DC: FERC, 2019. – Available at: - URL: [https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/DR-AM-Report2019\\_2.pdf](https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/DR-AM-Report2019_2.pdf) (дата обращения: 13.10.2025).
  - 24 Huang, W., Zhang, N., Kang, C. et al. From demand response to integrated demand response: review and prospect of research and application. *Prot Control Mod Power Syst* 4. - 2019. – P. 10-12

## SMART GRID ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ИНФРАҚҰРЫЛЫМЫНДА ІОТ ЕНГІЗУДІҢ ЭКОНОМИКАЛЫҚ, ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ӘЛЕУМЕТТІК ӘСЕРІН БАҒАЛАУ

### Аңдатпа

Мақалада Smart Grid дамыту аясында электр энергетикасы саласындағы Заттар интернеті (IoT) технологияларының әлеуеті қарастырылады. Зерттеудің мақсаты - IoT шешімдерін енгізудің экономикалық және экологиялық тиімділігін сандық бағалау, сондай-ақ олардың электрмен жабдықтаудың сенімділігін арттырудағы, пайдалану шығындарын азайтудағы және жаңартылатын энергия көздерін (ЖЭК) біріктірудегі әлеуметтік әсерін талдау. Зерттеу ақылды есептегіштерді (AMI), фидерлік сенсорларды, ақаулық деңгейіндегі ақпаратты қалпына

келтіру (FLISR) жүйелерін және сұранысқа жауап беру (DR) қызметтерін қоса алғанда, орташа және төмен вольтты тарату желілеріне бағытталған. Зерттеу әдістемесі өнімділікті бағалау модельдеріне (NPV, IRR, TCO, өтелу мерзімі), айырмашылықтардағы айырмашылықтарға және өлшеуді тексеруге арналған IPMVP C нұсқасы стандартына негізделген. Қоршаған ортаға әсерін бағалау үшін ISO 14064-1 және GHG хаттамасының шығарындыларын есептеу қолданылды. 50 000 ақылды есептегіші бар орта көлемді тарату компаниясы үшін сандық мысал келтірілген. Зерттеу нәтижелері IoT енгізу 300 000 тұтынушы үшін жылына 600 миллион теңгеден астам жиынтық экономикалық пайда әкелетінін, электр қуатымен жабдықтаудың сенімділігін арттыратынын және тұтынушыларға қызмет көрсетуді жақсартатынын көрсетеді. Қоршаған ортаға әсері CO<sub>2</sub> шығарындыларының айтарлықтай азаюында көрініс табады, ал әлеуметтік әсерге электр қуатын өшіру уақытының қысқаруы, есептеу ашықтығының артуы және соңғы пайдаланушылардың сенімінің артуы кіреді. Бұл зерттеудің практикалық маңыздылығы инвестициялық жоспарлауға, тарифтерді реттеуге және ESG есептілігіне қолданылатын қайталанатын бағалау моделін әзірлеуде жатыр. Осылайша, IoT негізіндегі желіні цифрландыру оның экономикалық және экологиялық тұрғыдан орындылығын растайды және электр энергетикасы секторын ұзақ мерзімді жаңғыртудың стратегиялық бағыты ретінде қарастырылуы керек.

**Негізгі сөздер:** IoT, Smart Grid, ақылды есептегіш, техникалық-экономикалық негіздеме, тұрақты даму, қоршаған орта қауіпсіздігі, әлеуметтік әсер.

## ASSESSING THE ECONOMIC, ENVIRONMENTAL, AND SOCIAL IMPACTS OF IoT IMPLEMENTATION IN THE SMART GRID ENERGY INFRASTRUCTURE

### Abstract

This article examines the potential of Internet of Things (IoT) technologies in the electric power industry in the context of Smart Grid development. The study aims to quantify the economic and environmental effectiveness of implementing IoT solutions, as well as to analyze their social impact on improving electricity supply reliability, reducing operating costs, and integrating renewable energy sources (RES). The study focuses on medium- and low-voltage distribution networks, including smart meters (AMI), feeder sensors, fault-level information recovery (FLISR) systems, and demand response (DR) services. The study methodology is based on performance assessment models (NPV, IRR, TCO, payback period), difference-in-differences, and the IPMVP Option C standard for measurement verification. ISO 14064-1 and GHG Protocol emissions calculations were used to assess the environmental impact. A numerical example is provided for a medium-sized distribution company with 50,000 smart meters. The study's results demonstrate that IoT implementation can achieve a cumulative economic benefit of over 600 million tenge per year for a base of 300,000 consumers, improve electricity supply reliability, and enhance customer service. The environmental impact is reflected in a significant reduction in CO<sub>2</sub> emissions, while the social impact includes shorter outage durations, increased metering transparency, and increased end-user trust. The practical significance of this study lies in developing a reproducible assessment model applicable to investment planning, tariff regulation, and ESG reporting. Thus, IoT-based network digitalization confirms its economic and environmental feasibility and should be considered a strategic direction for the long-term modernization of the electric power sector.

**Keywords:** IoT, Smart Grid, smart meter, feasibility study, sustainable development, environmental safety, social impact.

### REFERENCES

- 1 Gungor V.C., Sahin D., Kocak T., et al., "Smart Grid and Smart Homes: Key Players and Pilot Projects," in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 6, no. 4, Dec. 2012, P. 18-34 [in English]
- 2 Fang X., Misra S., Xue G., Yang D. "Smart Grid – The New and Improved Power Grid: A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, no. 4, Fourth Quarter 2012, P. 944-980 [in English]
- 3 IEA. Electricity Grids and Secure Energy Transitions [Electronic resource]. – IEA, 2022/2023. - Available at: – URL: <https://www.iea.org/reports/electricity-grids-and-secure-energy-transitions> [in English] (accessed: 13.10.2025)
- 4 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), ed. Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press; 2023. [in English]
- 5 U.S. DOE. *Grid Modernization Multi-Year Program Plan* – U.S. Department of Energy, 2016. – Available at: URL: <https://energy.gov/sites/prod/files/2016/01/f28/Grid%20Modernization%20Multi-Year%20Program%20Plan.pdf> [in English] (accessed: 13.10.2025)
- 6 ETIP SNET (European Technology & Innovation Platform Smart Networks for Energy Transition). R&I Roadmap 2020-2030. – European Union, 2020. – Available at: - URL: [https://smart-networks-energy-transition.ec.europa.eu/sites/default/files/publications/Roadmap-2020-2030\\_June-UPDT.pdf](https://smart-networks-energy-transition.ec.europa.eu/sites/default/files/publications/Roadmap-2020-2030_June-UPDT.pdf) [in English] (accessed: 13.10.2025)

- 7 Khanna A., Kaur S. Internet of Things (IoT), Applications and Challenges: A Comprehensive Review. *Wireless Pers Commun* 114, - 2020. - P.1687–1762. [in English]
- 8 Zanella A., Bui N., Castellani A., et al. "Internet of Things for Smart Cities," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 1, Feb. – 2014. - P. 22-32. [in English]
- 9 S.S.R. Depuru, L.Wang, V. Devabhaktuni and N. Gudi, "Smart meters for power grid – Challenges, issues, advantages and status," 2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Phoenix, AZ, USA, - 2011, P. 1-7
- 10 NERC. Reliability Considerations from Integration of Smart Grid. – December 2010. – Available at: - URL: [https://www.nerc.com/pa/RAPA/ra/Reliability%20Assessments%20DL/SGTF\\_Report\\_Final\\_posted\\_v1.1.pdf](https://www.nerc.com/pa/RAPA/ra/Reliability%20Assessments%20DL/SGTF_Report_Final_posted_v1.1.pdf) [in English] (accessed: 13.10.2025).
- 11 Electric Power Research Institute (EPRI). Technology Innovation: Insights and Innovations. Third Quarter 2021 – Palo Alto, CA: EPRI, - 2021. – Available at: URL: <https://restservice.epri.com/publicdownload/00000003002023051/0/Product> [in English] (accessed: 13.10.2025).
- 12 Uluski R., Borlase S. ISGT NA '24 Tutorial 3: Implementing Fault Location Isolation and Service Restoration (FLISR) on Distribution Circuits with High DER Penetration – Strategies for Success (Slides). – IEEE Power & Energy Society, 2024. [in English]
- 13 Booth A., Mohr N., Peters P. The digital utility: New opportunities and challenges – McKinsey & Company, 2016. – Available at: - URL: <https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/the-digital-utility-new-opportunities-and-challenges> [in English] (accessed: 13.10.2025).
- 14 Mohammadi M., Al-Fuqaha A., Sorour S., Guizani, M. Deep Learning for IoT Big Data and Streaming Analytics: A Survey // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2018. – Vol. 20, no. 4. – P. 2923–2960. [in English]
- 15 International Organization for Standardization (ISO). ISO 14064-1:2018. Greenhouse gases – Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals – Geneva: ISO, 2018. – Available at: - URL: <https://www.iso.org/standard/66453.html> [in English] (accessed: 13.10.2025).
- 16 International Organization for Standardization (ISO). ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. – Geneva: ISO, 2006. – Available at: - URL: <https://www.iso.org/standard/37456.html> [in English] (accessed: 13.10.2025).
- 17 International Organization for Standardization (ISO). ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. – Geneva: ISO, 2006. – Available at: - URL: <https://www.iso.org/standard/38498.html> [in English] (accessed: 13.10.2025).
- 18 World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development. GHG Protocol Scope 2 Guidance: An Amendment to the GHG Protocol Corporate Standard. – Washington, DC: WRI; Geneva: WBCSD, 2015. – Available at: - URL: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/Scope%202%20Guidance.pdf> [in English] (accessed: 13.10.2025).
- 19 Efficiency Valuation Organization (EVO). International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP): Core Concepts. EVO 10000-1:2016. – Ottawa: EVO, 2016. – Available at: - URL: <https://evo-world.org/en/products-services-mainmenu-en/protocols/ipmvp> [in English] (accessed: 13.10.2025).
- 20 International Energy Agency (IEA). Energy Statistics Data Browser: Transmission and distribution losses (electricity) – Paris: IEA, 2022. – Available at: - URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser> [in English] (accessed: 13.10.2025).
- 21 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). IEEE Std 1366-2022. IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. – New York: IEEE, - 2022. – 44 p. [in English]
- 22 Electric Power Research Institute (EPRI). Advanced Metering Infrastructure (AMI) Reference Architecture – Palo Alto, CA: EPRI, 2021. – Product ID: 3002021854. - Available at: - URL: <https://restservice.epri.com/publicattachment/91782> [in English] (accessed: 13.10.2025).
- 23 Federal Energy Regulatory Commission (FERC). 2019 Assessment of Demand Response and Advanced Metering – Washington, DC: FERC, 2019. – Available at: - URL: [https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/DR-AM-Report2019\\_2.pdf](https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/DR-AM-Report2019_2.pdf) [in English] (accessed: 13.10.2025).
- 24 Huang, W., Zhang, N., Kang, C. et al. From demand response to integrated demand response: review and prospect of research and application. *Prot Control Mod Power Syst* 4, - 2019. – P. 10-12. [in English]

#### Information about authors:

Yerzhan Domalatrov - **corresponding author**, Master of Economics Sciences, PhD Candidate, Senior Lecturer of the Department of Economics, Management and Finance, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, 070000, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

E-mail: [domalatrovkz@gmail.com](mailto:domalatrovkz@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9955-9282>

Katipa Chezhibayeva - Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Telecommunication Engineering, Non-profit Joint Stock Company "Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev", 050000, Almaty, Republic of Kazakhstan

E-mail: [k.chezhibayeva@aes.kz](mailto:k.chezhibayeva@aes.kz)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1661-2226>

Makpal Zharkymbekova - Master of Physics, PhD student of the Department of Electric Power Engineering, Non-profit Joint Stock Company "Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev", 050000, Almaty, Republic of Kazakhstan

E-mail: [makpal.87\\_87@mail.ru](mailto:makpal.87_87@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2285-8716>

Markhabat Sakitzhanov - Master of Technical Sciences, PhD student of the Department of Electric Power Engineering, Non-profit Joint Stock Company "Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev", 050000, Almaty, Republic of Kazakhstan

E-mail: [m.sakitzhanova@aes.kz](mailto:m.sakitzhanova@aes.kz)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0955-8938>

#### Информация об авторах:

Ержан Домалатов - **основной автор**, магистр экономических наук, PhD-кандидат, сеньор-лектор кафедры экономики, менеджмента и финансов НАО «Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова», 070000, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

E-mail: [domalatovkz@gmail.com](mailto:domalatovkz@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9955-9282>

Катиша Чежимбаева - кандидат технических наук, профессор кафедры телекоммуникационной инженерии НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», 050000, г. Алматы, Республика Казахстан

E-mail: [k.chezhibayeva@aes.kz](mailto:k.chezhibayeva@aes.kz)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1661-2226>

Макпал Жаркымбекова - магистр физики, докторант PhD кафедры энергообеспечения, электропривода и электротехники НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», 050000, г. Алматы, Республика Казахстан

E-mail: [makpal.87\\_87@mail.ru](mailto:makpal.87_87@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2285-8716>

Мархабат Сакитжанов - магистр технических наук, докторант PhD кафедры электроэнергетики НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», 050000, г. Алматы, Республика Казахстан

E-mail: [m.sakitzhanova@aes.kz](mailto:m.sakitzhanova@aes.kz)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0955-8938>

#### Авторлар туралы ақпарат:

Ержан Домалатов - **негізгі автор**, экономика ғылымдарының магистрі, PhD кандидаты, экономика, менеджмент және қаржы кафедрасының сеньор-лектор, «Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті» КЕАҚ, 070000, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы

E-mail: [domalatovkz@gmail.com](mailto:domalatovkz@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9955-9282>

Катиша Чежимбаева – техника ғылымдарының кандидаты, телекоммуникация инженериясы кафедрасының профессоры, «Гұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» КЕАҚ, 050000, Алматы қ., Қазақстан Республикасы

E-mail: [k.chezhibayeva@aes.kz](mailto:k.chezhibayeva@aes.kz)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1661-2226>

Мақпал Жаркымбекова - физика магистрі, электроэнергетика кафедрасының PhD докторанты, «Гұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» КЕАҚ, 050000, Алматы қ., Қазақстан Республикасы

E-mail: [makpal.87\\_87@mail.ru](mailto:makpal.87_87@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2285-8716>

Мархабат Сакитжанов - техника ғылымдарының магистрі, электроэнергетика кафедрасының PhD докторанты, «Гұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» КЕАҚ, 050000, Алматы қ., Қазақстан Республикасы

E-mail: [m.sakitzhanova@aes.kz](mailto:m.sakitzhanova@aes.kz)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0955-8938>