

Сравнительный анализ алгоритмов GA и PSO для оптимального управления затратами в микросетевых энергетических системах, подключённых к электросети с интеграцией фотоэлектрических панелей и аккумуляторов

Муна Эль-Касери ^{a,b,*}, Ахмед Аббу^a, Мохамед Лаамим^b, Лахусин Ид-Хаджине^c, Абделила Рошд^b

^a Рабатский университет Мохаммеда V, Инженерный факультет Мохаммадии, Кафедра электротехники, Рабат, Марокко

^b Парк зеленой энергии, Бен-Гуэрир, Марокко

^c Университет Сержи-Париж, GEI, лаборатория Сати, Париж, Франция.

Аннотация

Появление микросетей в современных энергетических системах знаменует собой многообещающую эру устойчивости, экологичности и эффективности. В сфере микросетей, подключенных к сети, выбор наиболее подходящего алгоритма оптимизации имеет решающее значение для эффективного управления энергией, особенно в задачах экономического распределения нагрузки. В данном исследовании сравнивается производительность алгоритма оптимизации роя частиц (PSO) и генетических алгоритмов (GA) в системах управления энергией в микросетях, реализованных с использованием MATLAB. На основе всестороннего обзора литературы и моделирования, проведенного в MATLAB, анализируются показатели производительности, скорость сходимости и общая эффективность GA и PSO, с акцентом на задачи экономического распределения нагрузки. Примечательно, что между кривыми затрат, генерируемыми двумя алгоритмами для работы микросети, выявляется существенное различие: алгоритм PSO неизменно приводит к снижению затрат благодаря своим эффективным возможностям экономического распределения нагрузки. В частности, использование подхода PSO потенциально может привести к существенной экономии на счетах за электроэнергию, составляющей приблизительно 15,30 долларов США в данном исследовании. Полученные результаты позволяют понять сильные и слабые стороны каждого алгоритма в сложной динамике микросетей, подключенных к сети, тем самым помогая заинтересованным сторонам и исследователям принимать обоснованные решения. Данное исследование вносит вклад в дискуссию об устойчивом управлении энергетикой, предлагая практические рекомендации по развитию технологий микросетей, подключенных к сети, с помощью алгоритмов оптимизации, реализованных в MATLAB.

Ключевые слова: микросеть; EMS (система управления энергопотреблением); алгоритм GA (генетический алгоритм); алгоритм PSO (алгоритм методом роя частиц); оптимизация затрат; экономическое диспетчирование нагрузки

0 Введение

Глобальное стремление к устойчивым энергетическим решениям вывело технологию микросетей на передний план современных энергетических систем. Эти самоподдерживающиеся сети, интегрированные с распределенными источниками энергии и интеллектуальными системами управления, предлагают устойчивый, эффективный и экологически ответственный подход к удовлетворению растущих энергетических потребностей различных сообществ [1]. Микросети способны работать как в режиме подключения к сети, так и в автономном режиме. Регулятор микросети играет ключевую роль, выполняя различные важные функции, включая контроль частоты и напряжения, управление энергией и нагрузкой, а также обеспечивая плавное повторное подключение к сети и бесперебойный переход между режимами работы в сети и автономном режиме.

Оптимизация экономического распределения нагрузки и управления затратами в микросетевых системах привлекла значительное внимание в научных работах, посвященных исследованию различных метаэвристических алгоритмов. Сравнительное исследование экономического распределения нагрузки с использованием метаэвристических алгоритмов представлено в [2].

Оптимизация системы управления энергией микросети с использованием алгоритма оптимизации методом роя частиц (PSO) обсуждается в [3] и [4]. Кроме того, в [5] представлено сравнительное исследование PSO и алгоритма смешанного целочисленного линейного программирования (MILP), где PSO демонстрирует значительное снижение затрат по сравнению с алгоритмом MILP. Хотя метаэвристические алгоритмы часто превосходят другие подходы, особенно в оптимизации микросетей, в [6] для оптимизации ресурсов микросети используется генетический алгоритм (GA). В недавних исследованиях изучалась оптимизация муравьиной колонии (ACO) из-за ее адаптивности и способности решать сложные задачи в вариантах моделирования распределения [7]. Имитация отжига (SA), известная своей способностью ориентироваться в сложных пространствах решений, продемонстрировала потенциал в стратегиях оптимизации микросетей [8]. Аналогично, дифференциальная эволюция (DE) привлекла внимание своей простотой и вычислительной эффективностью, о чем свидетельствуют несколько недавних публикаций [9].

В данной статье представлен сравнительный анализ алгоритмов GA и PSO для управления энергопотреблением в микросетях. Оцениваются их преимущества, ограничения и общая эффективность. Анализ производительности позволяет выявить сильные и слабые стороны каждого алгоритма. Основываясь на предыдущих исследованиях, предлагается структура для поддержки принятия обоснованных решений при выборе методов оптимизации.

0.1 Введение в оптимизацию потокораспределения мощности в микросетях

Сложность работы микросетей, обусловленная разнообразием источников энергии, колебаниями спроса и изменчивыми условиями окружающей среды, требует пристального внимания к оптимизации потокораспределения мощности. Эффективное управление энергией в микросетях имеет важное значение не только для обеспечения надежного электроснабжения, но и для минимизации эксплуатационных расходов и снижения воздействия на окружающую среду. Алгоритмы оптимизации, в частности метаэвристические алгоритмы (MA), стали мощными инструментами в этой области [10], предлагая передовые стратегии для решения многогранных задач, связанных с работой микросетей. Эти алгоритмы имеют решающее значение для оптимизации потокораспределения мощности, обеспечения оптимального использования ресурсов при соблюдении эксплуатационных ограничений и достижении заранее определенных целей.

В таблице 1 представлен ряд исследований, в которых используются различные алгоритмы оптимизации для разных структур микросетей и с разными целями. В ней подчеркивается частое применение алгоритмов методом роевой оптимизации (PSO) и генетического алгоритма (GA), которые отличаются быстрым временем реагирования и относительной простотой в решении сложных задач оптимизации. Соответственно, данная статья посвящена конкретно алгоритмам PSO и GA в контексте снижения затрат на системы управления энергопотреблением в микросетях (MEMS).

0.2 Вклад в написание статьи

Новизна данной статьи заключается в следующем:

- оценка эффективности метаэвристических алгоритмов в снижении энергозатрат;
- анализ влияния численности популяции на результаты оптимизации;

- сравнение эффективности алгоритмов оптимизации методом роя частиц (PSO) и генетического алгоритма (GA) для определения более эффективного подхода.

0.3 Содержание

Структура данной работы выглядит следующим образом: Раздел 2 представляет методологию, содержащую подробное описание тематического исследования микросети, разработку модели, определенные варианты моделирования и этапы реализации. В Разделе 3 представлены результаты, выделяются выходные данные алгоритмов оптимизации и анализируется влияние изменений параметров на результаты затрат как для алгоритма методом роевой оптимизации (PSO), так и для генетического алгоритма (GA). Наконец, Раздел 4 содержит заключение, в котором подводятся итоги исследования, определяются ограничения и предлагаются потенциальные направления для будущих исследований.

1 Методология

1.1 Описание микросети и разработка модели

Предложенная система управления энергопотреблением микросети (MEMS) была протестирована на практике с использованием коммерческой нагрузки в экспериментальной микросети (MC), как показано на рис. 1. Микросеть подключена к основной сети для обеспечения непрерывного электроснабжения, компенсируя тем самым прерывистость возобновляемых источников энергии. Энергетическая система включает в себя фотоэлектрические (PV) панели и систему хранения энергии с использованием аккумуляторных батарей (BESS). Система рассчитана на питание нагрузки мощностью 10 кВт, используя данные о погоде и нагрузке, полученные из метеорологических записей города Рабат, Марокко. На рис. 2 представлен профиль мощности PV - панелей в течение среднестатистического дня.

Проведено сравнительное исследование подключенных к сети микросетей, для оценки производительности и потенциала экономии затрат при использовании подходов PSO и GA. Система микросети включает в себя ключевые компоненты, в том числе фотоэлектрические (PV) панели и систему хранения энергии с использованием аккумуляторных батарей (BESS). Моделирование проводилось с использованием MATLAB/Simulink с целью оптимизации эффективности потокораспределения мощности и минимизации затрат на электроэнергию в течение 24-часового цикла (с 1-го по 24-й час).

Таблица 1. Общая информация об исследованиях, использующих метаэвристические алгоритмы для оптимизации микросетей.

Study	MAs	Purpose	MG Type	Year
[11]	BBO	To enhance frequency regulation within hybrid microgrids	Hybrid	2013
[12]	PSO	To optimize load distribution in hybrid microgrids	Hybrid	2018
[13]	SSO	To minimize emissions and optimize resource allocation	Islanded & Grid-connected	2018
[14]	GA	To optimize power dispatching in islanded systems	Islanded	2019
[15]	PSO	To optimize energy generation and consumption under uncertainty	Grid-connected	2019
[16]	GA	To optimize multi-objective energy operations	Grid-connected	2019
[17]	PSO	To manage the integration of distributed energy resources (DERs)	Grid-connected	2020
[18]	PSO	To enhance demand response strategies in grid-connected and islanded systems	Islanded & Grid-connected	2020
[19]	PSO, SPSO	To reduce power losses and improve energy efficiency	Islanded & Grid-connected	2020
[20]	GA	To implement efficient energy management in hybrid and grid-connected systems	Islanded & Grid-connected	2021
[21]	GA, DE	To optimize energy management and resource coordination	Grid-connected	2021
[22]	PSO	To enhance energy control and optimize consumption	Hybrid	2022
[23]	ABC	To optimize energy use and improve system performance	Islanded	2022
[24]	GA, ACO, PSO	To coordinate energy management between various components in hybrid systems	Islanded & Grid-connected	2023
[25]	PSO	To optimize energy flow and demand response in grid-connected systems	Grid-connected	2023

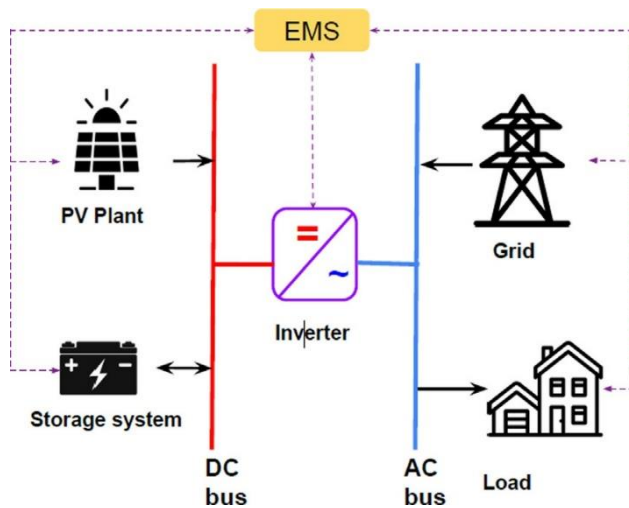


Рис. 1. Структура микросети.

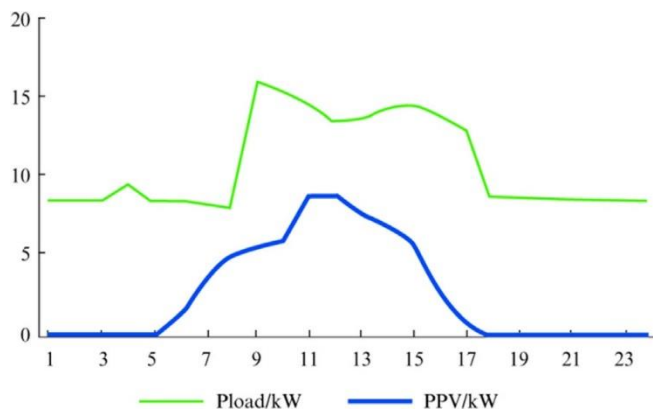


Рис. 2. Схема суточной требуемой нагрузки и производства фотоэлектрической энергии.

Модуль оптимизации предназначен для эффективного управления производством и потреблением энергии, обеспечивая удовлетворение спроса при минимизации эксплуатационных расходов. Энергия, производимая солнечными панелями, в первую очередь используется для немедленного применения в системе хранения энергии с использованием аккумуляторных батарей (BESS). Для повышения эффективности собственного потребления вводятся строгие ограничения на подачу избыточной энергии обратно в основную сеть, что способствует максимальному использованию доступных возобновляемых источников энергии и снижает зависимость от внешних источников, особенно в часы пик.

Модель учитывает реальные данные нагрузки и информацию о погоде для моделирования системы управления энергопотреблением (EMS) в практических условиях. Кроме того, в исследовании учитывается контекст рынка электроэнергии Марокко путем включения фактических национальных тарифов и стратегий ценообразования в зависимости от полезного времени суток (TOU), что позволяет точно отразить условия местного рынка.

Для улучшения визуализации на рис. 3 представлена блок-схема, суммирующая процесс управления и оптимизации энергопотребления. Процесс начинается со сбора и предварительной обработки данных, за которой следует процедура распределения энергии с использованием алгоритмов PSO и GA, и завершается сравнительным анализом результатов моделирования для оценки их эффективности в реальных условиях эксплуатации.

Алгоритмы PSO и GA выбраны за их доказанную способность эффективно решать сложные задачи оптимизации в управлении энергопотреблением. Оба алгоритма эффективны для минимизации эксплуатационных затрат, балансировки производства и потребления энергии, а также

оптимизации использования накопителей энергии. Процесс оптимизации включает сбор данных, распределение энергии и сравнение результатов, все это проиллюстрировано на блок-схеме на рис. 3.

1.2 Постановка задачи

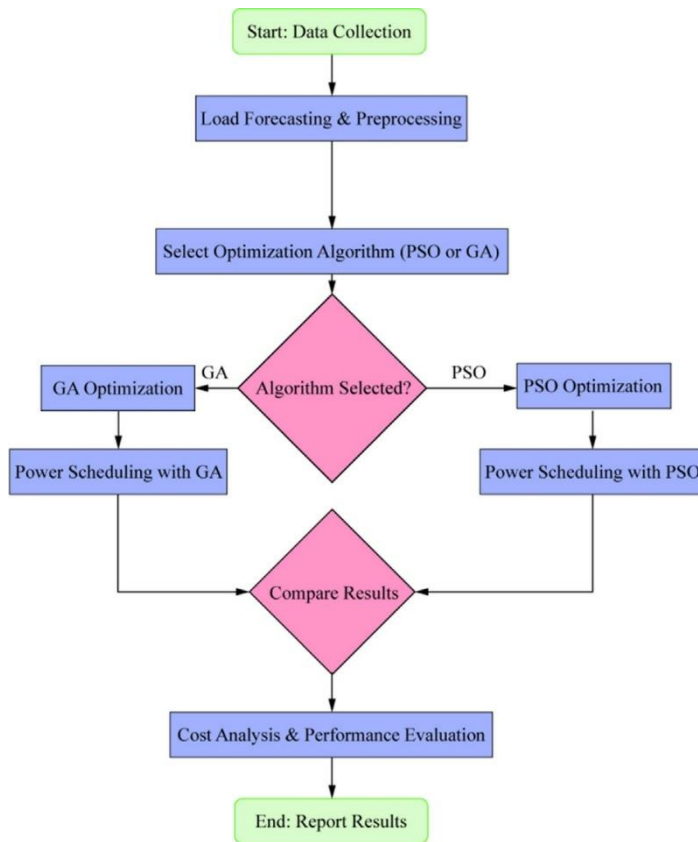


Рис. 3. Блок-схема реализации вариантов моделирования.

Основная цель системы управления энергопотреблением микросети (М EMS) — оптимизация снижения затрат и эффективное управление потокораспределением мощности в микросети [26]. Это достигается путем стратегического определения переменных принятия решений в течение 24-часового периода. Система учитывает затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание (O&M), связанные с входными данными, объединяя эти факторы в уравнение, определяющее общую функцию издержек. Благодаря такому подходу М EMS стремится оптимизировать процессы принятия решений и динамически регулировать потокораспределение мощности в микросети,

$$f = \min (C_{\text{ost}}) \quad (1)$$

$$C_{\text{ost}} = \sum_{t=1}^{24} P_{\text{PV}(t)} C_{\text{PV}} + P_{\text{BESS}(t)} C_{\text{BESS}} + P_{\text{G}(t)} C_{\text{G}} \quad (2)$$

где C_{PV} и C_{BESS} представляют собой затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, связанные с производством энергии солнечными панелями (PV) и системой хранения энергии с использованием аккумуляторных батарей (BESS) соответственно (таблица 2).

C_{G} представляет собой стоимость покупки электроэнергии из основной сети в интервале времени t . Этот временной интервал T варьируется от 1 до 24 часов и изменяется в зависимости от стратегии ценообразования в зависимости от полезного времени суток (TOU). Эта стратегия поддерживает экономически эффективное распределение нагрузки и общую функциональность системы управления энергопотреблением (EMS) микросети. Ценообразование TOU сегментировано на три

отдельных периода в течение дня. В рамках данного исследования микросеть работает при низком напряжении, а применимая структура ценообразования TOU в Марокко представлена в таблице 3 ниже.

Таблица 2. Затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание распределенных источников энергии.

Distributed sources	Operation and maintenance cost/(\$/Kwh)
Photovoltaic generators	Negligible
Battery	0.01 \$/Kwh

P $G(t)$ обозначает почасовой обмен электроэнергией между микросетью и основной энергосистемой. Он принимает положительное значение, когда микросеть приобретает электроэнергию из сети, и отрицательное значение, когда электроэнергия уходит в сеть [27].

При решении задач оптимального потокораспределения мощности необходимо учитывать ряд эксплуатационных ограничений. К ним относятся как ограничения равенства, так и ограничения неравенства, которые представлены в [4].

1.3 Обзор генетического алгоритма в оптимизации энергопотребления микросетей

Генетический алгоритм (GA) представляет собой мощный вычислительный метод, вдохновленный принципами эволюционной биологии, предлагающий новый подход к решению сложных задач оптимизации, особенно в области оптимизации энергопотребления в микросетях.

Блок-схема, изображенная на рис. 4, иллюстрирует этапы реализации и параметры генетического алгоритма, включая процессы кодирования, перехода и мутации. Эти операции могут значительно различаться в зависимости от конкретной предметной области и структуры алгоритма. Как правило, они включают кодирование и управление строками значений, представляющих потенциальные решения задачи оптимизации.

Вкратце, генетические алгоритмы используют принципы, заимствованные из естественного отбора и генетики, для множественной эволюции популяции потенциальных решений. Применительно к управлению энергией в микросетях они способствуют оптимизации использования энергии, стратегий распределения и общей эффективности сети.

Подробности реализации алгоритма PSO изложены в [4].

1.4 Настройки параметров генетического алгоритма (GA) и алгоритма оптимизации методом роя частиц (PSO)

Алгоритмы оптимизации зависят от тщательно подобранных конфигураций параметров для эффективной работы, влияющих на ключевые показатели производительности, такие как скорость сходимости и качество решения. Эти параметры включают количество повторов, размер популяции, скорость перехода и мутации, а также коэффициенты управления, такие как вес и пороговые значения. В данном исследовании были выбраны конкретные значения параметров, как указано в таблице 4 («Параметры генетических алгоритмов (GA) и алгоритма оптимизации методом роя частиц (PSO)»). Выбранные настройки, включая ограничение в 100 повторов, размеры популяции (NumFam и NumPar) и удельный вес (Win, Wend, C1, C2), разработаны для достижения оптимального баланса между исследованием и применением.

Таблица 3. Стратегия ценообразования в зависимости от полезного времени суток в Марокко.

ToU (Time of Use)	Tariff
Peak Hours	\$0.158 per kWh
Off-Peak Hours	\$0.079 per kWh
Normal Hours	\$0.119 per kWh

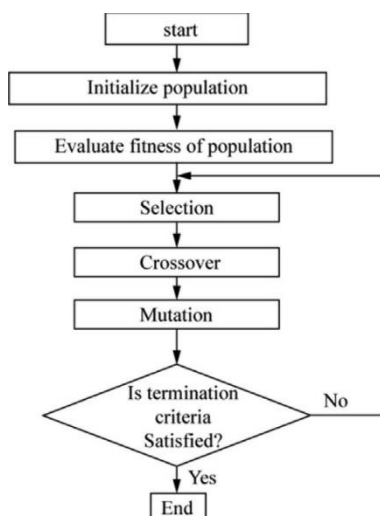


Рис. 4. Блок-схема генетического алгоритма.

В заключительном разделе данной работы будут рассмотрены различные варианты моделирования для анализа влияния этих конфигураций параметров на результаты оптимизации, что позволит получить представление об их роли в повышении эффективности систем управления энергопотреблением в микросетях.

2 Обсуждение результатов

2.1 Результаты моделирования

Применение генетического алгоритма (GA) и алгоритма методом роевой оптимизации (PSO) к задаче оптимизации позволило получить ценные результаты. Сравнительный анализ, представленный в таблицах, диаграммах и графиках, выявил различные характеристики производительности двух алгоритмов. Результаты показывают, что GA особенно эффективен в быстрой сходимости к локальным оптимумам, в то время как PSO демонстрирует превосходные возможности глобального исследования. Эти закономерности, наблюдаемые в процессе оптимизации, подчеркивают различные, но взаимодополняющие сильные стороны двух методов.

Учитывая обилие и бесплатную доступность солнечной энергии, затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание фотоэлектрических систем в Марокко считаются незначительными.

На рисунках 5 и 6 показаны значения целевой функции на протяжении повторов для двух вариантов моделирования: один с использованием генетических алгоритмов (GA), а другой — с использованием оптимизации методом роя частиц (PSO).

На рисунках 7 и 8 показан подход, используемый для оптимального планирования доступных энергетических ресурсов в течение 24 часов с применением алгоритмов PSO и GA.

Они представляют подробное описание методологии, используемой для определения наиболее эффективной стратегии планирования распределения энергетических ресурсов в течение предстоящего 24-часового цикла.

Литий-ионный аккумулятор обладает емкостью 80 кВт·ч (кВт·ч), что обеспечивает достаточный запас энергии для будущего использования. В совокупности фотоэлектрическая (PV) батарея и

аккумуляторная система обеспечивают суммарную выходную мощность 10 кВт (кВт), что указывает на их максимальную мгновенную мощность.

Это различие имеет решающее значение: мощность литий-ионного аккумулятора в 80 кВт·ч отражает его способность накапливать значительное количество энергии для длительного использования, тогда как суммарная мощность в 10 кВт представляет собой максимальную мгновенную выходную мощность фотоэлектрической батареи и аккумуляторов. Такая конфигурация подчеркивает, что, хотя фотоэлектрическая батарея и аккумуляторы могут совместно выдавать мощность со скоростью 10 кВт, мощность литий-ионного аккумулятора обеспечивает непрерывное энергоснабжение в течение длительного периода времени.

На рис. 8 представлено оптимальное планирование доступных энергетических ресурсов на 24 часа вперед с использованием алгоритмов GA и PSO. Конфигурация системы включает в себя фотоэлектрическую батарею мощностью 10 кВт и литий-ионный аккумулятор мощностью 80 кВт·ч для хранения энергии. Кроме того, на рис. 9 показана производительность аккумулятора и график разряда, оптимизированные с использованием алгоритмов GA и PSO.

Примечательно, что планирование начинается с начального уровня энергии батареи в 40 кВт·ч, а к концу 24-часового цикла батарея восстанавливается до своей первоначальной мощности.

В таблице 5 представлены максимальные и минимальные уровни энергии батареи для каждого алгоритма PSO и GA с целью экономии заряда батареи; в непиковые часы литий-ионная батарея заряжается.

Таблица 4. Параметры генетического алгоритма и алгоритма оптимизации методом роя частиц.

Parameter	Description	Value
Number of Iterations	Total number of iterations (generations or steps) performed during optimization.	100
NumFam/NumPar	Number of families (GA) or particles (PSO) in the population.	15 (GA)/ 50 (PSO)
Win (Initial Inertia Weight)	Initial value of inertia weight that controls the influence of previous velocity in PSO.	1.00
Wend (Final Inertia Weight)	Final inertia weight value to balance exploration and exploitation in PSO.	0.00
C1 (Cognitive Coefficient)	Controls each particle's personal learning or self-experience component in PSO.	1.00
C2 (Social Coefficient)	Governs the learning from the best-performing particle in PSO.	0.25
Crossover Rate	Probability of combining two parents to produce offspring in GA.	0.50
Mutation Rate	Probability of random changes in offspring chromosomes in GA.	0.20
T (Time Horizon)	Number of time steps or hours in the scheduling period (typically 24 for a day).	24

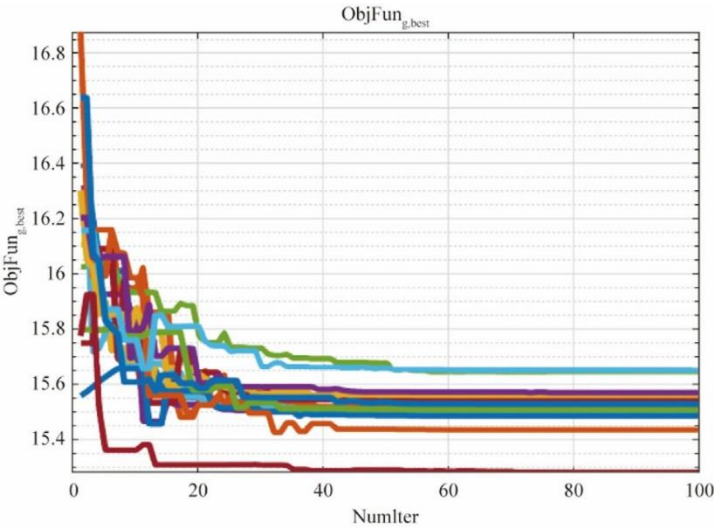


Рис. 5. Значения целевой функции на каждом повторе: PSO.

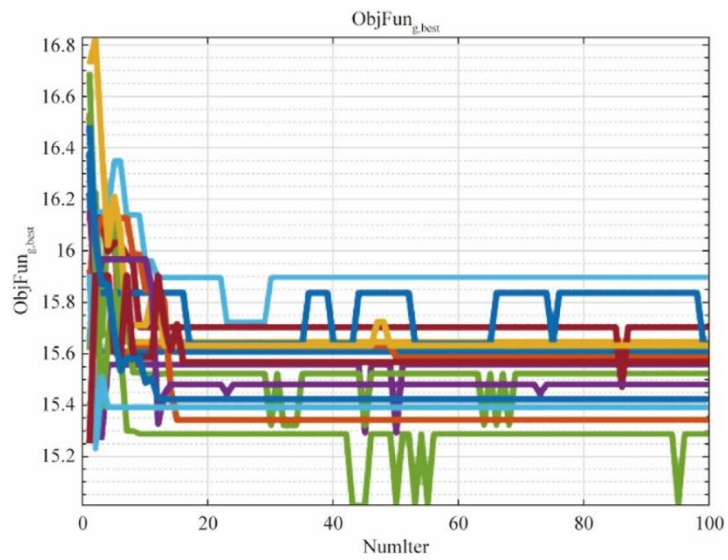


Рис. 6. Значения целевой функции на каждом повторе: GA.

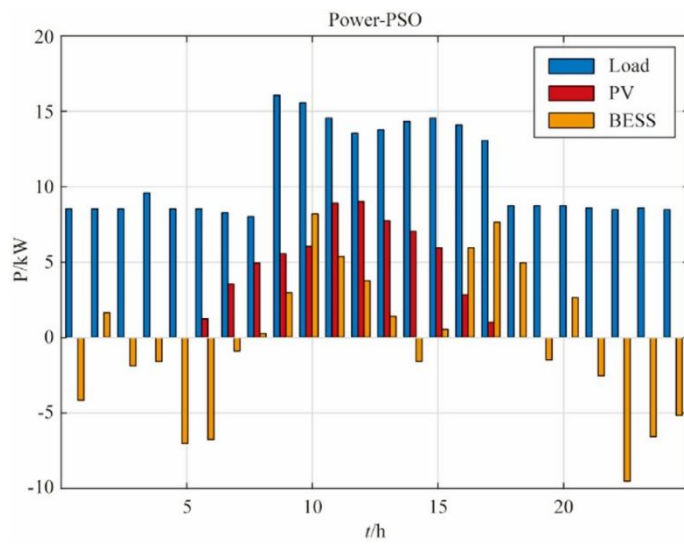


Рис. 7. Планирование энергопотребления на 24 часа с использованием алгоритма PSO.

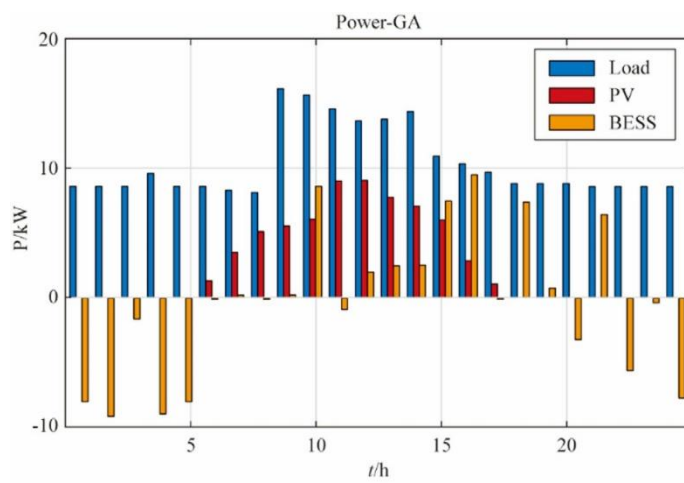


Рис. 8. Планирование энергопотребления на 24 часа с использованием генетического алгоритма.

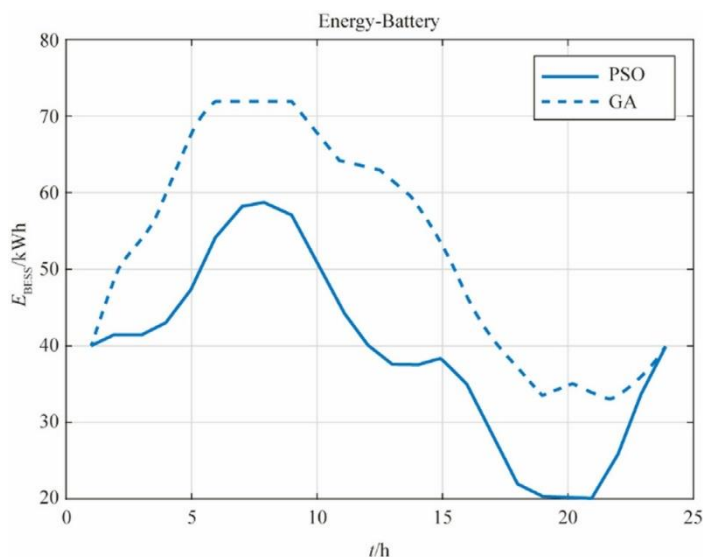


Рис. 9. Управление энергией батареи на основе алгоритмов GA и PSO.

В данных условиях, исходя из заданных энергетических пределов, алгоритм GA достигает более высокого максимального значения энергии в 72 кВт·ч по сравнению с 59 кВт·ч у алгоритма PSO. Аналогично, GA поддерживает более высокий минимальный уровень энергии в 32 кВт·ч, тогда как PSO достигает минимума в 20 кВт·ч. Эти результаты показывают, что с точки зрения энергетических пределов алгоритм GA поддерживает более высокие уровни энергии как на максимальном, так и на минимальном пороговом значении по сравнению с алгоритмом PSO.

2.2 Общая стоимость

В зависимости от различных элементов затрат, влияющих на 24-часовой цикл эффективного планирования энергопотребления, наблюдается четкое различие между кривыми затрат, генерируемыми алгоритмами PSO и GA в условиях работы микросети. Примечательно, что на рис. 10 показано, что кривая затрат, полученная с помощью алгоритма PSO, постоянно остается ниже кривой затрат, полученной с помощью алгоритма GA. Следовательно, использование подхода PSO может привести к значительной экономии средств, составляющей приблизительно 15,30 долларов США в данном исследовании.

Исследование 24-часового цикла оптимального планирования энергопотребления включает в себя множество входных параметров, которые оказывают существенное влияние на динамику затрат в работе микросетей. Наблюдается явное расхождение между кривыми затрат, полученными с помощью двух известных методов оптимизации: алгоритма методом роевой оптимизации (PSO) и генетического алгоритма (GA).

Таблица 5. Ограничения энергии батареи: GA в сравнении с PSO.

Algorithm	Maximum Energy (kWh)	Minimum Energy (kWh)
PSO	59	20
GA	72	32

Примечательно, что на протяжении всего периода оценки кривая затрат, полученная с помощью алгоритма PSO, неизменно оставалась ниже кривой затрат, полученной с помощью алгоритма GA. Эта устойчивая тенденция подчеркивает сравнительное преимущество подхода PSO в управлении и оптимизации использования энергии в микросетевой системе.

Интересный вывод из этого сравнительного анализа — потенциальная экономия средств, связанная с использованием алгоритма PSO. По результатам оценки, применение подхода PSO может

привести к существенным экономическим выгодам, с предполагаемым снижением счета за электроэнергию на 15,30 долларов, что представляет собой оптимизацию на 39% от общей стоимости.

Этот значительный потенциал экономии затрат подчеркивает эффективность алгоритма PSO в повышении экономической эффективности эксплуатации микросетей, подтверждая его перспективность как ценного инструмента для оптимизации планирования энергопотребления и использования ресурсов.

2.3 Краткое сравнение методов GA и PSO.

Сравнительный анализ алгоритмов GA и PSO выявляет различия в производительности по нескольким оценочным показателям, что подтверждается полученными результатами. Критерии оценки включали экономическую эффективность, планирование энергопотребления и общую оптимизацию в рамках микросетевой системы.

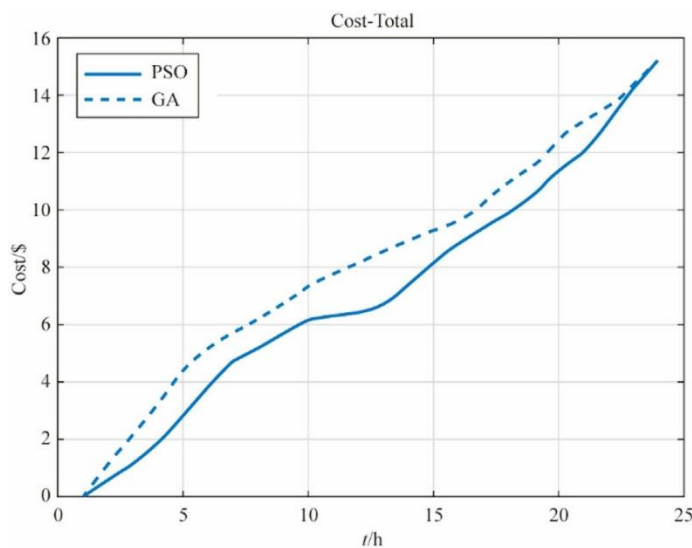


Рис. 10. Общая стоимость эксплуатации микросети: GA в сравнении с PSO.

Следует отметить, что изменение количества семей и численности населения существенно влияет на результаты анализа затрат при применении методов PSO и GA для оптимизации управления энергопотреблением.

При фиксированном количестве повторов, равном 100, различные конфигурации приводят к разным показателям эффективности затрат. Например, конфигурация из 20 семейств и размера популяции в 60 приводит к наименьшим затратам, при этом подход с использованием генетического алгоритма демонстрирует превосходную производительность по сравнению с алгоритмом методом роевой оптимизации при этих настройках.

Подробный анализ, представленный в таблице 6, подчеркивает важность настройки параметров для повышения эффективности и экономической целесообразности алгоритмов оптимизации, а также ключевую роль выбора параметров в достижении оптимального управления энергопотреблением в микросетях.

Полученные результаты иллюстрируют более полную картину (см. Таблицу 7): алгоритм GA продемонстрировал конкурентоспособные результаты в некоторых аспектах, в частности, достигнув более высоких максимальных и более низких минимальных уровней энергии по сравнению с алгоритмом PSO. Однако алгоритм PSO неизменно превосходил GA по экономической эффективности и общей оптимизации энергопотребления на протяжении всего 24-часового периода оценки.

3 Заключение

В данном исследовании был проведен сравнительный анализ генетического алгоритма (GA) и алгоритма методом оптимизации роя частиц (PSO) для управления энергией в микросетях, выявивший явные преимущества каждого подхода. GA оказался эффективным в обработке экстремальных колебаний энергии, обеспечивая более высокие максимальные и более низкие минимальные уровни энергии. Напротив, алгоритм PSO неизменно демонстрировал превосходную экономическую эффективность и сбалансированное использование энергии в течение 24-часового цикла планирования, достигая оптимизации до 39% от общего счета за электроэнергию. Эти результаты подчеркивают потенциал PSO как надежного и практичного решения для реальных приложений микросетей.

Анализ на основе вариантов моделирования показал, что с увеличением числа семей общие затраты на энергию снижались, что указывает на то, что более крупные системы получают большую выгоду от оптимизации благодаря улучшенному распределению энергии. Наилучшие результаты были достигнуты во втором варианте моделирования, что, вероятно, объясняется сбалансированным размером популяции и повышенным разнообразием решений, что способствовало повышению эффективности алгоритма.

Полученные результаты подчеркивают важность выбора методов оптимизации, соответствующих конкретным целям и ограничениям микросети, что позволяет разработать более эффективную и персонализированную стратегию управления энергией.

Несмотря на ценные полученные результаты, необходимо признать ряд ограничений. Текущая модель фокусируется исключительно на хранении энергии в батареях, игнорируя альтернативные системы хранения энергии. Кроме того, она предполагает статическое ценообразование на электроэнергию и включает упрощенную модель ухудшения состояния аккумуляторов. Наконец, результаты получены на основе моделирования и еще не были подтверждены в реальных условиях эксплуатации.

Таблица 6. Влияние изменений параметров на результаты затрат для алгоритмов PSO и GA.

Number of Families	Population Size	Iterations	Cost (PSO) (\$)	Cost (GA) (\$)
50	10	100	16.00	16.00
20	60	100	15.50	15.00
5	5	100	17.00	17.50

Таблица 7. Показатели эффективности GA и PSO.

Performance Metric	GA	PSO
Cost of Grid Energy	Higher	Lower
Cost of BESS Energy	Higher	Lower
Overall Cost Savings	Less	More
Convergence Speed	Slower	Faster
Solution Accuracy	Lower	Higher

В дальнейших исследованиях эти ограничения будут устранены следующим образом:

- внедрение динамического ценообразования на электроэнергию и комплексных моделей старения батарей;
- расширение сферы применения на многоэнергетические системы, включая хранение водорода и программы управления спросом (DSR);

- внедрение передовых методов, таких как обучение методом проб и ошибок, для дальнейшего повышения эффективности оптимизации управления энергопотреблением;
- проведение экспериментальной проверки в реальных условиях, включая программно-техническое тестирование (HIL), для обеспечения надежности и практической применимости в микросетях.

Эти усовершенствования повысят устойчивость системы и будут способствовать развитию интеллектуальных, масштабируемых и адаптивных энергетических решений.

О вкладе авторов в проект CRediT

Муна Эль-Касери: написание – рецензирование и редактирование, написание – первоначальный вариант, визуализация, программное обеспечение, методология, исследование, формальный анализ, обработка данных. **Ахмед Аббу:** визуализация, проверка достоверности, научное руководство. **Мохамед Лаамим:** визуализация, проверка достоверности, научное руководство. **Лахусин Ид-Хаджине:** проверка достоверности, научное руководство, программное обеспечение, концептуализация. **Абделила Рошд:** научное руководство.

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

Я с благодарностью отмечаю финансовую поддержку, предоставленную компанией Green Energy Park (Парк зелёной энергии) для моего исследования. Их финансирование и ресурсы сыграли решающую роль в успехе этой работы. Я также выражаю искреннюю благодарность моим профессорам за их неоценимое руководство и поддержку на протяжении всего пути.

Список используемой литературы

- [1] Т. Виджаяприя, Д.П. Котари, Интеллектуальная сеть: обзор, Smart Grid Renew. Energy 2 (4) (2011) 305-311.
- [2] А. Види, Сравнительное исследование экономического распределения нагрузки с использованием метаэвристического алгоритма, Журнал науки Университета Гази (2022) 1.
- [3] Г. Юань, В. Ян, Исследование оптимизации экономического распределения электроэнергии на основе гибридных интеллектуальных алгоритмов (PSO и AFSA), Energy 183 (2019) 926-935.
- [4] М.Е.Касери, А.Ахмед, И.К.Лахусин, Система управления энергопотреблением в гибридной микросети с использованием усовершенствованного алгоритма PSO, в: Труды Международной конференции «Электрические системы и автоматизация», Springer Nature, Шам, Швейцария, 2023, стр. 187-191.
- [5] М.Эль-Касери, А.Ахмед, Л.Ид-Хаджин, Сравнительное исследование алгоритмов оптимизации PSO и MILP для экономического распределения нагрузки в микросетях, подключенных к сети, в: С.Мотахир, Б.Боссуфи (ред.), Цифровые технологии и приложения. ICDTA 2024. Лекционные заметки по сетям и системам, Springer, 2024.
- [6] П. Роберто и др., Улучшенный подход генетического алгоритма к задаче планирования работы энергоблоков/экономического распределения нагрузки, IEEE Trans.Power Syst. 35 (5) (2020) 4005-4013.

- [7] С. Кумар, В. Кумар, Н. Катал и др., Многозональное экономическое распределение нагрузки с использованием эволюционных алгоритмов, *Math.Probl.Eng.* 2021 (2021) 1-14.
- [8] Дж. Мир, М. Имдад, Дж. А. Хан и др., Задача экономического распределения нагрузки с помощью метода имитированного отжига, в: Труды Четвертой международной конференции по мягким вычислениям и интеллектуальному анализу данных (SCDM 2020), Мелака, Малайзия, 22-23 января 2020 г., Springer International Publishing, 2020, стр. 448-459.
- [9] Х. Мунира и др., Усовершенствованный адаптивный дифференциальный эволюционный оптимизатор для невыпуклых задач экономического распределения, *Appl.Soft Comput.*85 (2019) 105868.
- [10] Ф. Фирдоуз, М. Сурендер Редди, Гибридная система хранения энергии с использованием генетического алгоритма и алгоритма роевой оптимизации для применения в автономной микросети, *Energy Storage* (2023).
- [11] С. Мишра, Г. Маллешам, П. Сехар, Оптимальный контроллер обратной связи по состоянию на основе биогеографии для регулирования частоты интеллектуальной микросети, *IEEE Trans.Smart Grid* 4 (1) (2013) 628-637.
- [12] С. Лу, К. Чжоу, С. Ян, Х. Лю, Многоцелевое оптимальное распределение нагрузки микросети со стохастическим доступом электромобилей, *J.Clean.Prod.*195 (2018) 187-199.
- [13] Т. Т. Агир, Новые алгоритмы оптимизации на основе роевого интеллекта для оптимизации микросетей, *Eur.J.Tech.(EJT)*8(2)(2018)196-208.
- [14] С. Сен, К. Д. Гупта, С. Пудьял, М. М. Ахсан, Генетический алгоритм для оптимизации диспетчеризации в микросетевой энергетической системе с возобновляемыми источниками энергии, *Comput.Sci.Inf.Technol.(CSIT)*9 (14) (2019) 523-535.
- [15] С. Горбани, Р. Унланд, Х. Шокухандех, Р. Ковальчик, Инновационный стохастический многоагентный подход к управлению энергией в микросетях с учетом неопределенностей, *Inventions* 4(3) (2019) 37.
- [16] М. Сюй, Т. Гу, Дж. Цинь, В. Чжэн, Многоцелевая оптимизация работы микросети на основе ГА, Труды Международной конференции по интеллектуальным системам 2019 года, 2019.
- [17] Ф. Турян, Х. Хассанзаде Фард, Э. Р. Коллинз, С. Цзинь, Б. Рамезани, Интеллектуальная интеграция возобновляемых источников энергии, электрического и теплового хранения энергии в приложениях микросетей, *Energy* 212 (2020) 118716.
- [18] А. Р. Джордехи, Алгоритм смешанной бинарной-непрерывной оптимизации роя частиц для планирования работы энергоблоков в микросетях с учетом неопределенностей и выбросов, *Int.Trans.Electr.Energy Syst.*30 (11) (2020) 12581.
- [19] Ф.Япракдал, М.Б.Йилмаз, М.Байсал, А.Анвар-Могхаддам, Подход с использованием глубокой нейронной сети для улучшения краткосрочного оптимального оперативного планирования микросети, *Устойчивость* 12(4)(2020) 1653.
- [20] Л.Инь, С.Ли, Гибридный метаэвристический многослойный подход к обучению с подкреплением для двухуровневой структуры стратегии управления энергией в системах с несколькими микросетями, *Eng.Appl.Artif.Intell.*104 (2021) 104326.
- [21] Л.П. Рагхав, Р.С. Кумар, Д.К. Раджу, А.Р. Сингх, Оптимальное управление энергией микросетей с использованием алгоритма квантового обучения, *IEEE Trans.Smart Grid* 12 (6) (2021) 4834-4842.

- [22] Дж. Агила-Леон, К. Варгас-Сальгадо, К. Чинас-Паласиос, Д. Диас-Белло, Модель управления энергией для автономной гибридной микросети с использованием подхода оптимизации роя частиц и искусственных нейронных сетей, *Energy Convers. Manage.* 267 (2022) 115920.
- [23] М.Р. Джокар и др., Планирование автономной возобновляемой системы на основе стационарных и мобильных накопителей с учетом стоимости деградации накопителей на основе оптимизации теории принятия решений с информационным разрывом, *J. Energy Storage* 58 (2023) 106389.
- [24] В. Суреш, П. Яник, М. Ясински, Дж.М. Герреро, З. Леонович, Управление энергией в микросети с использованием метаэвристических алгоритмов оптимизации, *Appl. Soft Comput.* 134 (2023) 109981.
- [25] С.Л.Л. Уинн, Т. Бунракса, П. Бунракса, В. Пинтурат, Б. Марунгсри, Децентрализованная система управления энергией в микросети с учетом неопределенности и реагирования на спрос, *Electronics* 12 (1)(2023) 237.
- [26] Т. Хай, Дж. Чжоу, Дж.М. Заин и др., Оптимизация затрат и управление энергопотреблением микросети, включающей возобновляемые источники энергии и электромобили, *J. Energy Res. Technol.* 145(4)(2023)042101.
- [27] С. Фоммиксай, М.Л. Думбия, Д. Лупиен Сент-Пьер, Обзор оптимизации затрат микросетей с помощью оптимизации роя частиц, *Int. J. Energy Environ. Eng.* 11 (2020) 73-89.

Получено 12 февраля 2025 г.; отредактировано 18 апреля 2025 г.; принято 5 мая 2025 г.

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

* Ответственный автор в Рабатском университете Мохаммеда V, Инженерный факультет Мохаммадии, Кафедра электротехники, Рабат, Марокко

Адреса электронных почт: mouna.elqasery@um5r.ac.ma (М.Эль-Касери), Abbou@emi.ac.ma (А. Аббу), Laamim@greenenergypark.ma (М. Лаамим), lahoucine.idkhajine@cyu.fr (Л.Ид- Хаджине), Rochd@greenenergypark.ma (А. Рошд).

Эта статья переведена из журнала <Global Energy Interconnection> (ISSN: 2096-5117), выпуск 4, 2025 г. Оригинальное название статьи:< Comparative analysis of GA and PSO algorithms for optimal cost management in on-grid microgrid energy systems with PV-battery integration>. Перевод предоставляется исключительно для справки; преимущественную силу имеет оригинал: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2025.05.003>

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

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



Муна Эль-Касери получила степень магистра в области возобновляемой энергии и хранения энергии на факультете естественных наук в Рабате, Марокко, в 2021 году. В настоящее время она работает над докторской диссертацией по электротехнике на Инженерном факультете Мохаммадии и на исследовательской платформе Green Energy Park (Парк зелёной энергии) в Марокко. Ее научные интересы включают в себя моделирование, прогнозирование и оптимизацию систем управления энергией для микросетей, с использованием передовых алгоритмов и искусственного интеллекта для повышения производительности и устойчивости системы.