

Управление спросом в автономных микросетях электроснабжения в Нигерии: теоретико-игровой подход

Расин Диатта, Родика Луазель*, Лайонел Ришфор

Нантский университет, Лемна, F-44000 Нант, Франция

Аннотация

Большинство развивающихся стран по-прежнему сталкиваются с проблемами доступа к устойчивой энергетике. В данном исследовании рассматривается система солнечных панелей и аккумуляторных батарей для городской автономной микросети в Нигерии, где гибкость спроса и стратегическое взаимодействие между домохозяйствами и коммунальными предприятиями могут оптимизировать масштаб системы. Построена нелинейная модель программирования с использованием двухуровневой формулировки задачи, которая учитывает как готовность домохозяйств сократить потребление энергии, так и согласие коммунального предприятия на предоставление ценовых скидок. Результаты показывают, что для энергетического сообщества из 10 домохозяйств с годовым потреблением энергии 7,8 МВт·ч требуется система солнечного хранения избыточной мощности (12 кВт·ч фотоэлектрических солнечных панелей и 26 кВт·ч аккумуляторных батарей). Расчетная средняя стоимость в 0,31 €/кВтч в три раза выше текущего тарифа, что делает его недоступным для большинства нигерийских домохозяйств. Для решения этой задачи энергоснабжающая компания могла бы внедрить программы управления спросом с прямым регулированием нагрузки, которые откладывают использование определенных бытовых приборов, таких как вентиляторы, утюги и кондиционеры. Если эти меры снизят общий спрос на 5%, то как требуемый масштаб системы, так и общие затраты могут значительно снизиться, примерно на треть. Эта корректировка приведет к снижению тарифа до 0,20 €/кВтч. Когда управление спросом осуществляется путем переговоров между энергоснабжающей компанией и домохозяйствами, объем снижения нагрузки оказывается меньше. Это связано с тем, что домохозяйства испытывают дискомфорт из-за ограничений и, как правило, не так охотно проявляют гибкость. Однако переговоры позволяют добиться большей гибкости, чем прямое регулирование, благодаря динамичному взаимодействию и более активному участию потребителей в переходе к надёжному энергоснабжению в будущем. Тем не менее, тарифы остаются выше текущих рыночных цен. Автономные контракты могут стать конкурентоспособными, если будет оказана финансовая поддержка, такая как льготные кредиты и капитальные субсидии, покрывающие до 75% первоначальных затрат.

Ключевые слова: теория игр; гибкость в потреблении электроэнергии; микросети

0 Введение

Одна из главных задач сегодня — обеспечение всеобщего доступа к чистой и устойчивой энергии, особенно для населения развивающихся стран, большинство из которых расположены в тропических регионах [1,2]. Доступ к электроэнергии, в частности, является одним из центральных столпов социально-экономического развития [3,4], которое должно способствовать удовлетворению, по крайней мере, основных потребностей, таких как освещение, доступ к образованию и свежим продуктам питания, а также здравоохранение, получение дохода и создание рабочих мест [4]. Более 600 миллионов человек во всем мире по-прежнему не имеют доступа к электричеству, при этом уровень электрификации значительно варьируется в зависимости от региона: от почти 100% в Северной Африке до 45% в странах Африки к югу от Сахары (за исключением Южной Африки) и всего 25% в некоторых сельских районах [5,6].

Децентрализованные возобновляемые энергетические системы, такие как солнечные фотоэлектрические (PV) панели, ветряные турбины и малые гидроэлектростанции, являются

одними из наиболее подходящих и доступных технологий для ускорения прогресса в направлении всеобщего доступа к современным энергетическим услугам к 2030 году в соответствии с 7-й Целью устойчивого развития Организации Объединенных Наций. Африка богата возобновляемыми энергетическими ресурсами, особенно солнечной энергией [7]. В последние годы стремительный прогресс в энергетических технологиях и информационно-коммуникационных технологиях в сочетании со значительным снижением цен на солнечное оборудование создали новые возможности для доступа к чистой и устойчивой энергии.

Данное исследование посвящено микросетям, оснащенным солнечными фотоэлектрическими панелями, в городах Африки к югу от Сахары. Хотя городские домохозяйства, как правило, имеют более высокий уровень электрификации, чем сельские дома, они все еще сталкиваются со значительными сложностями. К ним относятся плохое качество обслуживания из-за нестабильной сети, ненадежное энергоснабжение и низкая генерирующая мощность, а также частые отключения электроэнергии и перебои в подаче [8]. Домохозяйства, расположенные вблизи или полностью вне сети, часто не имеют доступа к электричеству, особенно в пригородных районах. Более половины городского населения проживает в неформальных поселениях, что составляет не менее 110 миллионов человек [9]. Кроме того, высокие затраты на подключение являются серьезным препятствием для доступа к сети [10], что часто побуждает некоторых пользователей к незаконным подключениям к сети, что приводит к значительным потерям доходов для коммунальных предприятий [6].

Большая часть литературы по вопросам доступа к энергии в развивающихся странах сосредоточена на автономной и не подключенной к сети электрификации сельских районов. В этих исследованиях обычно используются математические модели и методы оптимизации для определения масштабов гибридных ветровых и солнечных систем с аккумуляторными батареями [11-14]. Основная цель — оптимизация конструкции системы при обеспечении надежного электроснабжения с минимальными затратами энергии. В данной работе рассматриваются не только масштабы технологий, но и стратегии, которые коммунальные предприятия и домохозяйства могут использовать для согласования тарифов и оптимального распределения электроэнергии.

Теория игр широко используется в научной литературе для моделирования взаимодействий между участниками, особенно в кооперативных играх, таких как игры Штакельберга, Нэша и формирование коалиций между пользователями, агрегаторами и коммунальными предприятиями. Например, [15] разработал подход к оптимизации на основе коалиционных игр, продемонстрировав, что домохозяйства, оснащенные гибридными системами возобновляемой энергии и хранения, могут значительно снизить затраты на электроэнергию за счет совместного использования и торговли энергией. Аналогично, [16] применили теорию кооперативных игр к взаимосвязанным микросетям, что привело к снижению затрат и облегчило обмен электроэнергией между сообществами. [17,18] расширили децентрализованные подходы к оптимизации планирования и координации микросетей, разработав трехуровневую стратегию, применяемую к интеллектуальным зданиям и паркам электромобилей. Некооперативные игры также применялись к интеллектуальным сетям, например, в конфигурациях одноранговой торговли [19] и в более крупных масштабах в распределенном управлении энергетическими ресурсами [20,21].

Большинство подходов, основанных на переговорах, включают программы управления спросом для оценки технического потенциала энергосистем по удовлетворению спроса при снижении мощности. Эти стратегии особенно важны в развивающихся странах, где доступность и участие сообщества имеют решающее значение для исправности энергетических систем. Методы управления спросом и интеллектуального управления сетями охватывают широкий спектр подходов, от моделей с пассивными потребителями и прямым управлением нагрузкой до моделей с участием активных потребителей, которые реагируют на тарифные опции [22-24]. Реагирование

на спрос на основе стимулов широко разрабатывается с использованием игр Штакельберга, где оператор распределительной системы выступает в роли лидера, а производители-потребители — в роли последователей [25]. Этот иерархический подход координирует реакцию сообщества на сигналы сети и способствует эффективному управлению спросом. Значительный объем работ [18, 26, 27] подчеркивает потенциал многоагентных систем принятия решений для управления динамическим планированием нагрузки, распределения накопителей и затрат. Инновационные многоцелевые алгоритмы, основанные на метаэвристических методах и методах искусственного интеллекта, разработаны в [28] для применения на уровне квартир и зданий, а в [17] — для координации нескольких микросетей в более крупном масштабе. Кроме того, разработаны сложные модели управления энергопотреблением в домах, учитывающие неопределенности, которые могут возникнуть в бытовых установках [29].

Большинство исследований признают технические и экономические преимущества интеграции управления спросом в работу микросетей, сообщая об улучшении управления нагрузкой, снижении пиковых нагрузок и экономии средств. В численном выражении домохозяйства, оснащенные гибридными системами возобновляемой энергии и хранения, могут добиться снижения затрат на электроэнергию на 20% согласно [15] и до 29%, как сообщается в [26]. В отличие от этого, другие исследования указывают на умеренную экономию, варьирующуюся от 2,4% до 11,8%, как задокументировано в [16]. Сообщаемые сокращения различаются в разных исследованиях по масштабу и показателям, в то время как некоторые исследования акцентируют внимание на потенциале планирования и перераспределения нагрузки, а не на прямой экономии средств [29], что ограничивает сопоставимость результатов.

Литература по микросетям и развитию интеллектуальных сетей в странах Африки к югу от Сахары значительно расширилась. Например, в работе [1] оценивается стоимость автономного солнечного фотоэлектрического проекта в сельской местности Нигерии и демонстрируется, что такие автономные решения часто экономически нецелесообразны по сравнению с традиционными контрактами на подключение к сети, которые получают государственные субсидии. В отличие от этого, в работе [30] оценивается влияние гибридных фотоэлектрических систем с дизельным двигателем на частный сектор Нигерии, и установлено, что эти системы могут привести к повышению надежности и значительной экономии средств. Исследование [31] показало, что стратегии перераспределения нагрузки в автономных микросетях на солнечной энергии могут снизить пиковую нагрузку на 24% в тематическом исследовании электрификации сельских районов Танзании. В аналогичном контексте, [32] рассматривает программы оптимизации гибридных автономных микросетей в сельских районах стран Африки к югу от Сахары, подчеркивая важность долгосрочной жизнеспособности, доступности и социальной приемлемости. Между тем, [33] количественно оценивает влияние субсидий на оптимальное проектирование и доступность микросетей, подчеркивая их важнейшую роль в обеспечении равного доступа к электроэнергии.

Хотя большая часть исследований сосредоточена на автономной электрификации сельских районов, развитию автономных микросетей в городских районах по-прежнему уделяется ограниченное внимание. В работе [8] исследовались мини-сети и автономные системы для оценки затрат, связанных с городской и сельской электрификацией в странах Африки к югу от Сахары, а также их прогнозируемого развития к 2030 году. Аналогично, в работе [34] рассматривалась взаимосвязь между решениями по расширению сети и автономными способами доступа к электроэнергии в городских и сельских районах стран Африки к югу от Сахары, а также анализировалось состояние знаний о гибридизации городской электроэнергии. Однако эти анализы не затрагивают вопросы реагирования на спрос, управления спросом или их влияния на уровне домохозяйств или сообществ.

Несмотря на технологические достижения, социально-экономические факторы, играющие решающую роль в формировании участия в управлении спросом, по-прежнему недостаточно

представлены в литературе. Большинство исследований в основном сосредоточены на технических аспектах, акцентируя внимание на операционной эффективности, интеграции возобновляемых источников энергии и внедрении управления спросом, уделяя лишь частичное внимание благосостоянию пользователей. Лишь ограниченное число работ рассматривает поведенческие параметры, которые побуждают домохозяйства сокращать потребление электроэнергии, путем явного моделирования дискомфорта пользователей, поведенческих стимулов или влияния участия сообщества. Например, [18,35,36] включают потребительские предпочтения и затраты на неудобства непосредственно в процесс оптимизации, в то время как [37] вводит дискомфорт пользователей в функции полезности, моделируя компромисс между экономией энергии и качеством обслуживания. Обзоры и анализ политики [38-40] подчеркивают критическую важность социального принятия и энергетической справедливости, особенно с учетом острых проблем доступа и доступности, с которыми сталкиваются неформальные поселения и пригородные районы. В этих источниках утверждается, что долгосрочный успех управления спросом и развертывания микросетей зависит не только от технических инноваций, но и от эффективного решения социально-экономических реалий и нормативно-правовой среды, особенно в быстро урбанизирующихся регионах, таких как страны Африки к югу от Сахары.

Для сравнительного анализа в таблице 1 собраны различные подходы в области интеллектуальных энергосетей, использующие теорию игр, применяемую к микросетям, с учетом потребностей и ограничений развивающихся стран. Эти подходы были выбраны на основе того, как они объединяют инновационные методы оптимизации для повышения эффективности управления спросом, учитывают поведение и дискомфорт пользователей, а также включают социально-экономические факторы.

Успех этих моделей в значительной степени зависит от местных условий, включая энергетическую инфраструктуру и нормативно-правовую политику, что требует эмпирических данных для адаптации к специфическим потребностям и условиям каждого региона. Наше исследование мотивировано применением теоретико-игрового моделирования к микросетям с управлением спросом, реалистично примененным к конкретному случаю развивающейся страны. Цель состоит в том, чтобы предоставить заинтересованным сторонам в области перехода к надёжному энергоснабжению в будущем информацию о масштабах потребностей в инвестициях, вариантах перераспределения потребления бытовой техники домохозяйствами и тарифных схемах энергоснабжающих компаний, которые будут внедрены.

В соответствии с существующей литературой, в данном исследовании используется теория игр для изучения городской автономной микросети и разрабатывается нелинейная двухуровневая оптимизационная модель. Энергетическая система состоит из солнечных фотоэлектрических панелей и батарей, которые вместе обеспечивают надежное электроснабжение. В качестве примера рассматривается автономная микросеть в штате Гомбе, Нигерия, а результатом оценки является полная приведенная стоимость электроэнергии (LCOE). Предложенная модель вводит в задачу определения масштабов системы коммунальные услуги и социально-экономические ограничения, включая соображения стоимости системы. Что касается регулирования, государственной и частной финансовой поддержки, численные результаты предоставляют рекомендации по внедрению, которые соответствуют национальной и региональной энергетической политике. Следует отметить следующие вклады в соответствующую литературу:

В исследовании представлена контекстуализированная реализация моделей теории игр. Учитывая признанные ограничения в доступности данных, значительные усилия были направлены на сбор данных о моделях энергопотребления и возобновляемых источниках энергии, что позволило точно откалибровать модель. Полученная подробная база данных включает почасовые профили как потенциала солнечной энергии, так и потребления электроэнергии домохозяйствами за годичный период.

Модели, основанные на теории игр, обычно предполагают рациональное поведение, которое не всегда отражает реальные условия. Включение поведенческих факторов в исследование учитывает реалистичные социальные предпочтения, которые могут влиять на управление спросом. Потенциал изменения структуры спроса оценивается более реалистично за счет разложения бытовых нагрузок на конкретные виды использования устройств и учета продолжительности задержки включения основных бытовых приборов, особенно в сухой жаркий сезон, таких как вентиляторы, утюги и кондиционеры.

В данном исследовании, путем оценки осуществимости сложных игровых теоретических моделей в условиях реальных ограничений, определяются тарифные условия, которые оптимально соответствуют политике возмещения затрат коммунального предприятия, равновесию спроса и предложения, а также конкретным социально-экономическим критериям для изменения потребления отдельных бытовых приборов.

В исследовании тщательно анализируются ограничения, с которыми сталкивается энергоснабжающая компания при поддержании бесперебойного электроснабжения, а также соображения домохозяйств относительно дискомфорта, вызванного снижением спроса на энергию. Результаты моделирования подчеркивают важность социальных и экономических факторов в переговорах между домохозяйствами и энергоснабжающей компанией. Показано, что процесс переговоров имеет важное значение для будущего взаимодействия между участниками в городских районах стран Африки к югу от Сахары, поскольку он обеспечивает как доступные по цене солнечные микросети, так и эффективные механизмы распределения электроэнергии.

Таблица 1. Сравнительные исследования, посвященные оптимизации систем, управлению энергосетями с использованием методов управления спросом и теории игр.

Reference	Method	Contributions	Limitations
[1]	Case study on off-grid photovoltaic systems	Off-grid PV systems are viable solutions to improve electricity access in Nigeria, especially in rural areas	Focus on technical viability; limited socio-economic analysis
[11]	Optimization modeling for hybrid PV/wind systems sizing	Provides optimized sizing methods for off-grid hybrid systems to improve reliability and cost-effectiveness	Focus on technical optimization; lacks social considerations
[13]	Optimization sizing model for hybrid solar-wind systems	Proposes an improved model for sizing hybrid systems to enhance efficiency and reduce costs	Early model; recent technological advances are not incorporated
[14]	Methodology development for sizing hybrid PV/diesel/battery systems	Theoretical model for economic sizing of hybrid systems; improves cost-effectiveness in off-grid areas in Columbia	Demand Response programs are not integrated
[15]	Coalitional game theory for cost optimization in smart grid communities	Shows cost savings and fair cost allocation via coalition formation	Assumes rational actors; real-world coalition dynamics may be different
[16]	Cooperative game approach for interconnected microgrids	Demonstrates improved energy management and cost sharing among microgrids	May not scale well with many microgrids or heterogeneous participants
[17]	Robust ADMM-enabled decentralized optimization	Enables secure, decentralized coordination of microgrids with robustness to uncertainties	Users' disutility from flexibility provision is not accounted for
[18]	Three-layer game theoretic scheduling for microgrids	Unlocks Demand Response potential in smart buildings and EV fleets; improves scheduling efficiency	Implementation complexity; depends on accurate modeling of building/EV behavior
[19]	Review of game theoretic approaches for peer-to-peer energy trading	Highlights potential of game theory for P2P trading to increase flexibility and user engagement	Mostly theoretical; practical deployment challenges remain
[20]	Non-cooperative game theory for energy management in retail markets	Addresses renewable resource uncertainties and market dynamics in energy districts	Non-cooperative models may not achieve optimal social welfare
[21]	Evolutionary game approach for smart grid energy scheduling	Models adaptive, decentralized energy consumption strategies	May be sensitive to parameter choices; real-world validation needed
[22]	Optimal sizing for microgrid with seawater electrolysis and Demand Response	Integrates seawater electrolysis and time-based Demand Response for remote Japanese microgrid	Site-specific; limited generalizability
[23]	Optimization of microgrid components under high renewables and DR	Proposes optimal sizing/siting considering DR and high renewable penetration	Model-based; may not capture all operational realities
[24]	Size optimization and DR for stand-alone renewable systems	Optimizes size and Demand Response for off-grid renewables	Focuses on technical aspects; social/behavioral factors not included
[25]	Stackelberg game for incentive-based Demand Response	Designs incentives for DR using hierarchical game theory	Assumes rational response to incentives; may not reflect actual user behavior
[26]	Energy optimization in smart buildings via DSM	Proposes efficient demand side management for urban buildings	May require advanced metering and automation infrastructure
[27]	Game theory for multi-microgrid energy management with DR and storage	Improves coordination and cost savings among microgrids	Complexity increases with number of microgrids and DR programs
[28]	Multi-objective cockroach swarm algorithm for apartment energy management	Enhances energy management in apartments using bio-inspired optimization	Algorithm performance may depend on real-world characteristics
[29]	Robust home energy management with real-time pricing and electrical vehicles	Considers real-time prices and vehicle-to-grid for home energy management	Assumes user participation and EV availability; may not generalize
[31]	Case study and techno-economic analysis of demand-side management in off-grid solar microgrids	DSM strategies (load shifting, pricing) can significantly improve system reliability and cost-effectiveness for rural electrification in Tanzania	Case-specific; generalizability to other regions or larger systems may be limited
[35]	Stackelberg game-theoretic optimization for integrated energy systems with Demand Response	Stackelberg game approach improves scheduling under renewable uncertainty and Demand Response	Theoretical; real-world implementation and user behavior not fully explored
[36]	AI-based optimization for multi-renewable energy systems to reduce carbon emissions	AI methods can enhance emission reduction and system efficiency in multi-renewable setups	Model-based; practical deployment and scalability not addressed
[37]	Optimization of Demand Response considering appliance-level scheduling	Appliance-level DR can optimize grid performance and user costs	Focuses on technical optimization; user acceptance and behavior not included

Таблица 1 (продолжение)

Reference	Method	Contributions	Limitations
[49]	Nash-Stackelberg game for regional energy market with Demand Response	Game-theoretic approach improves market efficiency and user participation	Theoretical; practical implementation and user heterogeneity not fully addressed
[50]	Real-time Demand Response algorithm using Stackelberg game	Enables effective real-time DR in smart grids; leader-follower dynamics modeled	Assumes rational actors; field validation needed
[51]	Game-theoretic model for optimal time-of-use pricing	Improves demand-side management and system efficiency through dynamic pricing	Model-based; may not capture all consumer behavior
This paper	Stackelberg game bi-level model of utility and households, with price rebates and Demand Response programs	Leader-follower dynamics modeled for PV-battery microgrid sizing in peri-urban areas in Nigeria. Discomfort accounted into household utility function	Assumptions on households' willingness to curtail loads; field validation needed

Дальнейшая структура исследования выглядит следующим образом. В разделе 1 описывается городская автономная микросеть и элементы энергетической системы. В разделе 2 представлена математическая формулировка задач оптимизации масштабов системы. В разделе 3 обсуждаются

результаты моделирования с точки зрения эффективности модели на примере конкретного случая, за которыми следует анализ чувствительности. Раздел 4 завершается рекомендациями.

1 Пример из практики

Солнечная энергия важна для Африки, и страны Африки к югу от Сахары, в частности, получают больше всего солнечного света, солнечного излучения и теплой погоды (25-28 °C). Тем не менее, внедрение солнечной энергии остается незначительным в энергетическом балансе. В Африке установлено всего 5 ГВт солнечных фотоэлектрических мощностей, что составляет менее 1% от мировой установленной мощности. Согласно варианту моделирования IAE для Африки, солнечная фотоэлектрическая энергия станет крупнейшим источником электроэнергии на континенте, превзойдя гидроэнергетику и природный газ [6], благодаря быстрому расширению как подключенных к сети, так и автономных микросетевых систем. В последние годы прогресс в электрификации был достигнут за счет расширения сети, которое было вызвано такими факторами, как плотность населения, высокий долгосрочный спрос и пиковые нагрузки. В настоящее время автономные солнечные фотоэлектрические системы или автономные микросети дополняют расширение центральной сети, особенно в сельских районах стран Африки к югу от Сахары [8]. Создание микросетей может ускорить доступ к электроэнергии, поскольку 100 000–200 000 микросетей могут обеспечить электроэнергией около 140 миллионов сельских жителей Африки к 2040 году [41].

В качестве примера рассматривается микросеть в штате Гомбе, расположенном на северо-востоке Нигерии, который имеет самый низкий уровень доступа к электроэнергии (26%) и самый высокий средний уровень бедности (76%) среди шести геополитических зон страны.

1.1 Предварительный подсчёт ресурсозатрат

Потенциал солнечной энергии в Гомбе оценивается с помощью общедоступной базы данных Renewables ninja, разработанной Имперским колледжем Лондона и группой по энергетической и технологической политике ETH Zurich,¹ <https://www.renewables.ninja/>. Шаг по времени — час, а выходная мощность определяется погодными условиями в каждой геопространственной координате. Мы выбираем солнечную фотоэлектрическую панель с номинальной мощностью 1 кВт, азимутальной ориентацией 180°, без системы слежения за солнцем и наклоном 35°. В данном случае изменчивость профиля солнечной энергии является обусловленной [42], тогда как для получения случайной изменчивости можно использовать стохастические методы [43]. Оценочная схема выходной мощности солнечных фотоэлектрических систем используется в качестве входных данных для определения оптимального размера автономной солнечной фотоэлектрической/аккумуляторной системы. На рис. 1 показана схема выходной мощности фотоэлектрических систем 1 кВтп и 1508 кВт·ч выработки электроэнергии в год, с пиками 0,8 кВт в сухой сезон (с ноября по март) и 0,5 кВт в сезон дождей (с апреля по октябрь).

1.2 Оценка требуемой нагрузки

В странах Африки к югу от Сахары среднее годовое потребление электроэнергии на душу населения колеблется от 50 кВт·ч в сельской местности до 200 кВт·ч в городах [5]. Потребление электроэнергии в жилых домах Нигерии основано на данных о нагрузке, собранных в 2016 году [44], где суммарная нагрузка определяется с использованием метода восходящего проектирования, учитывающего такие параметры, как количество домохозяйств, категории и количество приборов, номинальная мощность прибора, а также время работы и временные окна для каждого типа городских и сельских домохозяйств. Поскольку в [44] предполагались схожие характеристики нагрузки для типичных будних и выходных дней, 52 недели (будние и выходные дни) считаются показательными для почасовой нагрузки [45].

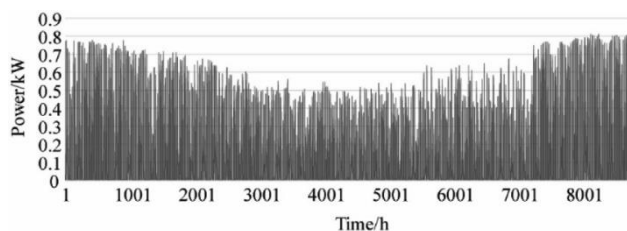


Рис. 1. Почасовая выработка электроэнергии фотоэлектрическими системами за один год (Источник: по данным Renewables ninja).

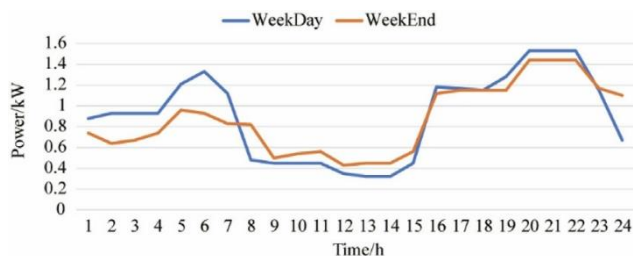


Рис. 2. Схема суточной нагрузки городского домохозяйства в среднестатистический будний и выходной день [44].

Затем еженедельные нагрузки преобразуются в представленную схему нагрузки для домохозяйства с учетом демографических характеристик (средний размер домохозяйства в городской местности, доля городского населения в общей численности населения). Затем это преобразуется в схему нагрузки для сообщества из 10 домохозяйств, что соответствует размеру потребности в электроэнергии нашей автономной системы. Мы предполагаем, что средний размер городского домохозяйства составляет пять человек, что соответствует данным Национального бюро статистики Нигерии, и что городское население составляет 48% от общей численности населения [46]. На рис. 2 показана суточная схема нагрузки городского домохозяйства, где синие и красные линии представляют нагрузку в будние и выходные дни соответственно. Общее суточное потребление электроэнергии в сообществе из 10 домохозяйств составляет 22 кВт·ч в будние дни (20 кВт·ч в выходные дни), с максимальным пиком в 1,53 кВт (1,44 кВт в выходные дни).

Кроме того, потребление электроэнергии классифицируется по типам приборов, которые представляют собой основные энергетические услуги, как определено в [6]² Основные энергетические услуги включают в себя услуги электроснабжения (например, несколько лампочек, зарядка телефона, радио, вентилятор или телевизор) и современные экологически чистые кухонные приборы и топливо (например, природный газ, сжиженный нефтяной газ, электричество, биоэтанол и биогазовые системы, а также усовершенствованные печи на биомассе): кондиционер, электрический вентилятор, кухонная техника, аудиовизуальное оборудование, электрический утюг, освещение и другие (холодильные приборы, сушилка для белья и стиральная машина). В Приложении А показана годовая потребность в электроэнергии для каждого прибора, и указано, что тремя крупнейшими бытовыми приборами являются кондиционеры, электрические вентиляторы и осветительные приборы. В преддверии управления спросом мы исследуем типы устройств, которые могут привести к восстановлению или увеличению нагрузки после события, связанного с реагированием на спрос.

Если нельзя отложить или перенести использование прибора на более позднее время, говорят, что он имеет характеристики невозстанавливаемой нагрузки. Мы делим устройства на две категории: тип 1 (освещение, кухонная техника, аудио- и видеотехника и электрические утюги, на которые приходится 36% годового потребления электроэнергии) и тип 3 (кондиционеры и электрические вентиляторы, на которые приходится 62% от общего объема, в основном из-за тропического климата Нигерии, где температура и влажность меняются в зависимости от сезона, то есть от сухого

или дождливого). Все устройства типа 3, а также электрический уют из класса 1, могут быть включены в программу перераспределения энергопотребления. Следует отметить, что устройства типа 2 (стиральная машина, посудомоечная машина и электромобиль), упомянутые в [44], не распространены в представленном домохозяйстве и поэтому не включены.

2 Постановка задачи

2.1 Стоимость элементов системы

В литературе по расчету размеров децентрализованных энергетических систем используются различные экономические критерии (стоимость жизненного цикла, общая годовая стоимость и нормированная стоимость энергии) [11]. Годовая стоимость системы (уравнения (1)-(9)) и LCO E (уравнение (10)) являются финансовыми критериями, используемыми в данном исследовании для определения структуры автономной системы:

$$ACS = (CC_{pv} + CC_{bat}) \times CRF(d, L) + (RC_{bat}) \times CRF(d, L) + (OM_{pv} + OM_{bat}) \quad (1)$$

Переменные CC , OM и RC представляют собой капитальные затраты, ежегодные затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание и затраты на замену соответственно. Автономная система состоит из солнечных фотоэлектрических панелей и аккумуляторного хранилища, которые обозначаются индексами PV и Bat. Фактор возврата капитала, $CRF(d, L)$, представляет собой приведенную стоимость ежегодных выплат, которая зависит от реальной процентной ставки (d) и срока службы проекта, L [14]:

$$CRF(d, L) = \frac{d(1 + d)^L}{(1 + d)^L - 1} \quad (2)$$

Первоначальная стоимость преобразуется в годовую стоимость по формуле CRF , где годовая стоимость солнечных фотоэлектрических панелей и батареи является первым членом в уравнении (1).

Затраты на инвестиции в фотоэлектрические панели, а также на ежегодную эксплуатацию и техническое обслуживание приведены в уравнениях (3) и (4):

$$CC_{pv} = c_{pv} \times K_{pv} \quad (3)$$

$$OM_{pv} = \phi_{pv} \times CC_{pv} \quad (4)$$

где c_{pv} [€/кВтп] обозначает стоимость фотоэлектрической системы за киловатт пиковой мощности, K_{pv} [кВтп] — мощность фотоэлектрической системы, а ϕ_{pv} — доля затрат на эксплуатацию фотоэлектрической системы в общих капитальных затратах. Мы считаем, что срок службы проекта равен техническому сроку службы фотоэлектрической панели, то есть 20 годам. Таким образом, стоимость замены равна нулю ($RC_{pv} = 0$), поскольку фотоэлектрическая панель не нуждается в замене.

Стоимость хранения энергии в батареях определяется уравнением (5), где c_{bat} [€/кВт·ч] — стоимость единицы батареи, а K_{bat} [кВт·ч] — мощность батареи. Стоимость эксплуатации и технического обслуживания в год определяется уравнением (6), где ϕ_{bat} — процент от стоимости эксплуатации и технического обслуживания батареи в общей стоимости:

$$CC_{bat} = c_{bat} \times K_{bat} \quad (5)$$

$$OM_{bat} = \phi_{bat} \times CC_{bat} \quad (6)$$

Когда срок службы батареи (5 лет) меньше продолжительности проекта (20 лет), стоимость замены становится следующей [16]:

$$RC_{bat} = \gamma_{bat} \times CC_{bat} \times SPW_{bat}(d, L_b, y) \quad (7)$$

где γ_{bat} — коэффициент снижения номинальной стоимости первоначальной батареи, а $SPW_{bat}(d, L_b, y)$ приведенная стоимость единовременного платежа представлена следующим образом:

$$SPW_{bat}(d, L_b, y) = \sum_{i=1}^y \frac{1}{(1+d)^{i \times L_b}} \quad (8)$$

L_b — это срок службы, а y — количество замен батареи:

$$y = \frac{L}{L_b} - 1 \quad (9)$$

LCOE [€/кВт·ч] рассчитывается путем деления общей стоимости системы (стоимость приобретения, стоимость эксплуатации и технического обслуживания, а также стоимость замены) на годовой объем произведенной энергии. Поскольку в автономных системах потребление энергии ограничено и, следовательно, не потребляется, LCOE нельзя рассчитать как стоимость за кВт·ч произведенной энергии [47]; поэтому мы рассчитываем LCOE как общую стоимость за кВт·ч

потребленной энергии e_h^0 [14,24]]:

$$LCOE = \frac{ACS}{\sum_{h=1}^{8760} e_h^0} \quad (10)$$

2.2 Задача оптимизации

Модель определяет оптимальный размер автономного проекта с целью минимизации общих затрат системы, например, обеспечивая бесперебойную подачу электроэнергии в микросети и удовлетворение спроса в любое время года. Оцениваются два основных варианта моделирования, основанных на исторических данных о размерах (HS) и данных о недостаточных размерах (US), как показано на рис. 3.

Первый вариант моделирования (HS) служит эталонным или базовым вариантом для расчета масштабов системы, определяя мощность солнечных панелей и батарей. Второй вариант моделирования (US) предполагает уменьшение масштабов автономной системы за счет внедрения программ управления спросом, включая снижение нагрузки для соответствующих устройств. Путем объединения стратегического взаимодействия между энергоснабжающей компанией и домохозяйствами создаются два теста: без игры (US-NG) и с игрой (US-G). Технический потенциал снижения нагрузки оценивается без игры, тогда как с игрой технический потенциал ограничивается функцией полезности домохозяйства и социально-экономическими параметрами снижения нагрузки.

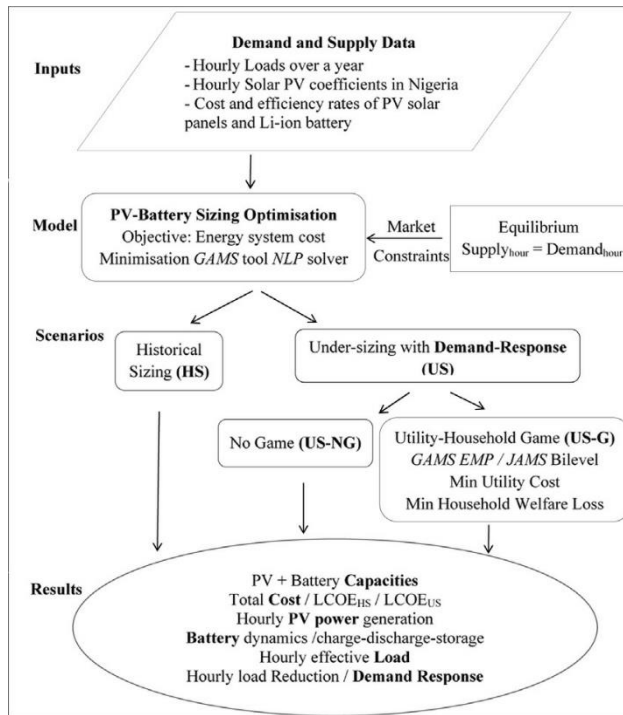


Рис. 3. Блок-схема методологии решения задачи расчета масштабов автономной системы.

Оптимизационные модели для вариантов HS и US-NG написаны на языке GAMS и решаются с помощью вычислителя CONOPT [48]. Вариант моделирования US-G представлен как задача двухуровневого программирования, которая решается с использованием общего синтаксиса расширенного математического программирования (EMP) и вычислителя JAMS.

Входные данные включают в себя почасовые схемы нагрузки, технические параметры фотоэлектрической панели и батареи, а также экономические предпочтения в отношении ограничения нагрузки и компенсации потерь. Переменными решения являются мощность солнечных панелей и батарей, эффективный спрос и ограничение нагрузки. Выходными данными являются общая годовая стоимость энергетической системы и LCOE, которая представляет собой среднюю стоимость, уплачиваемую домохозяйствами.

2.2.1 Исторический вариант моделирования определения размеров

Вариант моделирования HS определяет оптимальную мощность фотоэлектрической системы и батареи путем минимизации общей стоимости системы (уравнение (11)) с учетом ограничений (уравнения (12)-(27)). Следует отметить, что термин «минимизация стоимости системы» относится к коммунальному предприятию, выступающему в роли доброжелательного социального планировщика, стремящегося снизить счета потребителей за счет оптимального размера энергетического проекта, тем самым снижая инвестиционные затраты:

$$\min_{K_{pv}, K_{bat}} OF_{HS} = (CC_{pv} + CC_{bat} + RC_{bat}) \times CRF(d, L) + (OM_{pv} + OM_{bat}) \quad (11)$$

Ограничения, указанные в уравнениях (12)-(17), включают уравнения, приведенные в разделе 2.1, а именно:

Коэффициент окупаемости капитальных затрат на солнечные фотоэлектрические панели и аккумуляторы:

$$CRF(d, L) = \frac{d(1+d)^L}{(1+d)^L - 1} \quad (12)$$

Инвестиционные затраты на фотоэлектрические панели и аккумуляторы, соответственно:

$$CC_{pv} = c_{pv} \times K_{pv} \quad (13)$$

$$CC_{bat} = c_{bat} \times K_{bat} \quad (14)$$

Стоимость замены батареи:

$$RC_{bat} = \gamma_{bat} \times CC_{bat} \times \sum_{i=1}^y \frac{1}{(1+d)^{i \times L_b}} \quad (15)$$

Стоимость эксплуатации и технического обслуживания фотоэлектрических панелей и аккумуляторов, соответственно:

$$OM_{pv} = \phi_{pv} \times CC_{pv} \quad (16)$$

$$OM_{bat} = \phi_{bat} \times CC_{bat} \quad (17)$$

Показатель LCOE — это отношение общей годовой стоимости автономной системы к сумме почасовых исторических показателей потребления энергии за год $\left(\sum_{h=1}^{8760} e_h^0\right)$:

$$LCOE_{HS} = \frac{OF_{HS}}{\sum_{h=1}^{8760} e_h^0} \quad (18)$$

The constraint Eq. (19) is the system supply/demand balance and indicates that the hourly historical electricity demand (e_h^0) is supplied by the solar PV energy output (PV_h^{var}) and the power discharged by the battery (P_h^d), when the solar energy is absent or insufficient:

$$PV_h^{var} + P_h^d = e_h^0 \quad (19)$$

Уравнение (20) определяет солнечный потенциал ($\bar{PV}_h \times K_{pv}$), который в каждый час должен быть выше солнечной энергии, потребляемой домохозяйствами и батареями во время зарядки:

$$PV_h^{var} + P_h^c \leq \bar{PV}_h \times K_{pv} \quad (20)$$

Избыток солнечной энергии либо потребляется, либо заряжается, либо теряется (PV_h^{waste}), когда батарея достигает предела емкости:

$$PV_h^{waste} = \bar{PV}_h \times K_{pv} - PV_h^{var} - P_h^c \quad (21)$$

Уравнения (22)-(27) включают динамику хранения и физические ограничения батареи:

$$S_h = S_{(h-1)} + P_h^c \eta_c - P_h^d \quad (22)$$

где $\eta_c \in [0, 1]$ — КПД зарядки. Начальная запасенная энергия равна конечному состоянию в конце периода эксплуатации:

$$S_{\text{Initial}} = S_{\text{Final}} \quad (23)$$

Аккумулятор заряжается, разряжается или не используется:

$$P_h^c \times P_h^d = 0 \quad (24)$$

Ограничение (25) определяет верхнюю $(0.8 \times K_{\text{bat}})$ и нижнюю $(0.2 \times K_{\text{bat}})$ границы состояния заряда батареи:

$$0.2 \times K_{\text{bat}} \leq S_h \leq 0.8 \times K_{\text{bat}} \quad (25)$$

Уравнения (26) и (27) представляют собой ограничения мощности зарядки и разрядки, связанные с мощностью батареи, соответственно:

$$0 \leq P_h^c \leq K_{\text{bat}} \quad (26)$$

$$0 \leq P_h^d \leq K_{\text{bat}} \quad (27)$$

В качестве основных переменных решения задача оптимизации возвращает общую мощность фотоэлектрической панели (K_{pv}) в кВтп, общую мощность батареи (K_{bat}) в кВтч и LCOE в €/кВтч.

2.2.2 Вариант моделирования уменьшения размера

Вариант моделирования уменьшения размера (US) включает DR программу в историческом контексте и охватывает случаи без игры (US-NG) и с игрой (US-G).

Метод «уменьшения размера без игры» (US-NG) минимизирует новые системные затраты при соблюдении аналогичных ограничений, как и в историческом случае, а также новых ограничений, связанных с сокращением масштабов деятельности:

$$\begin{aligned} \min_{K_{\text{pv}}, K_{\text{bat}}} \text{OF}_{\text{US-NG}} &= (CC_{\text{pv}} + CC_{\text{bat}} + RC_{\text{bat}}) \times \text{CRF}(d, L) \\ &+ (OM_{\text{pv}} + OM_{\text{bat}}) \quad (28) \\ \text{s.t.} & (12 - 17) \text{ and } (20 - 27) \end{aligned}$$

Новая потребность в электроэнергии формулируется в уравнении (29) (e_h), полученном из исторической потребности в электроэнергии за вычетом мощности, сокращенной в соотношении θ (уравнение (30)). Численно θ принимает два значения: 0,3 для DR с изменением, затрагивающим только такие приборы, как утюги, вентиляторы и кондиционеры, и 0,7 для DR без изменения, затрагивающего только освещение, приготовление пищи и аудиовизуальное оборудование.

$$PV_h^{\text{var}} + P_h^d = e_h \quad (29)$$

$$(1 - \theta)e_h^0 \leq e_h \quad (30)$$

Уравнение (31) описывает DR программу, а ω обозначает годовой темп снижения нагрузки, который составляет 5% от общего годового исторического спроса на энергию и 10% в более претенциозном случае.

$$(1 - \omega) \sum_{h=1}^{8760} e_h^0 \leq \sum_{h=1}^{8760} e_h \quad (31)$$

Средняя стоимость энергетической системы определяется изменением размеров фотоэлектрических панелей и аккумуляторных батарей:

$$LCOE_{USNG} = \frac{OF_{USNG}}{(1 - \omega) \sum_{h=1}^{8760} e_h^0} \quad (32)$$

Метод «Уменьшения размера с игрой» (US-G) описывает игру с двухуровневой задачей, связывая величину нагрузки, которую домохозяйства готовы сократить, с их функцией благосостояния и с новой (более низкой) ценой на электроэнергию, установленной энергоснабжающей компанией. Метод «Уменьшения размера с игрой» описывает некооперативную игру Штакельберга, в которой энергоснабжающая компания является лидером, а домохозяйство — последователем [49,50].

Целевая функция (уравнение (33)) и ограничения (12)-(27) и (31) для определения полезности аналогичны тем, которые определены в случае US-NG:

$$\min_{K_{pv}, K_{bat}} OF_{USG} = (CC_{pv} + CC_{bat} + RC_{bat}) \times CRF(d, L) + (OM_{pv} + OM_{bat}) \quad (33)$$

$$s.t. (12 - 17)$$

$$(20 - 27)$$

$$(29)$$

$$p_2 = \frac{OF_{USG}}{\sum_{h=1}^{8760} e_h} \quad (34)$$

Верхний уровень (уравнения (33) и (34)) соответствует задаче полезности, а нижний уровень (уравнения (35)-(37)) соответствует программе домохозяйства. Ограничение (35) определяет целевую функцию домохозяйства, которая представляет собой неудовлетворенность, состоящую из двух частей: первая часть ($p_2 e_h$) представляет собой стоимость покупки энергии, где e_h — эффективный спрос на электроэнергию, а p_2 — удельная продажная цена электроэнергии, равная

$LCOE$, определенной в уравнении (34); вторая часть $\left(e_h^0 \beta \left[\left(\frac{e_h}{e_h^0} \right)^\alpha - 1 \right] \right)$ считается выражением неудовлетворенности домохозяйства, связанной с ограничением нагрузки [51], с параметрами α как эластичность спроса по отношению к цене электроэнергии и β как готовность к ограничению нагрузки.

$$\forall e_h \in \operatorname{argmin} \left\{ \sum_{h=1}^{8760} \left(p_2 e_h + e_h^0 \beta \left[\left(\frac{e_h}{e_h^0} \right)^\alpha - 1 \right] \right) \right\} \quad (35)$$

Уравнения (36) и (37) эквивалентны уравнениям (31) и (32):

$$(1 - \omega) \sum_{h=1}^{8760} e_h^0 = \sum_{h=1}^{8760} e_h \quad (36)$$

$$(1 - \theta) e_h^0 \leq e_h < e_h^0 \quad (37)$$

2.2.3 Калибровка данных

Мощность, вырабатываемая фотоэлектрической системой, включенная в инициализацию данных, получена с веб-сайта Renewable Ninja путем указания мощности фотоэлектрической батареи мощностью 1 кВт и данных, специфичных для географического местоположения. Почасовая схема нагрузки сообщества из 10 домохозяйств, изображенный на рис. 2, содержит данные о потреблении электроэнергии. Энергетическая система состоит из фотоэлектрического модуля с поликристаллическими кремниевыми ячейками и литий-ионной батареи (табл. 2). Литий-ионная батарея была выбрана потому, что она превосходит другие системы по зрелости, сроку службы, плотности энергии, саморазряду и стоимости [45,52].

Гибкость спроса достигается за счет программы ограничения нагрузки, которая распространяется на устройства, позволяющие отложить потребление электроэнергии (утюги, кондиционеры и вентиляторы), на долю которых приходится 70% от общего спроса, и на бытовую технику, потребление которой отложить нельзя (плиты, аудио- и видеооборудование и освещение), на долю которой приходится 30% от общего спроса.

3. Обсуждение результатов

Сначала мы рассчитываем параметры автономной микросети таким образом, чтобы удовлетворялась историческая нагрузка. Затем применяется управление спросом (DR), при котором домохозяйство снижает нагрузку на 5% от общего спроса в год, а также на 10% в зависимости от ситуации. Это соответствует технической возможности достижения этих показателей без использования игровых методов (раздел 3.1) и с их использованием (раздел 3.2). Наконец, применяются тесты на чувствительность к затратам для финансовых параметров (раздел 3.3).

Таблица 2. Технические параметры стоимости и срока службы элементов системы [45,53].

PV	
Capital cost, €/kWp	1250
Lifetime, years	20
O&M cost, %	1
Battery	
Capital cost, €/kWp	275
Lifetime, years	5
O&M cost, %	2
Financial	
Derate factor, %	20
Real interest rate, %	6

3.1 Результаты оптимизации для варианта моделирования с уменьшением размера без игры (US-NG)

Модель, запущенная для исторического варианта моделирования, показывает мощность фотоэлектрической панели 12 кВт и батареи 26 кВт·ч при общей стоимости 38 420 евро и LCOE 0,31 евро/кВт·ч (таблица 3). Данный вариант недоступен для большинства нигерийских домохозяйств, проживающих в исследуемом районе, поскольку тариф на эту автономную микросеть на 69% выше, чем тариф на подключение к сети (около 0,095 евро/кВт·ч); поэтому, чтобы снизить общую стоимость, мы уменьшили мощность фотоэлектрической системы, протестировав стратегию управления спросом (DR).

Изменение размеров микросети показывает, что снижение спроса на 5% значительно уменьшает затраты на энергетическую систему: при управлении спросом (DR), но без перераспределения нагрузки, мощность фотоэлектрических панелей и аккумуляторов уменьшается на одну треть, а затраты снижаются на 35%; при перераспределении нагрузки колебания ниже (15%). Удивительно, но DR, откалиброванный на 10% без перераспределения нагрузки, не меняет поведения, ожидаемого при 5% ограничении нагрузки, что указывает на то, что потенциальный предел

сглаживания пиков достигается при 5%. Этот потенциал дополнительно используется при перераспределении нагрузки, поскольку размер энергетической системы уменьшается для аккумулятора, но не для солнечной панели.

Сезонность нагрузки, связанная с погодой, влечет за собой переменчивость в управлении спросом. В условиях тропического климата Нигерии охлаждающие устройства (электрические вентиляторы и кондиционеры) играют важную роль в реагировании домохозяйств на сезонные колебания. В таблице 4 показано распределение нагрузки на основе целевого показателя ежегодного сокращения нагрузки на 5% для программ управления спросом. Для управления спросом без изменений в сезон дождей сокращается 266 кВт·ч (68%) нагрузки, по сравнению со 127 кВт·ч (32%) в сухой сезон. Целевой годовой объем сокращения нагрузки для управления спросом с изменением также достигается и распределяется следующим образом: 226 кВт·ч (58%) сокращается в сезон дождей и 166 кВт·ч (42%) сокращается в сухой сезон.

На рис. 4 показаны периоды года, когда происходит ограничение нагрузки без учета изменений, с годовой скоростью 5% (рис. 4а) и 10% (рис. 4б), а также с изменениями (рис. 4с, рис. 4д). Мы видим, что ограничение нагрузки происходит чаще в сезон дождей, чем в сухой сезон: без учета изменений ограничение происходит чаще в период с 3000-го по 7200-й час, а с учетом изменений — с 3000-го по 7900-й час.

Для иллюстрации рассмотрим три дня для каждого сезона. На рисунках 5 и 6 сравнивается нагрузка за исторический период спроса в сухой сезон (например, декабрь) и сезон дождей (например, июнь). Независимо от программы управления спросом, с учетом или без учета изменений, в сезон дождей нагрузка сокращается больше, чем в сухой сезон, при этом пиковые периоды сглаживаются в зависимости от сезона. Утренние пики немного сглаживаются в программе управления спросом без учета изменений, в то время как вечерние пики сокращаются по величине, а не по продолжительности (рис. 5б для сезона дождей по сравнению с рис. 5а для сухого сезона). Это объясняется тем, что осветительные или развлекательные устройства (например, аудиовизуальные) или приборы без учета изменений подходят для сглаживания пиков.

Таблица 3. Результаты моделирования оптимального подбора масштабов в историческом варианте и варианте моделирования уменьшения размера.

Indicator	Historical sizing, HS	Under-sizing, no game, US-NG			
		Without shifting		With shifting	
DR target/%	—	5%	10%	5%	10%
PV/kWp	12	8.41	8.44	11.47	10.863
Battery/kWh	26	18.18	18.07	22.827	19.95
Total cost/€	38,420	24,838	24,879	33,402	31,226
LCOE/€/kWh	0.310	0.200	0.200	0.265	0.245

Таблица 4. Поток энергии Те, сокращенный в рамках DR программы с ежегодным сокращением на 5%.

Season	DR without shifting			DR without shifting		
	Dry	Rainy	Total	Dry	Rainy	Total
Expected load curtailment/kWh	—	—	393	—	—	393
Load curtailed/kWh	127	266	393	166	266	392
Percentage of load curtailed in the target of 5%, %	32	68	100	42	58	100

Напротив, в DR программе с переключением режимов утренние пики значительно сглаживаются (рис. 6а, б). Это связано с более высокой влажностью в сезон дождей и жаркими и сухими условиями в сухой сезон, что способствует использованию устройств регулирования температуры, таких как кондиционеры с переключаемым режимом работы.

3.2 Результаты оптимизации методом уменьшения размеров с учетом игры (US-G)

При рассмотрении стратегического взаимодействия коммунальных предприятий и домохозяйств социально-экономические параметры влияют на технический потенциал снижения нагрузки, изменяя результаты, полученные в ходе эксперимента без учета влияния факторов, и улучшая исторические показатели. Интересно, что включение готовности потребителя снизить нагрузку в зависимости от скидки в счете приводит к меньшему сокращению объема потребляемой энергии. Это указывает на то, что социальный потенциал гибкости спроса ниже, чем технический потенциал.

В DR игре без изменений, при годовом сокращении нагрузки на 5%, экономия затрат составляет 12% по сравнению с историческим вариантом моделирования, а при сокращении нагрузки на 10% — 16%. Это оказывает большее влияние, чем без игры, в то время как в случае 5% по сравнению с 10% (US-NG без изменений при 5% против 10%) эффект отсутствует. Это в первую очередь связано с тем, что в эксперименте с игрой потенциал снижения нагрузки выше, чем в эксперименте без игры. Тем не менее, средняя стоимость остается неизменной (0,287 €/кВт·ч): снижение инвестиционных затрат на 10% (32 149 €) при меньшем объеме потребляемой энергии (7082 кВт·ч) эквивалентно увеличению инвестиционных затрат на 10% (33 877 €) при большем объеме потребляемой энергии (7471 кВт·ч; Таблица 5).

DR игра с изменением уменьшает размер энергосистемы даже больше, чем DR игра без изменений, что свидетельствует о готовности снизить нагрузку на электроприборы, потребление которых откладывается. Удивительно, но при тестах на 5% и 10% результаты с игрой и без нее совершенно не отличаются, что указывает на то, что этот случай (US — игра с изменениями) наилучшим образом воспроизводит технический потенциал ограничения нагрузки (US — без игры с изменениями).

Что касается целевых показателей сокращения потребления (таблица 6), то снижение потребления электроэнергии с игрой на 5% почти достигается без изменений (99%) и лишь частично с задержкой (71%), что демонстрирует важность, которую домохозяйства придают приборам, обеспечивающим комфортную температуру, по сравнению с другими видами деятельности (вентиляторы важнее освещения). Оставшийся 1%, потребление которого домохозяйство не сокращает, оказывает существенное влияние на размер системы: он составляет 4 кВт·ч с пиковыми нагрузками, требующими дополнительных фотоэлектрических панелей и аккумулятора по сравнению со случаем без игр, или разница в стоимости в 23 процентных пункта.

На рис. 7 (без изменений) и 8 (с изменениями) показано, как домохозяйства выбирают момент ограничения потребления, который оказывает наименьшее влияние на коммунальные услуги. Кроме того, снижение нагрузки происходит в схожие периоды в разные сезоны (сухой и дождливый), благодаря стратегическому решению домохозяйств отдавать приоритет устройствам, которые не могут провоцировать изменения.

Интересно, что в DR игре **без** изменений видно, что по мере увеличения темпа сокращения (с 5% до 10%) величина сглаживания пиковых нагрузок уменьшается, особенно для двух пиковых периодов (утреннего и вечернего), что напоминает предел, которого домохозяйство достигает при достижении целевого показателя в 5%.

Однако в DR игре с изменениями, наблюдаются сезонные колебания. Из-за увеличения количества людей, проживающих дома, и увеличения использования электроприборов, в основном связанных с регулированием температуры, домохозяйства более склонны снижать нагрузку в сезон дождей, чем в сухой сезон (электроутюг, вентилятор и кондиционер; рис. 8).

В сезонном разрезе 58% сокращенной нагрузки было зафиксировано в сезон дождей, по сравнению с 42% в сухой сезон (без изменений), и аналогичные тенденции наблюдаются в случае с задержкой, а именно 61% в сезон дождей и 39% в сухой сезон.

В заключение, DR программа делает энергетическую систему менее затратной, но без стратегического подхода она остается технологическим решением, навязываемым домохозяйствам, например, с помощью интеллектуальных счетчиков с установленными нормами. При использовании стратегического подхода перераспределение нагрузки может быть более эффективным, чем сокращение нагрузки в соответствии с нормами; однако, с точки зрения сокращения потоков и затрат, оно оказывается менее эффективным, чем в случае без стратегического подхода. Это демонстрирует, как социальные факторы (неудовлетворенность из-за сокращения) и экономические параметры (готовность получать выгоду от снижения потребления) влияют на технический потенциал при использовании только расчета технических параметров. Наконец, надлежащее регулирование должно отдавать приоритет согласованию контрактов для обеспечения гибкости посредством игр, а не навязываемым коммунальными предприятиями нормам, поскольку оно лучше учитывает потенциал домохозяйств к принятию устойчивых моделей поведения. Разработка перехода к возобновляемым источникам энергии требует участия всех участников, и управление спросом является важным шагом к децентрализации электроснабжения как для домохозяйств, так и для коммунальных предприятий, как потребителей и новых этических игроков в этом переходе.

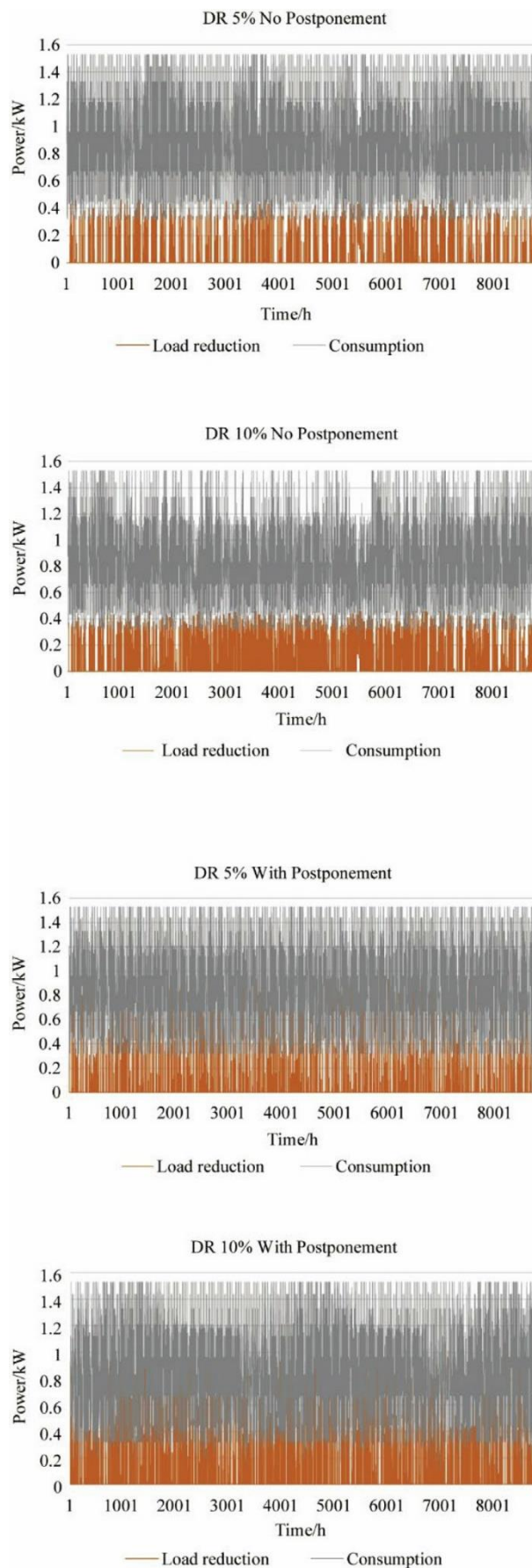


Рис. 4. Ожидаемое DR возникновение в течение года при испытаниях с ограничением нагрузки на 5% и 10% с возможностью отсрочки и без нее.

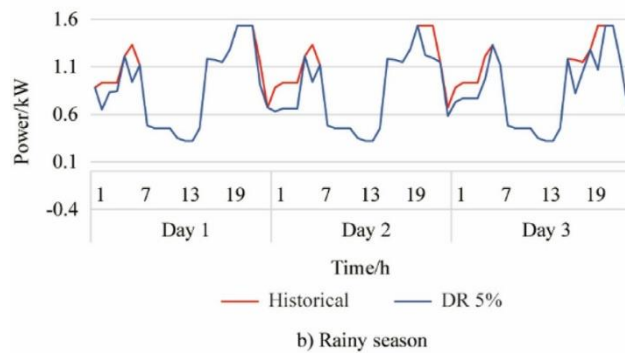
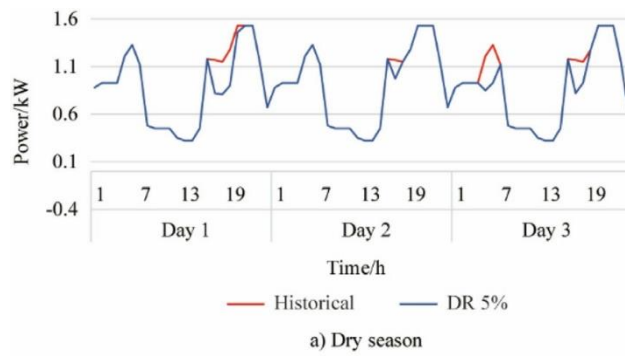


Рис. 5. DR при 5%-ном коэффициенте без изменений в течение трех дней в сухой (а) и дождливый (б) сезоны.

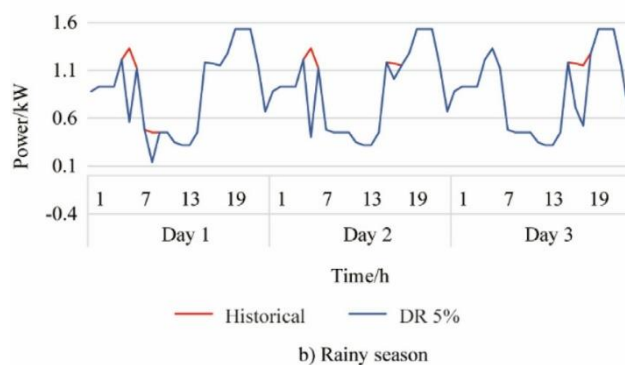
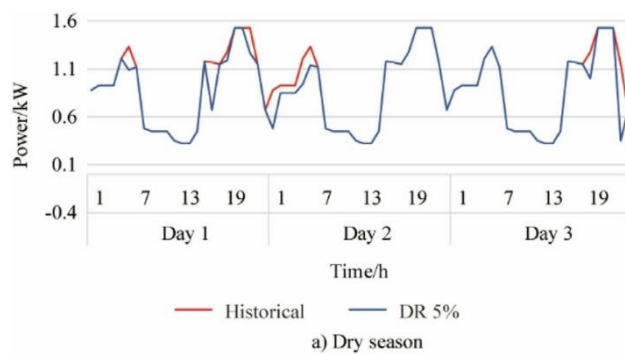


Рис. 6. DR при 5%-ном коэффициенте с изменением в течение трех дней в сухой (а) и дождливый (б) сезоны.

Таблица 5. Результаты расчета масштабов автономной микросети по вариантам моделирования.

Scenario	HS	US-No GAME				US-GAME			
Indicator		Without shifting		With shifting		Without shifting		With shifting	
DR	0%	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%
PV, kWp	12	8.41	8.44	11.47	10.86	11.48	10.89	11.47	10.86
Battery, kWp	26	18.18	18.1	22.83	19.95	24.73	23.50	22.83	19.95
Total cost, €	38,42	24,84	24,879	33,402	31,226	33,877	32,149	33,402	31,226
LCOE,€/MWh	0.31	0.20	0.20	0.265	0.245	0.287	0.287	0.279	0.272
Cost saving over HS	—	35%	35%	13%	18.7%	11.8%	16.3%	13%	18.7%

Таблица 6. Сокращение нагрузки при DR игре с учетом и без учета изменений (при 5% коэффициенте).

DR without shifting				DR without shifting			
Season	Dry	Rainy	Total	Dry	Rainy	Total	
Technical target/kWh	—	—	393	—	—	393	
Load curtailed/kWh Percentage,%	165	224	389	111	172	283	
	42	58	100	39	61	100	

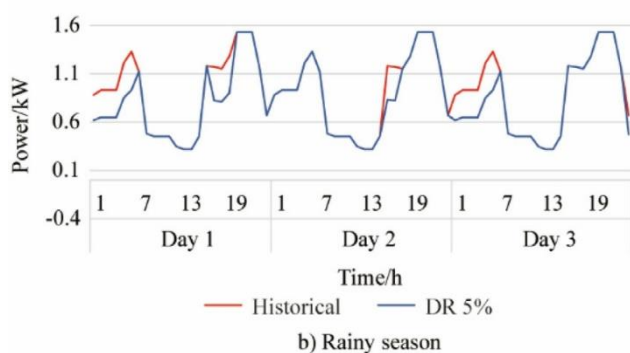
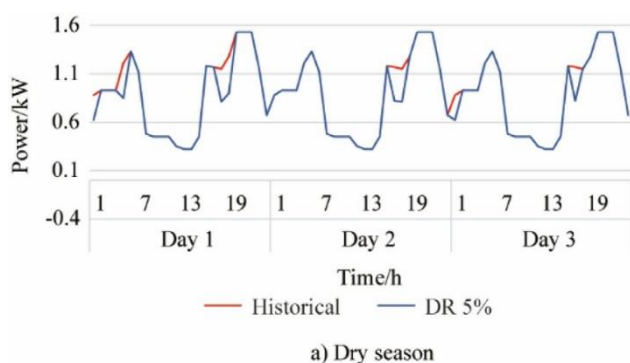


Рис. 7. Схемы нагрузки в US-G в сухой (а) и дождливый (б) сезоны (без изменений).

3.3 Анализ чувствительности

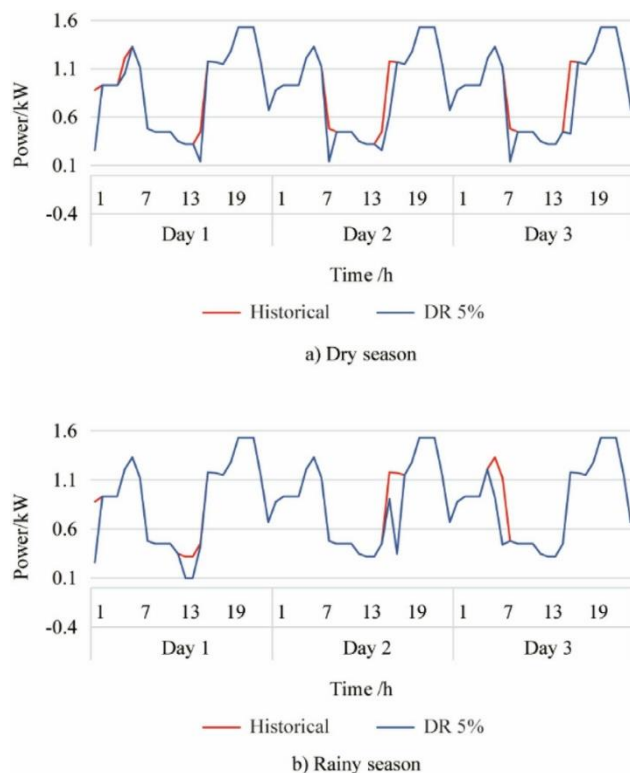


Рис. 8. Нагрузка в US-G в течение трех дней в сухой (а) и дождливый (б) сезоны (с учетом изменений).

В данной работе рассматривается вопрос высоких тарифов, установленных для автономных микросетей, чтобы сделать проект привлекательным как для инвесторов, так и для конечных потребителей. Средняя стоимость, полученная в базовом варианте, составляет 0,31 €/кВт·ч (143,73 NG/кВт·ч)³. Обменный курс евро и найры, используемый для анализа, следующий: 1 евро = 463,64 NGN, что большинство нигерийских домохозяйств не могут себе позволить без финансовой помощи. В настоящее время потребители, подключенные к сети, заключают договоры на поставку электроэнергии по цене 0,095 €/кВт·ч (43,91 NG/кВт·ч)⁴. Для бытовых потребителей рассматривается тариф компании Jos Distribution Company от 2016 года. Эта компания — одна из 11 по поставке и распределению электроэнергии на северо-востоке Нигерии. Тарифную структуру можно посмотреть здесь: <https://www.oecd.org/environment/cc/climate-futures/casestudy-achieving-clean-energy-access-in-sub-saharan-Africa.pdf>. Поэтому проводятся тесты на чувствительность, чтобы установить новые тарифы для автономных систем, конкурентоспособные по сравнению с контрактами для сетевых систем.

3.3.1 Капитальные субсидии

Поскольку первоначальные капитальные затраты являются одним из главных препятствий для внедрения микросетей [33,54], тестируется снижение стоимости системы при различных ставках: 25%, 50% и 75% от общей стоимости (рис. 9). Капитальные субсидии предоставляются в конце оптимизации и не влияют на масштаб системы, поэтому требуется одинаковая мощность фотоэлектрических панелей и батарей как с субсидиями, так и без них. Вместо этого средняя стоимость, LCOE, уплачиваемая домохозяйствами, снижается до 0,238 €/кВт·ч (при ставке субсидирования 25%), 0,155 €/кВт·ч (при ставке субсидирования 50%) и 0,077 €/кВт·ч (при ставке субсидирования 75%), при этом последний показатель улучшает коэффициент подключения к сети на 19%.

3.3.2 Процентная ставка по капиталу

Чтобы проверить тенденции, обнаруженные в литературе, реальная процентная ставка, которая изначально установлена на уровне 6%, варьируется с шагом в один пункт от 1% до 12%: более высокие процентные ставки увеличивают стоимость проекта, тем самым увеличивая среднюю стоимость, а более низкие процентные ставки снижают стоимость [33, 58-60]. Экономика нашего автономного проекта очень чувствительна к этому параметру, как это было получено с помощью уравнения текущей стоимости ежегодной выплаты за весь срок службы проекта (уравнение (2)). При процентной ставке 1% средняя стоимость составляет 0,22 €/кВт·ч, а при процентной ставке 12% стоимость составляет 0,44 €/кВт·ч (рис. 10).

3.3.3 Изменение срока службы батареи

По мнению экспертов, в долгосрочной перспективе литий-ионные батареи будут иметь преимущества перед свинцово-кислотными батареями, такие как более длительный срок службы, меньшее техническое обслуживание и большее количество циклов благодаря технологическому прогрессу [52]. При одинаковой мощности батареи и солнечной панели мы проводим тест на увеличение срока службы с 5 до 10 лет. Общая стоимость, естественно, снижается, поскольку батарея заменяется реже в течение проекта; однако она менее чувствительна, чем финансовые параметры (всего 6% от предыдущей стоимости).

4. Заключение и выводы для экономической политики

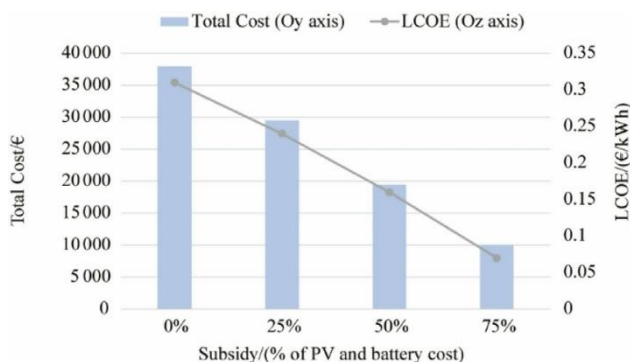


Рис. 9. Влияние капитальных субсидий на среднюю стоимость (LCOE) и общую стоимость.

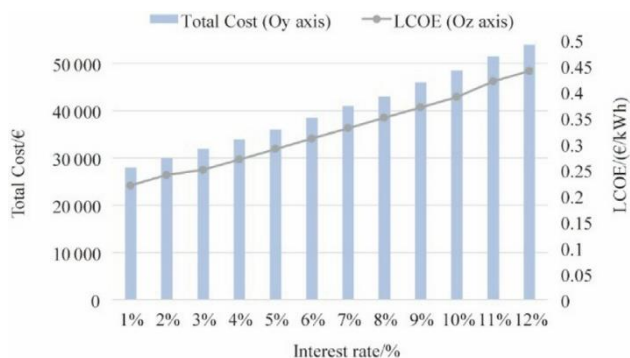


Рис. 10. Влияние процентных ставок на среднюю стоимость (LCOE) и общую стоимость.

Городские домохозяйства в странах Африки к югу от Сахары, сталкивающиеся с нестабильным подключением к электросети, могут извлечь выгоду из обилия возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия. Однако сложности финансирования и развития децентрализованных рынков остаются серьезными задачами [4]. В данной статье рассматриваются вопросы расчета размеров и эксплуатации автономных солнечных энергосистем в Нигерии, чтобы обеспечить лучшее понимание проектирования инвестиций в солнечную энергетику, моделей управления и потенциального взаимодействия между заинтересованными сторонами. В методологическом плане данное исследование объединяет ряд работ, восполняющих пробел в

управлении энергией в микросетях, путем применения теории игр и концепций реагирования на спрос в развивающихся странах. С помощью программы нелинейной оптимизации построена двухуровневая модель для описания стратегической игры между энергоснабжающей компанией и домохозяйствами. Такой подход позволяет оценить инвестиционные затраты наряду с изменениями благосостояния, возникающими в результате ограничения спроса. Проведенные тесты включают варианты реагирования на спрос, предложенные энергоснабжающей компанией домохозяйствам, основанные на игре снижения тарифов и обязательств по ограничению нагрузки с перенесением сроков работы отдельных бытовых устройств.

Результаты показывают, что для автономной микросети, включающей 10 домохозяйств с годовым совокупным потреблением 7,8 МВт·ч, требуется энергетическая система, состоящая из солнечных фотоэлектрических панелей мощностью 12 кВт и аккумуляторов с емкостью хранения 26 кВт·ч, для надежного удовлетворения почасового спроса в течение всего года. В результате тариф для этой конфигурации системы составляет 0,31 €/кВт·ч, что соответствует общим инвестициям в размере 38 420 € за 20-летний технический срок службы. Поскольку этот тариф значительно выше рыночной сетевой ставки (на 69%), гибкость со стороны спроса представляется эффективной стратегией снижения затрат. Изменение размеров микросети приводит к снижению спроса на 5%, что, в свою очередь, существенно уменьшает затраты на энергосистему примерно на треть. Тесты, включающие снижение спроса за счет отсрочки нагрузки, показывают более умеренный эффект снижения затрат (около -15%), поскольку этот подход в основном уменьшает потребность в батареях, но не в необходимой мощности солнечных панелей.

Подробные данные о сезонных схемах солнечной энергии и почасовом потреблении электроэнергии в течение года позволили выявить предпочтения домохозяйств в отношении перераспределения спроса, сроков принятия решений об ограничении потребления и приоритетности устройств для снижения энергопотребления. Результаты показывают, что снижение энергопотребления более эффективно в сезон дождей, чем в сухой сезон, главным образом из-за увеличения активности домохозяйств в периоды высокой загруженности. Результаты исследования также показывают, что домохозяйства отдают приоритет приборам, обеспечивающим комфортную температуру, таким как телевизоры, перед другими устройствами, например, освещением. В течение дня утренние пики потребления снижаются лишь незначительно, тогда как вечерние пики сокращаются скорее по величине, чем по продолжительности. Это говорит о том, что осветительные и аудиовизуальные устройства, используемые вечером, особенно подходят для стратегий снижения пиковых нагрузок.

Несмотря на внедрение программ управления спросом, тарифы на электроэнергию для домохозяйств остаются высокими и составляют 0,2 €/кВт·ч по сравнению с рыночным тарифом для подключенных к сети энергосистем в размере 0,095 €/кВт·ч. Поскольку системные затраты сильно зависят от финансовых параметров, был проведен анализ чувствительности влияния финансовой помощи. Эти тесты показали, что автономные проекты могут стать конкурентоспособными по стоимости, достигнув 0,077 €/кВт·ч, но только при наличии существенных капитальных субсидий, покрывающих 75% первоначальных затрат. Тем не менее, предоставление значительной финансовой поддержки этим энергетическим проектам могло бы стимулировать рост отрасли и привлечь инвестиции в автономную электрификацию. Такие программы могли бы быть реализованы местными органами власти в партнерстве с национальными и международными фондами софинансирования. Такой подход, основанный на сотрудничестве, способствовал бы участию частного сектора и помог бы обеспечить разумную окупаемость инвестиций.

Доступ к надежному и доступному электроснабжению остается серьезной проблемой в развивающихся странах, особенно для домохозяйств в сельской местности и неформальных городских поселениях. При рассмотрении вопроса о том, как воспроизвести это исследование в других странах, важно учитывать тропический климат Нигерии, для которого характерны высокая

влажность в сезон дождей и жаркий, сухой сезон. В таких условиях охлаждающие устройства играют решающую роль в потреблении электроэнергии домохозяйствами. В частности, в договорах на управление спросом следует учитывать, что откладывание использования устройств регулирования температуры, таких как электрические вентиляторы и кондиционеры, может существенно повлиять на комфорт в периоды отключения электроэнергии. Поэтому эти договоры должны быть разработаны таким образом, чтобы минимизировать дискомфорт, вызванный временной недоступностью таких приборов.

Сильные стороны исследования заключаются в том, как оно дополняет технологические аспекты расчета размеров микросетей социальными и экономическими факторами, такими как дискомфорт и готовность домохозяйств участвовать в программах управления спросом. Такой подход позволяет разрабатывать будущие контракты путем переговоров между энергоснабжающей компанией и домохозяйствами. Ключевой вывод заключается в том, что домохозяйства охотнее сокращают потребление электроэнергии, когда им разрешается отложить сокращение спроса, а не когда их вынуждают сократить потребление без возможности перенести его на более поздний срок. Исследование также показывает, что одни лишь экономические взаимодействия менее эффективны в снижении затрат по сравнению с прямым техническим контролем сокращения потребления со стороны коммунального предприятия. Это объясняется неизбежным компромиссом между максимизацией благосостояния и установлением ставок скидок.

Хотя переговоры могут быть длительными, они могут обеспечить большую гибкость, создавая взаимную выгоду как для коммунального предприятия, так и для домохозяйств, и могут способствовать динамичному поведению, адаптирующемуся к быстро меняющимся энергетическим условиям. В будущем ожидается, что обе заинтересованные стороны будут играть активную роль в переходе к надёжному энергоснабжению в будущем, особенно с учетом того, что автономные системы сталкиваются с растущим спросом без соответствующего расширения мощностей. Учитывая благосостояние домохозяйств наряду с факторами, выходящими за рамки исторического потребления электроэнергии, заинтересованные стороны могут помочь в создании этичной инвестиционной модели, которая будет способствовать устойчивому, долгосрочному и адаптивному потребительскому поведению в период перехода к возобновляемым источникам энергии.

Услуги по электрификации могут способствовать достижению более широких целей, таких как социально-экономическое развитие, образование и здравоохранение [56,57]. Эти услуги также могут снизить культурные и технические барьеры на пути перехода к надёжному энергоснабжению в будущем, включая навыки и социальное признание. Хотя программы финансовой помощи могут помочь преодолеть экономические барьеры, предоставление полной финансовой поддержки микросетям может способствовать недисциплинированному поведению [8,54]. Например, разработчики проектов могут завышать масштабы систем, чтобы получить гранты, или сталкиваться с такими проблемами, как коррупция и использование контрафактной продукции, такой как низкокачественные солнечные панели общего назначения, что обусловлено институциональными барьерами и отсутствием стандартов для возобновляемых технологий. Для решения этих задач могла бы помочь схема, предлагающая частичное субсидирование капитальных затрат, привязанных к целевым показателям эффективности (таким как качество вырабатываемой электроэнергии) - она устраняла бы подобные стратегические действия.

Правительства и институты развития в других развивающихся странах внедриli политические стратегии для ускорения широкого развертывания автономных микросетевых проектов, стремясь расширить доступ к устойчивой электроэнергии по минимально возможной цене [33]. Подобные стратегии включают в себя финансовые механизмы, такие как субсидии на капитальные и эксплуатационные расходы, а также не субсидируемые стимулы - налоговые льготы, гарантии по кредитам, частичные гарантии риска и уступки [54,55].

Государственная финансовая поддержка энергетических инициатив является краеугольным камнем «Проекта электрификации Нигерии», совместной инициативы, возглавляемой правительством Нигерии, Всемирным банком и другими международными партнерами, такими как Немецкое агентство международного сотрудничества и Африканский банк развития. Программа стимулирует привлечение частного сектора к разработке и эксплуатации экономически жизнеспособных микросетей посредством таких механизмов, как субсидирование капитальных затрат, конкурсные тендеры на субсидирование и схемы грантов, основанные на результатах деятельности. Цель – обеспечить электроэнергией один миллион нигерийских домохозяйств, государственные образовательные учреждения и малообеспеченные микро-, малые и средние предприятия [55]. Эти субсидии покрывают 50%-75% от общих капитальных затрат, что очень близко к показателям, проверенным в нашем анализе.

Дальнейшие исследования будут посвящены изучению стратегической игры внутри энергетических сообществ с учетом гетерогенных, а не гомогенных участников. Также будут рассмотрены договорные положения, касающиеся отклонений, например, периоды, когда домохозяйства могут отклонять запросы на ограничение нагрузки. Необходимы дальнейшие исследования для лучшего понимания будущих нагрузок на электросети по мере увеличения количества бытовых приборов, а также вероятностного прогнозирования как почасового спроса, так и схем выработки солнечной энергии. Кроме того, необходимы дополнительные исследования для изучения индивидуального поведения в связи с социальными факторами, влияющими на потребление электроэнергии в режиме реального времени, а также того, как люди реагируют на ценовые сигналы и информацию, например, активно участвуя в определении размеров и обслуживании системы.

О вкладе авторов в проект CRediT

Расин Диатта: написание оригинального текста, исследование, концептуализация, методология, обработка данных, программное обеспечение, формальный анализ. **Родика Луазель:** проверка достоверности, ресурсы, исследование, написание обзора и редактирование, научное руководство, администрирование проекта, привлечение финансирования, концептуализация, программное обеспечение, методология, формальный анализ. **Лайонел Ришфор:** научное руководство, формальный анализ, методология, написание обзора и редактирование, исследование, концептуализация.

О конфликте интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных связей, которые могли бы повлиять на результаты работы, представленной в данной статье.

Благодарности

Мы ценим финансовую поддержку со стороны Нантского университета в рамках проекта AAP II GENOME (Новые методы управления энергией и оптимизации электроснабжения, Gestion des Energies Nouvelles et Optimisation Electrique) и проекта LEAP-RE MiDiNa, грант № ANR-23-LERE-0002-01.

Приложение А

Таблица А1. Доля электроприборов [44].

Class of devices	Device names	Shifting	Share in the energy demand/%
Type 1	Cooking	No	1
	Audiovisual	No	1
	Lighting	No	28
	Electric Iron	Yes	6
Type 3	Air Conditioner	Yes	41
	Electric Fan	Yes	21
—	Others	—	2
		TOTAL	100

Список используемой литературы

- [1] Ю.С. Акпан, С.Р. Исихак, Ю.О.Н. Удаака, Доступ к электроэнергии в Нигерии: жизнеспособность автономных фотоэлектрических систем, в: 2013 Africon, IEEE, 2013, стр. 1-8.
- [2] О. Ганди, Д. Шринивасан, Введение, в: Устойчивые энергетические решения для отдаленных районов тропиков, Springer Nature, 2020, стр. 1-8 (Глава 1).
- [3] Б. Пийо, М. Муселли, П. Поджи, Ж. Б. Диас, Исторические тенденции в глобальной энергетической политике и вопросы возобновляемых источников энергии в странах Африки к югу от Сахары: пример солнечных фотоэлектрических систем, Energy Policy 127 (2019) 113-124.
- [4] МЭА, Энергетическая бедность — как сделать доступ к современной энергии универсальным. МЭА-ОЭСР, 2010.
- [5] М. Хафнер, С. Тальяпьетра, Л. Де Штрассер, Энергетика в Африке: вызовы и возможности, Springer Nature, 2018.
- [6] МЭА, Международное энергетическое агентство, Энергетический прогноз для Африки, 2019.
- [7] Д.А. Куанса, М.С. Адарамола, Л.Д. Менса, Солнечная фотовольтаика в странах Африки к югу от Сахары: преодоление барьеров, раскрытие потенциала, Energy Procedia 106 (2016) 97-110.
- [8] А.Г. Дагнахев, П.Л. Лукас, А.Ф. Хоф, Д.Е.Х.Й. Гернаат, Х.С. де Боер, Д.П. ван Вуурен, Роль децентрализованных систем в обеспечении всеобщего доступа к электроэнергии в странах Африки к югу от Сахары: модельный подход, Energy 139 (2017) 184-195.
- [9] Всемирный банк, Обзоры предприятий Всемирного банка, Технический отчет, Всемирный банк, 2019.
- [10] М. Кодзима, Р. Бэкон, К. Тримбл, Политическая экономия субсидий энергетического сектора: обзор на примере стран Африки к югу от Сахары, Группа Всемирного банка, 2014.
- [11] А. Каабече, М. Бельхамель, Р. Ибтиуэн, Оптимизация размеров независимой от сети гибридной фотоэлектрической ветроэнергетической системы, Energy 36 (2) (2011) 1214-1222.
- [12] Р. Сиддайя, Р. П. Саини, Обзор методов планирования, конфигураций, моделирования и оптимизации гибридных возобновляемых источников энергии для автономных приложений, Ren.Sustain.Energy Rev.58 (2016) 376-396.
- [13] Х. Ян, Л. Лу, В. Чжоу, Новая модель оптимизации размеров гибридной солнечно-ветровой энергетической системы, Sol.Energy 81 (1) (2007) 76-84.

- [14] А.О. Арраэс-Кансельер, Н. Муньос-Галеано, Дж.М. Лопес-Лезама, Методология расчета размеров гибридных систем генерации электроэнергии с резервным питанием от батарей в автономных районах, *Wind Solar Hybrid Ren.Energy Syst.* (2019).
- [15] А. Чис, В. Койвунен, Коалиционная игра на основе оптимизации затрат энергетического портфеля в сообществах с интеллектуальными сетями, *IEEE Trans.Smart Grids* 10 (2) (2019) 1960-1970.
- [16] М. Мовахедния, Х. Карими, С. Джадид, Кооперативный игровой подход к управлению энергией взаимосвязанных микросетей, *Electr.Power Syst.Res.*213 (2022) 108772.
- [17] С. А. Мансури, Э. Нематбахш, А. Рамос, Надежная оптимизационная структура с поддержкой ADM для децентрализованной координации микросетей, *IEEE Trans.Ind.Inf.*21 (2) (2025).
- [18] С.А. Мансури, А. Паредес, Дж.М. Гонсалес, Дж.А. Агуадо, Трехслойная стратегия, основанная на теории игр, для оптимального планирования микросетей с использованием динамического конструктора программ управления спросом для раскрытия потенциала интеллектуальных зданий и парков электромобилей, *Appl.Energy* 347 (2023) 121440.
- [19] В. Тушар, К. Юэн, Х. Мохсениан-Рад и др., Преобразование энергетических сетей посредством одноранговой торговли энергией: потенциал подходов, основанных на теории игр, *IEEE Signal Process Mag.*35 (2018), <https://doi.org/10.1109/MSP.2018.2818327>.
- [20] М. Марзбанд, М. Джавади, Дж.Л. Домингес-Гарсия, М.М. Могхаддам, Системы управления энергией на основе теории некооперативных игр для энергетического района на розничном рынке с учетом неопределенностей DER, *IET Gener.Transm.Distrib.*10(12) (2016).
- [21] З. Чжан, Х. Лию, Некооперативное планирование потребления энергии для интеллектуальной сети: эволюционный игровой подход, *ICNC-FSKD 2020. Лекционные заметки по технологиям обработки данных и связи*, Springer, Cham, 2021.
- [22] М.М.Гамиль, М.Сугимура, А.Накадомари и др., Оптимальное определение размеров реальной удаленной японской микросети с электролизной установкой морской воды в рамках программ управления спросом на основе времени, *Energies* 13(14) (2020) 3666.
- [23] С.М. Хакими, А. Хасанхани, М. Шафие-кхх, Дж.П.С. Кatalaо, Оптимальное определение размеров и размещение компонентов интеллектуальной микросети при высокой доле возобновляемых источников энергии с учетом управления спросом, *IET Renew.Power Gener.* 13 (10) (2019) 1809-1822.
- [24] А. Чаухан, Р.П. Саини, Оптимизация размеров и управление спросом автономной интегрированной системы возобновляемой энергии, *Energy* 124 (2017) 59-73.
- [25] М.Фочесато, К.Сенедезе, Дж.Лигерос, Игра Штакельберга для стимулирования реагирования на спрос на энергетических рынках, в: *2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC)*, 2022, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.08730>.
- [26] Б.Н. Альхаснави, Б.Х. Джасим, А.Н. Альхаснави и др., Новая эффективная оптимизация энергопотребления в интеллектуальных городских зданиях на основе оптимального управления спросом, *Energy Strat.Rev.*54 (2024)101461.
- [27] Б. Джаванмар, М. Табризиан, М. Ансарян, А. Ахмаринеджад, Управление энергией многомикросетей на основе подхода теории игр в присутствии программ реагирования на спрос, систем хранения энергии и возобновляемых источников энергии, *J.Energy Storage* 42 (2021) 102971.
- [28] Б.Н. Альхаснави, Б.Х. Джасим, А.М. Бурес и др., Многоцелевой улучшенный алгоритм роя тараканов для систем управления энергией в квартирах, *Information* 14 (2023) 521.

- [29] М. Тостадо-Велиз, Х.М. Хасаниен, Р.А. Турки и др., Полностью надежная модель управления энергией в доме с учетом цены в реальном времени и бортовых аккумуляторов транспортных средств, *J.Energy Storage* 72 (2023) 108531.
- [30] А.А.Адесанья, К.Шелл, Гибридные системы солнечных фотоэлектрических панелей и дизельного топлива для частного сектора Нигерии: оценка воздействия, *Energy Policy* 132(2019) 196-207.
- [31] К.Ван, Х. Ван, С.Х.Ан, Управление спросом на автономные микросети на солнечной энергии: тематическое исследование электрификации сельских районов Танзании, *Energy* 224 (2021).
- [32] С. Ферон, Устойчивость автономных фотоэлектрических систем для электрификации сельских районов в развивающихся странах: обзор, *Sustainability* 8(12) (2016) 1326.
- [33] П. Беналькасар, А. Суски, Дж. Камински, Влияние капитальных и энергетических субсидий на оптимальное проектирование микросетевых систем, *Energies* 13 (4) (2020) 955.
- [34] С. Джаглин, Автономия электроэнергии и энергетические сети в Африке: от сельских экспериментов к городской гибридации, в: *Local Energy Autonomy: Spaces, Scales, Politics*, 2019, pp.291-314.
- [35] Ю.Ли, С.Ван, Г.Ли, С.Чень, Оптимальное планирование интегрированных энергетических систем с поддержкой управления спросом и неопределенными возобновляемыми источниками энергии: подход на основе игры Штакельберга, *Energy Conver.Manage.*235 (2021) 113996.
- [36] Б.Н. Альхаснави, С.М.М. Альмутоки, Ф.Ф.К. Хуссейн и др., Новая методология сокращения выбросов углерода с использованием многовозобновляемых энергетических систем и искусственного интеллекта, *Sustain.Cities Soc.* 114 (2024) 105721.
- [37] Ю. Ван, В. Ян, Т. Лю, Учет бытовых приборов при оптимизации реагирования на спрос для интеллектуальной сети, *IET Gener.Transm.Distrib.* 14 (4) (2017) 856-864.
- [38] О.О. Бабайоми, Б. Олубайо, И.Х. Денвигве и др., Обзор возобновляемых автономных мини-сетей в странах Африки к югу от Сахары, *Front.Energy Res.* 10 (2023) 1089025.
- [39] А. Нордлинг, С. Падам, К. аф Бурен, П. Йоргенсен, Социальные издержки и выгоды технологий интеллектуальных сетей, Дискуссионный документ ISGAN Приложение 3 Международная сеть действий по интеллектуальным сетям (2018).
- [40] Х. Луи, Автономные электрические системы в развивающихся странах, Springer, Шам, Швейцария, 2018.
- [41] Л. Одарно, Э. Саве, М. Свай, М. Дж. Дж. Катъега, А. Ли, Ускорение развертывания мини-сетей в странах Африки к югу от Сахары: уроки Танзании, *TaTEDO - WRI*, 2017.
- [42] Т. Саркар, А. Бхаттачарджи, Х. Саманта и др., Оптимальное проектирование и внедрение интегрированной интеллектуальной гибридной микросети на основе солнечных фотоэлектрических панелей, ветроэнергетики, биогаза и накопителей энергии VRFB для обеспечения нулевой вероятности потери электроснабжения, *Energy Convers.Manag.*191 (2019) 102-118.
- [43] М. Суфьян, Н.А. Рахим, К.К. Тан, М.А. Мухаммад, С.Р.С. Райхан, Оптимальное определение размеров и планирование энергопотребления изолированной микросети с учетом деградации срока службы батареи, *PLoS One* 14 (2)(2019) e0211642.
- [44] О. Адеоие, К. Спатару, Моделирование и прогнозирование почасового спроса на электроэнергию в странах Западной Африки, *Appl.Energy* 242(2019) 311-333.

- [45] С.П. Айенго, Т. Ширмер, К.П. Кайрис, Х. Аксельсен, Д.У. Зауэр, Сравнение автономных систем электроснабжения с использованием свинцово-кислотных и литий-ионных батарей, *Sol.Energy* 162 (2018) 140-152.
- [46] НБС, Национальное бюро статистики, Комплексные обследования сельского хозяйства в рамках LSMS: Панель обследования домохозяйств 2015/2016, 2016.
- [47] Р. Дюфо-Лопес, Дж. Л. Бернал-Агустин, Дж. М. Юста-Лойо, Дж. А. Домингес-Наварро, И. Дж. Рамирес-Росадо, Дж. Л. Асо, Многоцелевая оптимизация, минимизирующая затраты и выбросы в течение жизненного цикла автономных фотоэлектрических, ветро-дизельных и аккумуляторных систем хранения энергии, *Appl.Energy* 88 (11) (2011) 4033-4041.
- [48] GAMS, Документация GAMS. Центр документации GAMS, 2021.
- [49] Ц.Лю, С.Лю, Ю.Ленг, Подход с использованием игры Нэша-Стаккельберга на региональном энергетическом рынке с учетом интегрированного реагирования на спрос пользователей, *Energy* 175 (2019) 456-470.
- [50] М.Ю, С.Х.Хонг, Алгоритм реагирования на спрос в реальном времени для интеллектуальных сетей: подход с использованием игры Стаккельберга, *IEEE Trans.Smart Grid* 7 (2) (2016) 879-888.
- [51] П. Ян, Г. Тан, А. Нехорай, Теоретико-игровой подход к оптимальному ценообразованию на электроэнергию в зависимости от времени суток, *IEEE Trans.Power Syst.* 28(2) (2013) 884-892.
- [52] А. Джайсуал, Решение для автономного электроснабжения на основе литий-ионных батарей: технико-экономический анализ, *Renew.Sust.Energy Rev.* 72 (2017) 922-934.
- [53] П. Ралон, М. Тейлор, А. Илас и др., Хранение электроэнергии и возобновляемые источники энергии: затраты и рынки до 2030 года, Международное агентство по возобновляемым источникам энергии, Абу-Даби, ОАЭ, 2017.
- [54] Н. Дж. Уильямс, П. Харамильо, Дж. Танеджа, Т. С. Устун, Содействие инвестициям частного сектора в электрификацию сельских районов на основе микросетей в развивающихся странах: обзор, *Ren.Sustain.Energy Rev.* 52(2015) 1268-1281.
- [55] Дж. Корфи-Морлот, П. Паркс, О. Джеймс, Ф. Айени, Достижение доступа к чистой энергии в странах Африки к югу от Сахары, *3Cs and Carbon Limits Nigeria*, 2019.
- [56] А.С. Саркоди, С. Адамс, Доступ к электроэнергии и неравенство доходов в Южной Африке: данные байесовского анализа и анализа NARDL, *Energy Strat.Rev.* 29 (2020) 100480.
- [57] Н. Магнани, А. Ваона, Доступ к электроэнергии и социально-экономические характеристики: данные панельных исследований на уровне страны, *Energy* 103 (2016) 447-455.
- [58] А.Л. Букар, К.В. Тан, К.Й. Лау, Оптимальное определение размеров автономной микросети фотоэлектрических/ветровых/аккумуляторных/дизельных генераторов с использованием алгоритма оптимизации Grasshopper, *Sol.Energy* 188 (2019) 685-696.
- [59] Л. Олатомива, С. Мехилеф, А.С.Н. Худа, К. Сануси, Техноэкономический анализ гибридных систем электроснабжения PV-дизель-аккумулятор и PV-ветро-дизель-аккумулятор: путь развития сельских районов, *Energy Sci.Eng.* 3 (4) (2015) 271-285.
- [60] Т.Дж. Ребер, С.С. Бут, Д.С. Катлер, Х.Ли, Дж.А. Саласович, Тарифные соображения для микросетей в странах Африки к югу от Сахары, Национальная лаборатория возобновляемой энергии, Голден, Колорадо (США), 2018.

Получено 15 февраля 2025 г.; отредактировано 9 июня 2025 г.; принято 26 июня 2025 г.

Экспертная оценка проводится под руководством компании Global Energy Interconnection Group Co.Ltd.

*** Ответственный автор**

Адреса электронный почт: racine.diatta@univ-nantes.fr (Р. Диатта), rodicaloisel@gmail.com (Р. Луазель), lionel.richefort@univ-nantes.fr (Л. Ришфор).

Эта статья переведена из журнала <Global Energy Interconnection> (ISSN: 2096-5117), выпуск 4, 2025 г. Оригинальное название статьи:< Demand Response in power off-grid microgrids in Nigeria: a game theory approach>. Перевод предоставляется исключительно для справки; преимущественную силу имеет оригинал: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2025.06.003>

2096-5117/© 2025 Global Energy Interconnection Group Co.Ltd. Издательские услуги предоставлены Elsevier B.V. от имени KeAi Communications Co.Ltd.

Это статья с открытым доступом, распространяемая по лицензии CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Расин Диатта, доктор наук в области экономики энергетики, окончил Нантский университет в 2023 году. В сферу его научных интересов входят расчет масштабов и эксплуатация интеллектуальных энергосетей, анализ энергетической политики и планирование перехода к надёжному энергоснабжению в будущем в развивающихся странах.