

**Оптимизированное управление фотоэлектрическими системами, подключенными к сети:
устойчивый ПИ-регулятор (регулятор пропорционально-интегрального типа) на основе
алгоритма поиска воробья для применения в интеллектуальных микросетях**

Юссеф Акарне ^{a,*}, Ахмед Эссадки ^b, Таму Нассер^c, Ссадик Чаради ^{e,f}, Маха Аннукуби ^d

^a *Факультет прикладной и инженерной физики, Политехнический университет им. Мохаммеда VI, Бен-Герир 43150, Марокко*

^b *Национальная высшая школа искусств и ремёсел (ENSAM), Рабатский университет Мохаммеда V, Рабат, Марокко.*

^c *Национальная высшая школа компьютерных наук и системного анализа (ENSIAS), Рабатский университет Мохаммеда V, Рабат, Марокко.*

^d *Центральные исследовательские центры Касабланки, Центр сложных систем и взаимодействий, Бускура, Марокко.*

^e *EEIS-Lab, ENSET Mohammedia (высшее училище по подготовке педагогического состава техникумов и профессиональных училищ), Университет Хасана II, Касабланка, Марокко; SMARTiLab, Марокканская школа инженерных наук (EMSI), Рабат, Марокко.*

Аннотация

Интеграция возобновляемых источников энергии в современные энергосистемы требует эффективных и надежных стратегий управления для решения таких задач, как качество электроэнергии, стабильность и динамические изменения окружающей среды. В данной статье представлен новый ПИ-регулятор (регулятор пропорционально-интегрального типа), настроенный с помощью алгоритма поиска воробья (SSA), для фотоэлектрических (PV) систем, подключенных к сети, разработанный для оптимизации динамических характеристик, вывода энергии и качества электроэнергии. Главные достижения включают разработку систематической оптимизационной структуры на основе SSA для настройки ПИ параметров в режиме реального времени, обеспечивающей точное регулирование напряжения и тока, повышение эффективности отслеживания точки максимальной мощности (MPPT) и минимизацию общего коэффициента гармонических искажений (THD). Предложенный подход оценивается в сравнении с традиционными регуляторами на основе алгоритма оптимизации методом роя частиц (PSO) и алгоритма оптимизации «восхождения по холму» (P&O) посредством всестороннего моделирования, демонстрируя его превосходные характеристики производительности по ключевым показателям: время реагирования на 39,47% быстрее по сравнению с PSO, увеличение пиковой активной мощности на 12,06% по сравнению с P&O и снижение общего коэффициента гармонических искажений (THD) на 52,38%, что обеспечивает соответствие стандартам IEEE для энергосистем. Кроме того, оптимизированный с помощью SSA ПИ-регулятор демонстрирует улучшенную адаптивность к динамическим колебаниям освещенности, быстрое время реагирования и надежную интеграцию в сеть в различных условиях, что делает его весьма подходящим для приложений интеллектуальных энергосетей в режиме реального времени. Данная работа подтверждает, что настроенный с помощью SSA ПИ-регулятор является надежным и эффективным решением для повышения производительности фотоэлектрических систем в условиях подключения к сети, а также закладывает основу для будущих исследований в области многоцелевой оптимизации, экспериментальной проверки и гибридных систем возобновляемой энергии.

Ключевые слова: Интеллектуальная микросеть; Фотоэлектрическая система; ПИ-регулятор; Алгоритм поиска воробья; Подключение к сети; Метаэвристическая оптимизация

0 Введение

1) Общий контекст

Глобальный энергетический ландшафт претерпевает глубокие изменения, вызванные острой необходимостью снижения зависимости от ископаемого топлива и перехода к более чистым и устойчивым источникам энергии. Среди различных технологий возобновляемой энергии фотоэлектрические системы стали одним из наиболее перспективных решений. Используя обильную и неисчерпаемую энергию солнца, фотоэлектрические системы обеспечивают чистую, устойчивую и экологически безопасную альтернативу для производства электроэнергии, как подчеркивают Чаради и др.[1] и Акарне и др.[2]. Поскольку мир все больше переходит на возобновляемые источники энергии для смягчения последствий изменения климата и удовлетворения растущих потребностей в энергии, интеграция фотоэлектрических систем в электросеть стала ключевым направлением исследований и разработок, как обсуждалось в работах Акарне и др.[3] и Джрилифы и др.[4].

Однако с ростом распространения фотоэлектрических систем, подключенных к сети, обеспечение эффективного производства энергии и стабильной работы системы стало серьезной проблемой. Прерывистый характер солнечной энергии, зависящий от колебаний освещенности и температуры, требует применения передовых стратегий управления для оптимизации выработки энергии, поддержания стабильности сети и обеспечения бесперебойной работы системы в условиях колеблющейся окружающей среды, как подчеркивают Джрилифа и др.[5] и Чаради и др.[6]. Эффективные механизмы управления имеют решающее значение для выполнения этих задач, поскольку они позволяют фотоэлектрическим системам, подключенным к сети, динамически реагировать на изменения, сохраняя при этом оптимальную производительность.

В основе этих стратегий управления лежит ПИ-регулятор, один из наиболее широко используемых инструментов в промышленной автоматизации и управлении технологическими процессами. ПИ-регуляторы высоко ценятся за свою простоту, универсальность и эффективность в поддержании желаемого выходного сигнала системы путем непрерывной корректировки управляющих воздействий на основе ошибки между заданным значением и измеренным выходным сигналом, как обсуждалось Цзюньи и Гао [7]. В фотоэлектрических системах, подключенных к сети, ПИ-регуляторы играют решающую роль в регулировании напряжения, тока и выходной мощности, обеспечивая оптимальное преобразование энергии и бесшовную интеграцию с электросетью. Однако производительность ПИ-регуляторов в значительной степени зависит от точной настройки двух их ключевых параметров: пропорционального и интегрального коэффициентов усиления.

Традиционные методы настройки ПИ-регуляторов, такие как ручная настройка или эвристические методы, например, метод Циглера-Николса, часто требуют многочисленных проб и ошибок, как отмечают Джрилифа и др.[8] и Чаради и др.[9]. Эти методы могут быть трудоемкими и не давать оптимальных результатов, особенно в сложных или высокودинамичных системах, таких как подключенные к сети фотоэлектрические установки, где быстрые изменения окружающей среды требуют адаптации в реальном времени. Кроме того, настройка ПИ-регулятора с частичной оптимизацией может привести к таким сложностям, как медленное время реагирования, перегрузка входным сигналом и нестабильность, что подрывает эффективность и надежность фотоэлектрической системы.

Для преодоления этих ограничений в данной статье исследуется применение алгоритма поиска воробья (SSA) в качестве метода оптимизации для настройки ПИ-регуляторов в подключенных к сети фотоэлектрических системах. SSA — это относительно новый алгоритм оптимизации,

вдохновленный интеллектуальным поведением воробьев при поиске пищи, в частности, их способностью балансировать между исследованием и использованием в поисках оптимальных источников пищи. В контексте настройки ПИ-регуляторов SSA предлагает надежный и эффективный метод исследования сложных пространств решений, что делает его хорошо подходящим для оптимизации параметров ПИ-регуляторов в динамических системах.

Использование SSA для настройки ПИ-регулятора в подключенных к сети фотоэлектрических системах открывает ряд потенциальных преимуществ, включая повышение эффективности вывода энергии, более оперативное время реагирования системы и повышение стабильности при различных условиях эксплуатации. Автоматически контролируя параметры ПИ-регулятора в ответ на изменения в рабочей среде фотоэлектрической системы в режиме реального времени, SSA может значительно повысить общую производительность системы.

Несмотря на растущий интерес к интеллектуальному управлению фотоэлектрическими системами, подключенными к сети, остается ряд пробелов в исследованиях. Многие существующие исследования сосредоточены на традиционных методах настройки или основаны на алгоритмах, таких как PSO или GA, которые часто страдают от медленной сходимости или попадания в локальные оптимумы в условиях высокой динамики. Кроме того, адаптивность в реальном времени при колебаниях освещенности по-прежнему ограничена во многих подходах к управлению на основе ПИ-регуляторов, что приводит к снижению точности MPPT и нестабильности напряжения. Что наиболее важно, лишь немногие работы предлагают комплексную стратегию настройки на основе алгоритма поиска воробья, которая одновременно улучшает качество электроэнергии, скорость сходимости и устойчивость регулятора. В данной статье эти вопросы решаются путем использования ПИ-регулятора, настроенного с помощью алгоритма поиска воробья, который превосходит традиционные подходы по ключевым показателям производительности, обеспечивая надежную и эффективную интеграцию фотоэлектрических систем в интеллектуальные микросети.

Данная статья призвана внести вклад в развивающуюся область управления возобновляемой энергией, представив систематический подход к настройке ПИ-регулятора с использованием SSA. С помощью подробных моделирований и практических примеров мы продемонстрируем, как SSA может оптимизировать производительность фотоэлектрических систем, подключенных к сети, предоставляя ценные сведения для инженеров и исследователей, работающих над интеграцией возобновляемой энергии. Ожидается, что полученные результаты будут способствовать переходу к более устойчивым и эффективным энергетическим системам, в конечном итоге способствуя глобальным мерам по борьбе с изменением климата и продвижению более экологичного будущего.

2) Смежные направления исследований

Для всестороннего понимания современных достижений в стратегиях оптимизации и управления фотоэлектрическими системами и связанными с ними приложениями в этом разделе рассматривается ряд последних исследований. В этих работах исследуются инновационные подходы к решению задач энергоэффективности, динамической адаптивности и стабильности системы, подчеркивая их актуальность для предлагаемой методологии. Али и др. [10] исследовали оптимизацию подключенных к сети фотоэлектрических систем с использованием искусственных нейронных сетей (ANN), обученных с помощью оптимизации роя частиц, в сравнении с традиционным алгоритмом возмущения (изменения) и наблюдения. Исследование подчеркивает превосходство ANN-PSO в снижении колебаний, повышении скорости отслеживания и обеспечении стабильной подачи энергии в различных условиях. Оно акцентирует внимание на надежности и устойчивости передовых метаэвристических методов, таких как ANN-PSO, в повышении производительности фотоэлектрических систем, что делает их хорошо подходящими для

динамических условий эксплуатации и решения проблем эффективности в системах возобновляемой энергии. Алаас и др. [11] обсудили передовой подход к управлению MPPT для фотоэлектрических систем с использованием нечеткого планирования коэффициентов усиления для ПИД-регуляторов (FGS-PID) в сочетании с адаптивными коэффициентами масштабирования. Разработанный метод объединяет нечеткую логику с модифицированным алгоритмом оптимизации поиска жидкости (MFSO) для точной настройки функций принадлежности и достижения превосходных характеристик MPPT. Исследование подчеркивает способность контроллера FGSPID-MFSO решать стандартные задачи MPPT, обеспечивая повышенную точность, более быстрое отслеживание и минимизацию колебаний мощности в различных условиях окружающей среды. Салим и др. [12] представили усовершенствованную стратегию управления MPPT для автономных фотоэлектрических систем с использованием адаптивного ПИД-контроллера дробного порядка (A-FOPID). Благодаря объединению дробного исчисления с законом адаптации в режиме реального времени, контроллер динамически корректирует свои параметры на основе ошибок системы, повышая гибкость и надежность. В отличие от традиционных методов, таких как P&O и постепенно возрастающая проводимость, или вычислительно сложных подходов на основе нейронных сетей, AFOPID обеспечивает превосходную точность отслеживания, уменьшение колебаний и более быструю переходную реакцию. Моделирование подтверждает его эффективность по сравнению с традиционными PID и FOPID контроллерами в динамических условиях. Рафия и др. [13] представили адаптивный ПИ-контроллер на основе ANN в сочетании с методом поиска экстремума (ES) для отслеживания точки максимальной мощности в ветроэнергетических системах с использованием DFIG. Предложенный контроллер корректирует параметры ПИ в реальном времени с помощью адаптивной ANN для обеспечения бесперебойной работы в условиях переменного ветра. Метод поиска экстремума улучшает MPPT, устраняя необходимость в датчиках скорости ветра, снижая сложность системы и затраты. Агила-Леон и др. [14] исследовали гибридный метод метаоптимизации, который сочетает в себе алгоритм оптимизации "Стаи серых волков" (GWO) и алгоритм оптимизации роем частиц (PSO) для повышения производительности контроллера MPPT для фотоэлектрических систем. Предложенный подход GWO-PSO решает проблемы изменчивости окружающей среды путем точной настройки гиперпараметров PSO для точной оптимизации. Моделирование, проведенное в различных условиях, демонстрирует значительные улучшения точности отслеживания, стабильности и энергоэффективности по сравнению с традиционными методами, такими как P&O и постепенно возрастающая проводимость. Исследование подчеркивает устойчивость метаоптимизации для динамических фотоэлектрических систем. Мохаммад и др. [15] представили гибридный алгоритм оптимизации на основе синуса-косинуса и пятнистой гиены (Hybrid SSC) для точной настройки ПИ-контроллера в микросетях с фотоэлектрическими системами, ветровыми электростанциями, топливными элементами и аккумуляторными батареями. Объединяя возможности исследования и применения, алгоритм оптимизирует восемь ПИ-контроллеров, повышая динамическое реагирование и стабильность системы. Результаты моделирования демонстрируют значительное улучшение производительности по сравнению с традиционными методами, обеспечивая бесперебойную работу в различных условиях. Это исследование подчеркивает потенциал гибридного метода оптимизации SSC для эффективного управления энергией в сложных микросетевых системах, интегрированных с возобновляемыми источниками энергии. Маларвили и др. [17] представили новый самонастраивающийся ПИД-контроллер на основе ГА-нечеткой логики для автоматического управления генерацией (AGC) в многозональных гибридных системах возобновляемой энергии, включающих ветровую, биомассовую и солнечную энергию. Контроллер сочетает генетические алгоритмы (ГА) и нечеткую логику для динамического регулирования частоты и управления нагрузкой. Минимизируя интеграл взвешенной по времени абсолютной ошибки (ITAE), метод демонстрирует превосходные результаты по сравнению с традиционными методами оптимизации, такими как PSO и SA. Результаты моделирования подтверждают его эффективность в повышении стабильности системы, уменьшении отклонений

частоты и оптимизации использования возобновляемой энергии. Загба и др. [18] представили новую гибридную технику MPPT, интегрирующую нечеткую логику и управление скользящим режимом для повышения производительности подключенных к сети фотоэлектрических систем в условиях переменной атмосферы. Нечеткая логика управляет неопределенностями во входных данных, а управление скользящим режимом обеспечивает стабильность и быстродействие. Кроме того, алгоритмы PSO и GA точно настраивают параметры ПИ-контроллера на стороне сети. Предложенный подход повышает эффективность отслеживания, стабильность и время реагирования, значительно превосходя традиционные методы MPPT. Рафия и др. [19] предложили гибридную стратегию управления для асинхронных двигателей, сочетающую адаптивный контроллер ANN-PID для регулирования скорости и нейронный прогнозный регулятор силы тока (NPC), оптимизированный с помощью алгоритма оптимизации роем частиц. ANN-PID адаптирует параметры в реальном времени для повышения устойчивости, а NPC минимизирует ошибки отслеживания тока и пульсации крутящего момента. Многоконтурная конструкция использует объединение ANN и PSO, демонстрируя превосходные результаты по сравнению с традиционными методами в ходе моделирования, с улучшенным снижением пульсаций крутящего момента, адаптивностью и устойчивостью при изменяющихся нагрузках и параметрах двигателя. Кроме того, Бэйбс и др. [20] предложили нечеткий регулятор дробного порядка, настроенный с помощью метода оптимизации роем частиц на основе обучения для двигателя постоянного тока с постоянными магнитами, приводимого в движение фотоэлектрической системой, что значительно уменьшило пульсации и улучшило стабильность двигателя в условиях колебаний. Талби и др. [21] ввели механизм настройки Sugeno-fuzzy в рамках модельного прогнозирующего управления для оптимизации весового коэффициента для многоуровневых инверторов, подключенных к PV сети, что улучшило реагирование инвертора и соответствие сети. Более того, Шауш и др. [22] применили стратегию управления в реальном времени на основе Arduino для двигателей постоянного тока, используемых в системах подачи проволоки, питаемых от PV, предлагая недорогой и практичный подход к реализации управления возобновляемыми источниками энергии. В дополнение к вышеупомянутым методам, в недавних исследованиях были изучены альтернативные метаэвристические подходы, применяемые к энергетическим системам и управлению. Например, Хамуда и др. [23] предложили ПИ-регулятор дробного порядка на основе оптимизации муравьиной колонией для повышения устойчивости систем подачи проволоки с приводом от двигателя постоянного тока с постоянными магнитами. Оптимизация стай серых волков была применена для проектирования и повышения производительности сверхширокополосных антенн с использованием структур DGS [24]. Усовершенствованный метод оптимизации роем частиц, включающий помехи, был представлен Мезааче и др. [25] для решения задач оптимального распределения реактивной нагрузки (ORPD). Кроме того, для улучшения характеристик управления ветротурбинами на базе DFIG были использованы оптимизированные с помощью SSO нечеткие ПИД-регуляторы дробного порядка [26]. Эти работы подчеркивают универсальность методов оптимизации, вдохновленных природой, в различных областях силовой электроники и управления. В таблице 1 приведены основные характеристики и вклад наиболее важных работ в литературе.

3) Вклад в научную работу

В данной статье представлены несколько основных результатов исследований по оптимизации ПИ-регулирования для подключенных к сети фотоэлектрических систем с использованием алгоритма поиска воробья:

Новое применение SSA для настройки ПИ-регуляторов. SSA представлен как новый метод оптимизации для настройки ПИ-регуляторов в фотоэлектрических системах, подключенных к сети. Подчеркивается, что баланс между исследованием и применением, обеспечиваемый SSA, делает его более эффективным в поиске оптимальных параметров ПИ-регуляторов по сравнению с традиционными методами.

Повышенная точность управления фотоэлектрическими системами. Благодаря применению SSA достигается повышенная точность управления за счет оптимизации параметров ПИ-регулятора, что приводит к более стабильным уровням напряжения и тока. Это имеет решающее значение для обеспечения бесперебойного объединения с сетью и поддержания стандартов качества энергии.

Улучшенное реагирование динамической системы на помехи. ПИ-контроллер, настроенный с помощью алгоритма SSA, демонстрирует улучшенное реагирование динамической системы на помехи, позволяя быстро адаптироваться к колебаниям нагрузки и условий генерации. Эта адаптивность необходима для управления прерывистостью солнечной энергии в режиме реального времени при работе энергосистемы.

Улучшенная производительность MPPT. В систему введен новый гибридный подход MPPT, сочетающий SSA с передовыми стратегиями управления для обеспечения эффективного извлечения энергии в изменяющихся атмосферных условиях. Это включает в себя улучшенную эффективность отслеживания, быструю сходимость к точке максимальной мощности и снижение колебаний мощности.

Стабильность и устойчивость при введении в сеть. Стабильность фотоэлектрической системы, подключенной к сети, повышается за счет эффективной настройки параметров ПИ-регулятора с использованием SSA, что снижает колебания и обеспечивает бесперебойную работу. Кроме того, демонстрируется устойчивость к внешним помехам и изменяющимся условиям окружающей среды, таким как изменения интенсивности излучения и температуры.

Таблица 1. Обобщение результатов смежных направлений исследований

Reference	Method	Key Contributions
[10]	ANN-PSO for MPPT	Reduces oscillations, improves tracking speed, and ensures stable energy delivery under varying conditions.
[11]	FGS-PID with MFSO	Accurate tracking, fast response, and minimized power fluctuations under dynamic environmental conditions.
[12]	Adaptive fractional order PID (AFOPID)	Superior tracking accuracy, reduced oscillations, and faster transient response in standalone PV systems.
[13]	Adaptive ANN-PI with ES	Real-time parameter adjustment for robust MPPT in wind energy systems, eliminating the need for wind speed sensors.
[14]	Hybrid GWO-PSO	Enhances MPPT accuracy, stability, and energy efficiency under dynamic environmental conditions.
[15]	Hybrid SSC Algorithm	Precise PI tuning for microgrids, improving dynamic response and system stability in renewable energy systems.
[16]	GA-Fuzzy Logic Self-Tuning PID	Improves AGC in hybrid renewable systems, ensuring dynamic frequency regulation and load management.
[18]	Fuzzy Logic and Sliding Mode Control with PSO and GA	Enhances MPPT tracking efficiency, stability, and response time for grid-connected PV systems.
[19]	Adaptive ANN-PID and NPC	Combines ANN and PSO for torque ripple reduction, adaptability, and robust performance in induction motor control.
[20]	TLBO-Fuzzy FOPID for PMDC Motor Control	Enhances ripple reduction and robustness in PV-powered wire feeder systems using fractional-order fuzzy PID and TLBO.
[21]	Sugeno-Fuzzy MPC Weight Tuning	Improves control of PV grid-tied PUC7 inverters with Sugeno-fuzzy MPC weight adaptation, ensuring fast and stable inverter performance.
[22]	Arduino-Based DC Motor Control	Offers a cost-effective, real-time implementation for wirefeed systems powered by PV energy.

Систематическая методология управления в реальном времени. Предлагается систематическая методология настройки ПИ-регулятора в реальном времени с использованием SSA, обеспечивающая масштабируемое и адаптируемое решение для фотоэлектрических систем и других приложений возобновляемой энергетики. Показано, что эта методология может быть расширена на динамические системы, требующие адаптации параметров управления в реальном времени.

Моделирование и сравнительный анализ. Проведено широкомасштабное моделирование для подтверждения эффективности настройки ПИ-регулятора на основе SSA, и его производительность сравнивается с другими методами оптимизации. Показано, что SSA превосходит традиционные методы настройки по стабильности, времени реагирования и минимизации ошибок.

4) Содержание статьи

Данная статья построена следующим образом: введение описывает контекст и задачи интеграции фотоэлектрических систем. Обзор смежных направлений исследований содержит последние достижения в области оптимизации и стратегий управления. В «Методология. Раздел 1» описывается предлагаемый ПИ-регулятор, настроенный с помощью алгоритма SSA. Результаты в разделе 2 и обсуждение оценивают его производительность с помощью моделирования. Наконец, в разделе 3 подводятся итоги и намечаются направления будущих исследований.

1 Методология

1.1 Модель системы

Подключенные к сети фотоэлектрические системы играют решающую роль в интеллектуальных микросетях, предлагая устойчивые энергетические решения и обеспечивая эффективное управление энергией и стабильность сети. Эти системы состоят из фотоэлектрической батареи, этапа преобразования энергии и системы управления для регулирования потока энергии между фотоэлектрической батареей и сетью. Предлагаемая структура системы изображена на рис. 1.

Стратегия управления такими системами должна учитывать следующее:

Отслеживание точки максимальной мощности (MPPT) обеспечивает максимальное извлечение энергии из фотоэлектрической батареи в изменяющихся условиях окружающей среды.

Регулирование напряжения звена постоянного тока поддерживает стабильное промежуточное напряжение для эффективного преобразования энергии.

Интеграция в сеть и контроль качества электроэнергии обеспечивают синхронизацию с сетью, контролирует потоки активной и реактивной мощности и минимизирует гармонические помехи.

1) Модель фотоэлектрической батареи

Фотоэлектрическая батарея преобразует солнечное излучение в электрическую энергию. Выходной ток (I_{pv}) и напряжение (V_{pv}) определяются нелинейными вольт-амперными характеристиками [27]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{nKT}} - 1 \right) \quad (1)$$

где

I_{ph} : фототок, пропорциональный солнечной радиации (G) и температуре (T),

I_s : обратный ток насыщения,

R_s : последовательное сопротивление,

R_{sh} : обратное шунтовое сопротивление,

q : элементарный заряд ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C),

K : постоянная Больцмана,

n : Коэффициент идеальности диода. Выходная мощность фотоэлектрической батареи (P_{pv}) определяется следующим образом:

$$P_{pv} = V_{pv} I_{pv} \quad (2)$$

2) DC-DC повышающий преобразователь

Повышающий преобразователь увеличивает напряжение фотоэлектрической панели до требуемого напряжения звена постоянного тока с помощью переключающего устройства, управляемого сигналом широтно-импульсной модуляции. Выходное напряжение определяется формулой [27,28]:

$$V_{dc} = \frac{V_{pv}}{1 - D} \quad (3)$$

где D — коэффициент заполнения, скорректированный алгоритмом MPPT.

Динамика тока индуктора (I_L) и напряжения конденсатора в повышающем преобразователе описывается [27,28]:

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv} - V_{dc}(1 - D) \quad (4)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = I_L(1 - D) - I_{dc} \quad (5)$$

где

I_{dc} : ток, подаваемый на преобразователь.

C : мощность конденсатора звена постоянного тока,

3) Конденсатор звена постоянного тока

Конденсатор звена постоянного тока обеспечивает стабильную подачу питания на преобразователь. Его динамика описывается формулами [27,28]:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{pv} - I_{inv} \quad (6)$$

где I_{inv} — ток, потребляемый преобразователем.

4) DC-AC преобразователь (преобразователь постоянного тока в переменный)

Преобразователь постоянного тока в переменный трансформирует напряжение звена постоянного тока в переменное напряжение для подключения к сети. Выходное напряжение инвертора составляет [27]:

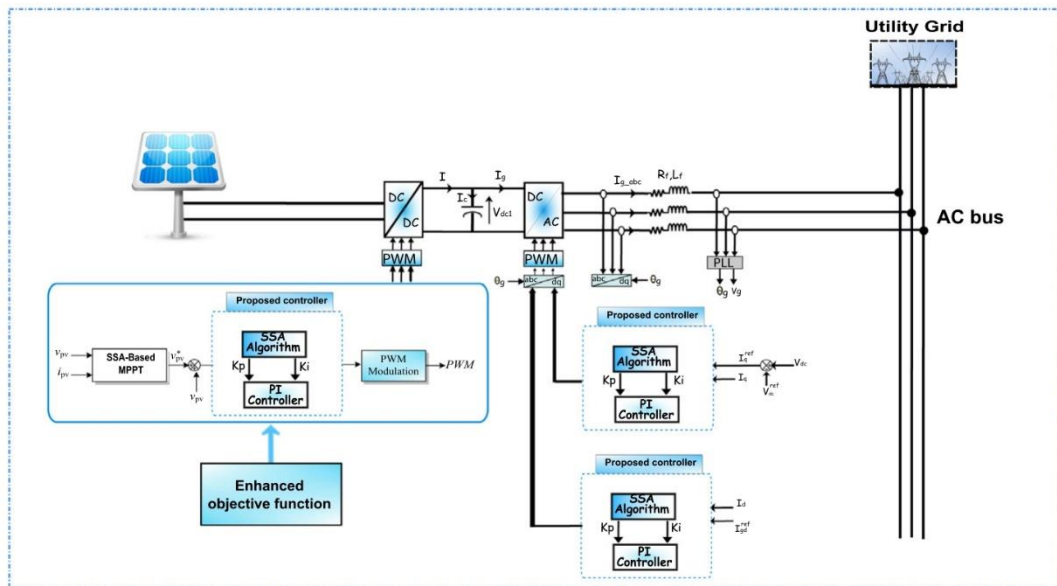


Рис. 1. Предлагаемая структура для ПИ-регулирования с настройкой по методу SSA в фотоэлектрических системах, подключенных к сети.

$$V_{\text{grid}} = M \cdot V_{\text{dc}} \quad (7)$$

где M — коэффициент модуляции.

Цели управления преобразователем: [29,30]:

Управление активной мощностью:

$$P = \frac{3}{2} V_{\text{grid}} I_d \quad (8)$$

Управление реактивной мощностью:

$$Q = \frac{3}{2} V_{\text{grid}} I_q \quad (9)$$

где I_d — ток по продольной оси, управляющий активной мощностью, а I_q — ток по поперечной оси, управляющий реактивной мощностью.

При работе с коэффициентом мощности, равным единице, значение I_q поддерживается равным нулю.

5) Управление MPPT

Для максимального увеличения извлечения энергии алгоритм MPPT управляет коэффициентом заполнения повышающего преобразователя. MPPT обеспечивает [31]:

$$\frac{dP_{\text{pv}}}{dV_{\text{pv}}} = 0 \quad (10)$$

6) Управление со стороны сети

Управление со стороны сети играет решающую роль в обеспечении беспрепятственной интеграции фотоэлектрической системы с энергосетью. Оно обеспечивает синхронизацию с напряжением сети,

поддерживает стабильный поток мощности и регулирует как активную, так и реактивную мощность в соответствии со стандартами сети.

Цели управления. Управление со стороны сети сосредоточено на следующих ключевых целях [32]:

Отслеживание активной мощности. Система управления обеспечивает передачу в сеть активной мощности, вырабатываемой фотоэлектрической системой, с минимальными потерями. Опорный

$$(I_d^*)$$

ток по продольной оси рассчитывается следующим образом:

$$I_d^* = \frac{P_{pv}}{V_{grid}} \quad (11)$$

где

P_{pv} : электроэнергия, вырабатываемая фотоэлектрической системой,

V_{grid} : среднеквадратичное значение напряжения сети.

Такая зависимость гарантирует, что передача активной мощности в сеть прямо пропорциональна выходной мощности фотоэлектрической системы.

Отслеживание реактивной мощности. Для поддержания коэффициента мощности, равного единице опорный ток по поперечной оси (I_q^*) устанавливается следующим образом:

$$I_q^* = 0 \quad (12)$$

Это гарантирует отсутствие обмена реактивной мощностью с сетью, что повышает общую эффективность системы и минимизирует сбой напряжения в сети.

1.2 Постановка задачи

Задача управления фотоэлектрическими системами, подключенными к сети в интеллектуальных микросетях, решается с помощью нескольких задач, каждая из которых нацелена на определенный показатель производительности для повышения функциональности системы.

Регулирование напряжения звена постоянного тока. Минимизация ошибки отслеживания напряжения звена постоянного тока во времени:

$$\min J_1 = \int_0^T |V_{dc}^* - V_{dc}(t)| dt \quad (13)$$

где V_{dc}^* — это базовое напряжение звена постоянного тока, а $V_{dc}(t)$ — измеренное напряжение.

Отслеживание точки максимальной мощности (MPPT). Минимизация ошибки отслеживания выходной мощности, обеспечивающая максимальное извлечение энергии из фотоэлектрической системы:

$$\min J_2 = \int_0^T |P_{mppt}^* - P_{pv}(t)| dt \quad (14)$$

где P_{mppt}^* — это базовая точка максимальной мощности, а $P_{pv}(t)$ — измеренная мощность.

Качество электроэнергии и плавное управление. Минимизация отклонений в отслеживании тока в сети и скорости изменения управляющего воздействия для обеспечения бесперебойной работы:

$$\min_3 = \int_0^T \left[\alpha_1 |I_{d,ref}(t) - I_{d,meas}(t)| + \alpha_2 |I_{q,ref}(t) - I_{q,meas}(t)| + \alpha_3 \left| \frac{du(t)}{dt} \right| \right] dt \quad (15)$$

– $I_{d,ref}(t), I_d(t)$: Reference and measured direct axis grid currents.

– $I_{q,ref}(t), I_q(t)$: Reference and measured quadrature axis grid currents.

– $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: Weighting factors for each term to balance their contributions.

Каждая из целей (J_1, J_2 , и J_3) способствует достижению эффективного регулирования напряжения, максимального извлечения мощности, высокого качества электроэнергии и бесперебойной работы в динамических условиях.

Ограничения системы. Задача оптимизации подчиняется ряду ограничений, обеспечивающих физическую и эксплуатационную жизнеспособность системы. Эти ограничения касаются эксплуатационных пределов фотоэлектрической системы, управляющих воздействий, требований к качеству электроэнергии и динамического поведения системы. Каждое ограничение имеет решающее значение для поддержания стабильной и бесперебойной работы в реальных условиях.

1) Ограничения работы фотоэлектрической батареи

Для предотвращения возникновения сбоев и обеспечения оптимальной производительности фотоэлектрическая батарея должна работать в пределах своих физических ограничений. Ограничения на напряжение (V_{pv}) и ток (I_{pv}) фотоэлектрической батареи выражаются следующим образом:

$$V_{pv,min} \leq V_{pv}(t) \leq V_{pv,max}, I_{pv,min} \leq I_{pv}(t) \leq I_{pv,max} \quad (16)$$

$V_{pv,min}$ и $V_{pv,max}$: минимально и максимально допустимые значения напряжения для фотоэлектрической батареи.

$I_{pv,min}$ и $I_{pv,max}$: минимально и максимально допустимые значения тока для фотоэлектрической батареи.

Эти ограничения учитывают эксплуатационную безопасность и эффективность, принимая во внимание переменные условия окружающей среды, такие как интенсивность излучения и температура.

2) Ограничения управления

Входной сигнал управления, представленный коэффициентом заполнения ($u(t)$) DC-DC преобразователя, должен быть ограничен, чтобы предотвратить нестабильность и обеспечить работоспособность силовой электроники:

$$u_{min} \leq u(t) \leq u_{max} \quad (17)$$

где

- $u_{\min}$: минимальный рабочий цикл для поддержания стабильного выходного сигнала.
- $u_{\max}$: максимально допустимый рабочий цикл во избежание перегрузки элементов.

Это ограничение гарантирует, что DC-DC преобразователь работает в пределах своих проектных возможностей и поддерживает стабильность системы.

3) Качество электроэнергии в сети и плавное управление

Для обеспечения соответствия стандартам качества электроэнергии и бесперебойной работы системы необходимо минимизировать ошибки отслеживания токов сети и скорость изменения управляющего воздействия в пределах установленных ограничений:

$$\alpha_1 |I_{d,\text{ref}}(t) - I_{d,\text{meas}}(t)| + \alpha_2 |I_{q,\text{ref}}(t) - I_{q,\text{meas}}(t)| + \alpha_3 \left| \frac{du(t)}{dt} \right| \leq \text{Error}_{\text{limit}} \quad (18)$$

где $\text{Error}_{\text{limit}}$ — это максимально допустимое отклонение, необходимое для обеспечения качества электроэнергии.

Такое ограничение гарантирует, что система поддерживает точное отслеживание тока в сети, избегая при этом чрезмерных колебаний управляющего воздействия, что улучшает как качество электроэнергии, так и стабильность системы.

Меняющиеся величины, подаваемые на вход решающего устройства. Оптимизация направлена на поиск оптимальных значений параметров ПИ-регулятора:

$$X = \{ K_{p,\text{mppt}}, K_{i,\text{mppt}}, K_{p,\text{dc}}, K_{i,\text{dc}}, K_{p,\text{grid}}, K_{i,\text{grid}} \} \quad (19)$$

где K_p, K_i представляют собой пропорциональный и интегральный коэффициенты усиления для контроллеров отслеживания MPPT, напряжения звена постоянного тока и тока сети.

В данном случае:

Усовершенствования целевой функции. Для учета реальных условий в целевую функцию включены дополнительные условия:

Максимизация эффективности фотоэлектрических систем:

$$\eta_{\text{pv}} = \frac{P_{\text{pv}}}{P_{\text{irradiance}}} \quad (20)$$

Минимизация пульсаций напряжения:

$$\Delta V_{\text{dc}} = \max(V_{\text{dc}}(t)) - \min(V_{\text{dc}}(t)) \quad (21)$$

Управление реактивной мощностью:

$$Q_{\text{grid}} \approx 0 \quad (22)$$

1.3 Алгоритм поиска воробья (SSA)

1) Обзор SSA

SSA имитирует коллективное поведение воробьев при поиске пищи, разделяя популяцию на две основные группы: производителей и потребителей. Производители возглавляют процесс исследования для обнаружения новых потенциальных решений, в то время как потребители совершенствуют свои позиции, учась на успехах производителей. Это динамичное сотрудничество обеспечивает эффективную оптимизацию и адаптацию к сложным проблемным ситуациям [33].

Процесс SSA:

Процесс оптимизации SSA можно кратко описать следующими структурированными этапами:

Этап 1: инициализация параметров. SSA начинает работу с инициализации ключевых алгоритмических параметров, включая такие из них как:

общая численность популяции (N),

максимальное количество повторов ($G_{\max}$),

количество производителей (N_p), потребителей и разведчиков,

порог безопасности (ST) для адаптивного исследования.

Этап 2: формирование популяции. Начальные позиции воробьев генерируются в определенной матрице, представляющей область поиска:

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,D} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,D} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{n,D} \end{bmatrix} \quad (23)$$

где D — размерность задачи, а n — количество воробьев.

Положение каждого воробья представляет собой потенциальное решение в рамках пространства предметной области. Значения приспособленности для этих положений рассчитываются с использованием функции приспособленности $F(X)$:

$$F(X) = \begin{bmatrix} f(x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,D}) \\ f(x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,D}) \\ \vdots \\ f(x_{n,1}, x_{n,2}, \dots, x_{n,D}) \end{bmatrix} \quad (24)$$

Этап 3: разделение на производителей и потребителей. Воробьи делятся на производителей и потребителей в зависимости от их приспособленности:

Производители: эти «воробьи», представляющие собой наиболее эффективные решения, возглавляют поиск ресурсов.

Потребители: эти воробьи совершенствуют свои позиции, следуя за производителями и используя известные ресурсы.

Этап 4: корректировка местоположения. Позиции воробьев обновляются в соответствии с их ролями:

Обновление позиции производителей:

$$x_{i,j}(g+1) = \begin{cases} x_{i,j}(g) \cdot \exp\left(-\frac{i}{\alpha \cdot G_{\max}}\right), & r < ST \\ x_{i,j}(g) + Q \cdot L, & r \geq ST \end{cases} \quad (25)$$

где α — коэффициент масштабирования, r — случайный пороговый уровень, Q — нормально распределенная случайная величина, а L — единичный вектор.

Обновление позиции потребителей:

$$x_{i,j}(g+1) = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{x_{\text{worst},j} - x_{i,j}(g)}{t^2}\right), & i > N/2 \\ x_{\text{Pbest},j} - |x_{i,j}(g) - x_{\text{Pbest},j}| \cdot A^+ \cdot L, & i \leq N/2 \end{cases} \quad (26)$$

где x_{worst} — позиция наименее выгодного воробья, x_{Pbest} — позиция наиболее известного производителя, A^+ — адаптивный фактор, а L — случайный вектор.

Этапы с 5 по 8: Итеративное уточнение. Производители и потребители постоянно корректируют свои позиции, оценивают пригодность и совершенствуют свои роли. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто условие завершения, обычно максимальное количество повторов ($G_{\max}$). Это обеспечивает непрерывное улучшение позиций воробьев, стремясь к глобальному оптимуму.

2) Преимущества SSA

SSA предлагает ряд преимуществ:

Глобальная оптимизация. Алгоритм эффективно исследует пространство поиска для нахождения глобального оптимума.

Динамическая адаптация. Порог безопасности (ST) и адаптивные роли производителей и потребителей предотвращают преждевременное схождение.

Универсальность. SSA адаптируется к различным задачам оптимизации, включая задачи с ограничениями и без них.

Вычислительная эффективность. SSA требует меньшего количества гиперпараметров и демонстрирует низкие вычислительные затраты.

3) SSA для оптимизации параметров ПИ-регулятора

Алгоритм поиска воробья (SSA) используется для оптимизации параметров ПИ-регулятора (K_p , K_i), что повышает эффективность системы управления. Процесс оптимизации включает следующие этапы:

Этап 1. Меняющиеся величины, подаваемые на вход решающего устройства. Определите вектор решений:

$$X = [K_p, K_i] \quad (27)$$

Этап 2. Целевая функция. Для каждого варианта решения X оцените значение приспособленности $J(X)$ на основе predetermined показателей производительности:

$$J(X) = J_1, J_2, J_3 \quad (28)$$

где J_1, J_2, J_3 соответствуют отдельным целям, таким как регулирование напряжения звена постоянного тока, точность MPPT, улучшение качества электроэнергии.

Этап 3. Правила обновления позиций. Алгоритм SSA постоянно обновляет позиции воробьев (варианты решений) для исследования и использования области решения задачи. Популяция делится на производителей и потребителей, и их позиции обновляются следующим образом:

Обновление позиции производителей:

$$x_{i,j}(g+1) = \begin{cases} x_{i,j}(g) \cdot \exp\left(-\frac{i}{\alpha \cdot G_{\max}}\right), & r < ST \\ x_{i,j}(g) + Q \cdot L, & r \geq ST \end{cases} \quad (29)$$

Обновление позиции потребителей:

$$x_{i,j}(g+1) = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{x_{\text{worst},j} - x_{i,j}(g)}{P^2}\right), & i > N/2 \\ x_{\text{pbest},j} - |x_{i,j}(g) - x_{\text{pbest},j}| \cdot A^+ \cdot L, & i \leq N/2 \end{cases} \quad (30)$$

где:

$x_{i,j}$ — позиция j -го измерения для i -го воробья, r — случайное значение, управляющее исследованием или эксплуатацией, ST — порог безопасности для адаптивного исследования, Q, L — случайные переменные, обеспечивающие разнообразие в исследовании, x_{pbest} — позиция лучшего производителя, x_{worst} — позиция наихудшего воробья.

Этап 4. Обработка ограничений. Для обеспечения возможности оптимизации параметров необходимо установить ограничения на коэффициенты ПИ-регулятора:

$$K_p^{\min} \leq K_p \leq K_p^{\max}, K_i^{\min} \leq K_i \leq K_i^{\max} \quad (31)$$

Нижняя и верхняя границы параметров ПИ-регулятора (K_p, K_i) были выбраны на основе предыдущих методов настройки и критериев стабильности, полученных из традиционных правил Циглера-Никольса, при обеспечении стабильности и производительности системы в широком диапазоне профилей освещенности. В частности, K_p был ограничен значениями от 0,1 до 5, а K_i — от 0,01 до 1, чтобы избежать чрезмерного перерегулирования или замедленной реакции. Для алгоритма SSA размер популяции N , количество повторов $G_{\max}$, порог безопасности ST и коэффициент производителя были выбраны в соответствии с эмпирическими правилами, приведенными в [26], и подтверждены с помощью анализа чувствительности.

Этап 5. Критерии сходимости. Повторяйте этапы обновления данных о местоположении и оценки физической подготовки до тех пор, пока не будет выполнен один из следующих критериев:

Достигнуто максимальное количество повторов.

Изменение наилучшего значения функции приспособленности между последовательными повторами находится ниже заданного порогового значения.

4) Внедрение в системы управления

Оптимизированные параметры ПИ-регулятора $X^* = [K_p^*, K_i^*]$ применяются к системе управления фотоэлектрической системой, подключенной к сети. ПИ-регулятор, настроенный с помощью алгоритма SSA, обладает следующими преимуществами:

Повышенная точность отслеживания. Минимизирует ошибки в напряжении звена постоянного тока и MPPT, обеспечивая точное регулирование.

Динамическая адаптивность. Справляется с быстрыми изменениями солнечной радиации и условий нагрузки.

Улучшенное качество электроэнергии. Снижает гармонические помехи в токе сети, обеспечивая соответствие стандартам IEEE.

Устойчивое функционирование. Уменьшает резкие изменения в управляющих сигналах, увеличивая срок службы и надежность системы.

2. Обсуждение результатов

ПИ-регулятор, оптимизированный с помощью предложенного алгоритма поиска воробья (SSA), был протестирован в динамических условиях с использованием MATLAB/Simulink для оценки его устойчивости и эффективности в управлении фотоэлектрической системой, подключенной к сети. Результаты моделирования предоставляют ценную информацию о производительности регулятора по нескольким критически важным параметрам, демонстрируя его эффективность в реальных условиях эксплуатации.

На рис. 2 показан профиль освещенности, применяемый к фотоэлектрической системе, с ступенчатыми изменениями, введенными для имитации реальных атмосферных условий. Профиль демонстрирует эффективность предложенной стратегии управления на основе SSA в обработке динамических колебаний освещенности. Эти резкие изменения проверяют механизм MPPT и стабильность управления системы, обеспечивая строгую проверку адаптивности регулятора. Полученные результаты для активной и реактивной мощности, напряжения звена постоянного тока и производительности сети подтверждают надежность и точность ПИ-регулятора, настроенного на основе SSA, в реагировании на эти изменения окружающей среды.

На рис. 3 показана выходная активная мощность фотоэлектрической системы, подключенной к сети, при изменяющихся условиях освещенности, представленных на рис. 3. Активная мощность точно отслеживает изменения освещенности с минимальной задержкой и без значительных помех. Это указывает на превосходные характеристики MPPT оптимизированного по SSA ПИ-регулятора, что обеспечивает эффективное извлечение энергии даже при быстрых изменениях условий окружающей среды. Способность системы быстро сходить к новому уровню мощности подчеркивает улучшенные динамические характеристики регулятора. По сравнению с традиционными методами настройки, ПИ-регулятор на основе SSA демонстрирует заметное улучшение эффективности и стабильности отслеживания мощности, что имеет решающее значение для поддержания надежной работы сети. Такое поведение подтверждает эффективность системы MPPT, поскольку ПИ-регулятор, настроенный с помощью SSA, обеспечивает быстрое отслеживание мощности с минимальной задержкой или перерегулированием даже при резких изменениях интенсивности излучения.

Algorithm 1 (*SSA-based PI control optimization*).

Initialize the control parameters for SSA, including population size (N), maximum iterations ($G_{\max}$), number of producers (N_p), and safety threshold (ST).

Set the bounds for K_p and K_i .

Generate an initial population of sparrows with random values for K_p and K_i within the specified bounds. Evaluate the initial fitness of each sparrow using the objective function $J(X)$.

Set the best fitness value to J_{Pbest} and record the corresponding position as X_{Pbest} .

Initialize $t = 1$.

while $t \leq G_{\max}$ **do**

Sort the population based on fitness values in ascending order.

Assign the top N_p sparrows as producers.

for each producer i **do**

Update the producer's position based on:

$$X_{i,j}(t+1) = X_{i,j}(t) \cdot \exp\left(-\frac{i}{\alpha \cdot G_{\max}}\right), \text{ if } r < \text{ST} \quad (32)$$

end for $X_{i,j}(t+1) = X_{i,j}(t) + Q \cdot L, \text{ if } r \geq \text{ST}$

for each scrounger $i > N_p$ **do**

Update the scrounger's position based on:

$$X_{i,j}(t+1) = Q \cdot \exp\left(\frac{X_{\text{worst},j} - X_{i,j}(t)}{P}\right), \text{ if } i > N/2 \quad (33)$$

$$X_{i,j}(t+1) = X_{\text{Pbest},j} - |X_{i,j}(t) - X_{\text{Pbest},j}| \cdot A^+ \cdot L, \text{ if } i \leq N/2$$

end for

Enforce parameter constraints:

$$K_p = \max\left(K_p^{\min}, \min\left(K_p, K_p^{\max}\right)\right) \quad (34)$$

$$K_i = \max\left(K_i^{\min}, \min\left(K_i, K_i^{\max}\right)\right)$$

Recalculate the fitness for all sparrows using $J(X)$

Update X_{Pbest} if a new global best solution is found.

Increment t by 1.

end while

Output the optimal PI parameters $X_{\text{Pbest}} = [K_p^* ; K_i^*]$.

На рис. 4 показана реактивная мощность фотоэлектрической системы в течение периода моделирования. Реактивная мощность остается неизменно равной нулю, точно совпадая с опорным сигналом, даже при колебаниях интенсивности излучения. Этот результат подчеркивает точность регулятора в разделении управления активной и реактивной мощностью, обеспечивая коэффициент мощности, равный единице. Поддержание нулевого уровня реактивной мощности не только минимизирует потери энергии, но и обеспечивает соответствие нормам энергосистемы, что делает систему высокоэффективной и совместимой с требованиями современных интеллектуальных энергосетей. Практически нулевой уровень реактивной мощности на протяжении всего моделирования подтверждает успешность регулятора в обеспечении коэффициента мощности, равного единице, гарантируя минимальный обмен реактивной энергией с сетью.

На рис. 5 показана характеристика напряжения звена постоянного тока системы. Напряжение остается стабильно регулируемым вблизи опорного значения 1000 В даже при изменениях освещенности, показанных на рис. 3. ПИ-регулятор, настроенный с помощью алгоритма SSA, обеспечивает быструю коррекцию незначительных отклонений, предотвращая значительное перерегулирование или недорегулирование. Эта стабильность имеет важное значение для надежной работы преобразователя, который зависит от стабильного входного напряжения постоянного тока для поддержания эффективного преобразования энергии. Превосходные

характеристики настройки на основе SSA в поддержании стабильности напряжения в динамических условиях подчеркивают надежность и адаптивность, что является критически важными характеристиками для реальных фотоэлектрических систем. Жестко регулируемое напряжение вблизи опорного значения 1000 В демонстрирует способность регулятора стабилизировать звено постоянного тока во время колебаний освещенности, обеспечивая стабильную работу преобразователя.

На рис. 6 представлены временные диаграммы напряжения и тока сети. Синхронизация между двумя временными диаграммами демонстрирует эффективное управление потоком мощности, при этом минимизированный фазовый угол указывает на коэффициент мощности, равный единице. Синусоидальный характер временных диаграмм дополнительно отражает соответствие системы стандартам сети и ее способность минимизировать гармонические искажения. Несмотря на колебания солнечной радиации, временные диаграммы напряжения и тока остаются стабильными, что подчеркивает надежность ПИ-регулятора, настроенного с помощью SSA. Эти результаты подтверждают способность регулятора поддерживать качество электроэнергии и обеспечивать эффективную интеграцию фотоэлектрической системы с сетью. Фазовое выравнивание и синусоидальный характер напряжения и тока подтверждают надлежащую синхронизацию с сетью и минимальное содержание гармоник, что указывает на отличное качество электроэнергии.

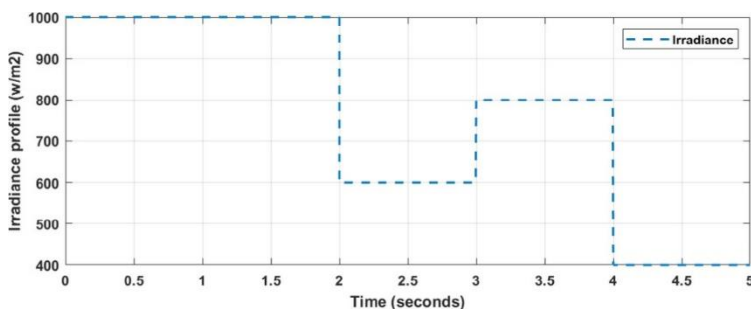


Рис. 2. Профиль освещенности фотоэлектрической системы.

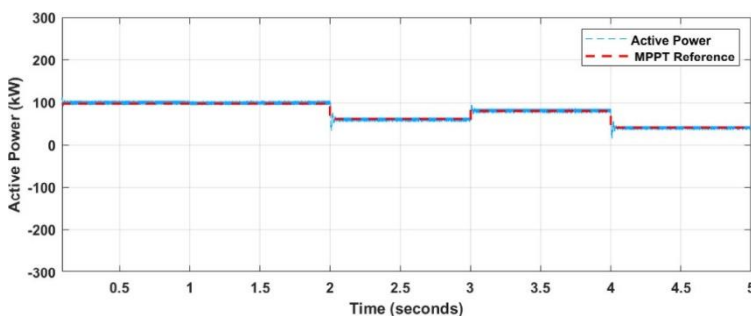


Рис. 3. Результаты измерения активной выходной мощности.

На рис. 7 показано поведение трехфазного тока сети при различных условиях солнечной радиации. Формы тока остаются синусоидальными и стабильными при всех условиях эксплуатации. Переходный процесс происходит примерно через 3 с из-за внезапного изменения солнечной радиации, но настроенный с помощью SSA ПИ-регулятор быстро стабилизирует систему с минимальным перерегулированием и колебаниями. Этот результат указывает на способность регулятора динамически адаптироваться к изменяющимся условиям производства, сохраняя при этом соответствие требованиям сети. Кроме того, минимальный общий коэффициент гармонических искажений (THD), наблюдаемые в текущих формах сигналов, подтверждает эффективность регулятора в обеспечении высокого качества электроэнергии и соответствия стандартам IEEE 519 по управлению гармониками. Несмотря на кратковременное нарушение режима работы на 3 с, регулятор SSA быстро восстанавливает текущие формы сигналов с минимальным перерегулированием, подтверждая свою динамическую устойчивость.

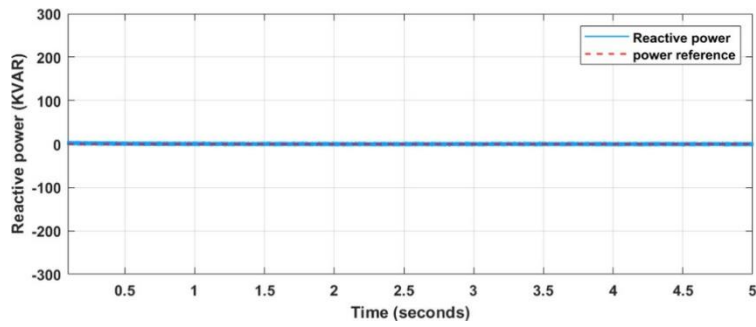


Рис. 4. Результаты отслеживания реактивной мощности.

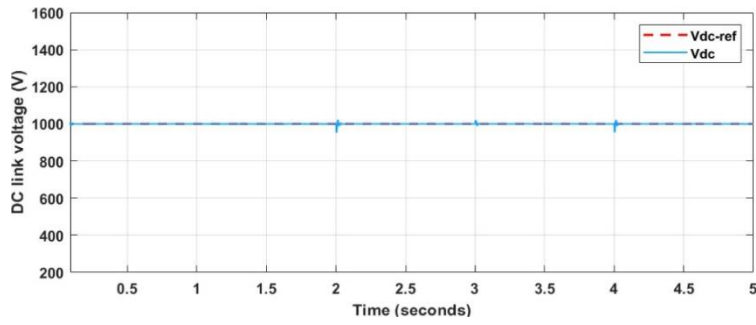


Рис. 5. Результаты стабильности напряжения в звене постоянного тока.

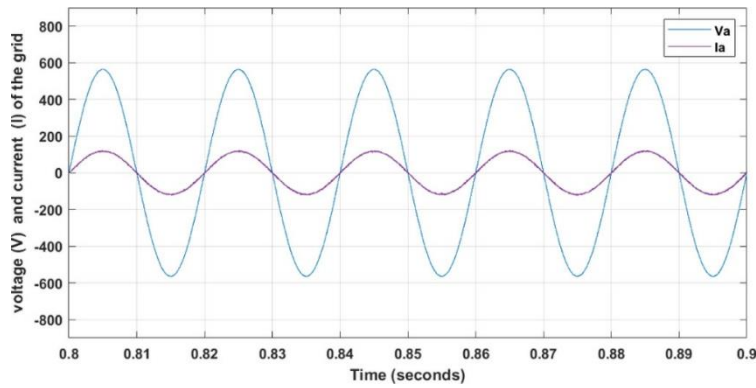


Рис. 6. Результаты синхронизации напряжения и тока сети.

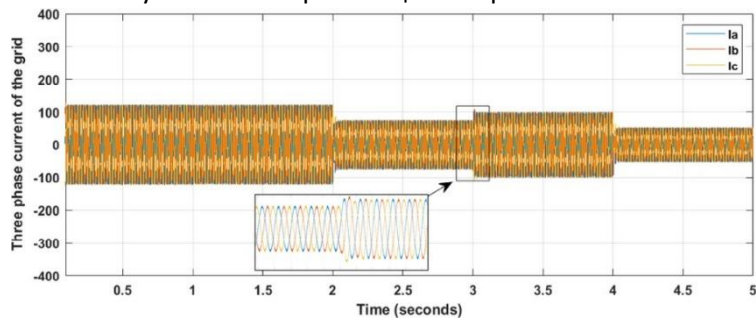


Рис. 7. Результаты измерения трехфазного тока в сети.

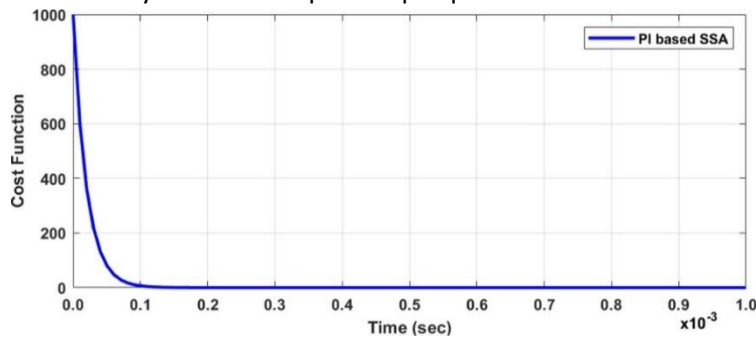


Рис. 8. Сходимость целевой функции ПИ-регулятора, настроенного с помощью SSA.

На рис. 8 показана развитие функции потерь в процессе оптимизации с использованием алгоритма SSA. Функция потерь быстро сходится в течение первых 0,1 мс, демонстрируя эффективность SSA в оптимизации параметров ПИ-регулятора. Эта быстрая сходимость объясняется превосходным балансом между исследованием и использованием, который предотвращает преждевременную сходимость и обеспечивает глобально оптимальное решение. По сравнению с традиционными алгоритмами, такими как PSO и GA, SSA демонстрирует значительно меньшее время вычислений при достижении более низкой конечной стоимости. Эти результаты демонстрируют целесообразность использования алгоритма SSA для оптимизации в реальном времени в приложениях интеллектуальных энергосетей, где быстрая и точная настройка параметров управления имеет решающее значение. Характер изменения сходимости, показанный на рис. 8, демонстрирует надежность и точность алгоритма SSA в определении оптимальных параметров ПИ-регулятора. Функция потерь достигает стабильного минимума в течение первых 0,1 с, что указывает на быструю сходимость и эффективное исследование пространства решений. Отсутствие колебаний или расходящихся трендов во время оптимизации свидетельствует о том, что алгоритм SSA избегает преждевременной сходимости и попадания в локальные минимумы. Это подтверждает устойчивость алгоритма к нелинейным многоцелевым задачам, типичным для систем управления фотоэлектрическими системами в реальном времени. Плавная и быстрая сходимость функции потерь подтверждает стабильность и эффективность SSA, не демонстрируя признаков преждевременной стагнации или колебаний.

На рис. 9 представлен гармонический спектр тока сети и значение THD. Это значение составляет 2,50%, что значительно ниже допустимого предела, установленного стандартами IEEE для качества электроэнергии. Низкое значение THD указывает на эффективность ПИ-регулятора, настроенного с помощью алгоритма SSA, в минимизации гармонических искажений, вносимых преобразователем и другими элементами системы. Преобладание основной частоты (50 Гц) в гармоническом спектре дополнительно подтверждает способность системы генерировать чистые и стабильные токовые сигналы. Такие параметры имеют решающее значение для обеспечения эффективной передачи энергии, снижения потерь мощности и предотвращения негативного воздействия на подключенные нагрузки. Кроме того, снижение содержания гармоник демонстрирует устойчивость предложенной стратегии управления в поддержании качества электроэнергии даже в динамических условиях эксплуатации, что подтверждает ее пригодность для реальных приложений фотоэлектрических систем, подключенных к сети. Гармонический спектр показывает преобладание основной частоты и значение THD 2,50%, что значительно ниже предела IEEE 519, подтверждая соответствие системы международным сетевым стандартам.

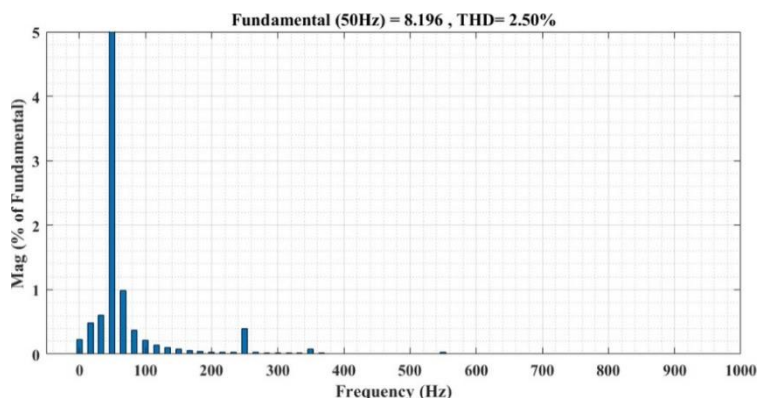


Рис. 9. Результаты анализа гармонического спектра и THD.

В таблице 2 показаны превосходные характеристики ПИ-регулятора, настроенного с помощью SSA, по ключевым показателям по сравнению с регуляторами на основе PSO и традиционными

регуляторами P&O. ПИ-регулятор, настроенный с помощью SSA, обеспечивает кратчайшее время установления 0,015 с, что на 40% лучше, чем у регулятора PSO, и на 70% лучше, чем у P&O, подчеркивая его способность к быстрой стабилизации в динамических условиях. Он обеспечивает максимальную пиковую активную мощность 104,22 кВт, превосходя PSO (98,00 кВт) и P&O (93,00 кВт) на 6,35% и 12,06% соответственно, демонстрируя эффективную работу MPPT для оптимального извлечения энергии. Кроме того, SSA обеспечивает самый низкий показатель THD — 2,50%, значительно снижая гармонические искажения на 19,87% по сравнению с PSO и на 52,38% по сравнению с P&O, обеспечивая соответствие стандартам качества электроэнергии и минимизируя сбои в сети.

Кроме того, оптимизированный с помощью SSA ПИ-регулятор демонстрирует превосходные характеристики отслеживания тока с наименьшими значениями RMSE для тока по продольной оси и тока по поперечной оси. Значение RMSE для I_d составляет 0,45, что отражает снижение на 37,50% по сравнению с PSO и на 55,88% по сравнению с P&O, обеспечивая точное управление активной мощностью. Аналогично, значение RMSE для I_q минимизируется до 0,93, что на 30,60% лучше, чем у PSO, и на 48,90% лучше, чем у P&O, способствуя улучшению управления реактивной мощностью и стабильности системы.

Время реагирования регулятора, составляющее 0,023 с, что на 39,47% быстрее, чем у PSO, и на 70,13% быстрее, чем у P&O, подчеркивает его способность быстро адаптироваться к изменениям условий эксплуатации, обеспечивая стабильность и надежность для фотоэлектрических систем, подключенных к сети. Эти результаты подчеркивают надежность и эффективность ПИ-регулятора, настроенного с помощью SSA, для высокоэффективного управления энергией в интеллектуальных микросетях, обеспечивая улучшенные переходные параметры, качество электроэнергии и общую эффективность системы.

В таблице 3 представлен подробный статистический анализ показателей производительности ПИ-регулятора, настроенного с помощью SSA. Регулятор достигает средней активной выходной мощности 101,7 кВт, при этом значения постоянно близки к целевому значению MPPT 104,22 кВт. Такое незначительное изменение мощности демонстрирует высокую эффективность отслеживания и стабильность предлагаемого метода в условиях изменяющейся освещенности. Ошибки отслеживания тока также минимальны, значения RMSE для I_d и I_q остаются значительно ниже 1 А, что указывает на превосходную производительность в стационарном режиме. Кроме того, THD остается низким, что подтверждает соответствие стандартам IEEE 519 для систем, подключенных к сети. Время реагирования стабильно быстрое во всех вариантах моделирования, в среднем 0,023 с, что подтверждает быстрое динамическое поведение. Наконец, фаза оптимизации SSA сходится примерно за 1,32 с, подтверждая возможность применения метода в реальном времени. Эти результаты подтверждают надежность, точность и вычислительную эффективность SSA-ПИ регулятора при обработке нелинейных и изменяющихся во времени условий работы фотоэлектрических систем.

Таблица 2. Сравнение показателей эффективности ПИ-регулятора, настроенного с помощью SSA, с другими методами.

Performance Metrics	SSA-Tuned PI	PSO-Based	P&O Controller	Improvement SSA vs PSO/%	Improvement SSA vs P&O/%
Settling Time (s)	0.015	0.025	0.050	40.00	70.00
MPPT Active Power (kW)	104.22	98.00	93.00	6.35	12.06
THD (%)	2.50	3.12	5.25	19.87	52.38
Response Time (s)	0.023	0.038	0.077	39.47	70.13
RMSE of I_d	0.45	0.72	1.02	37.50	55.88
RMSE of I_q	0.93	1.34	1.82	30.60	48.90

Таблица 3. Статистический анализ производительности SSA-ПИ регулятора.

Performance Metric	Mean	Minimum	Maximum	Computation Time/s
Active Power Output (kW)	101.7	98.5	104.22	1.32
RMSE of I_d (A)	0.45	0.41	0.49	—
RMSE of I_q (A)	0.93	0.89	0.98	—
THD (%)	2.50	2.41	2.62	—
Response Time (s)	0.023	0.021	0.027	—

3 Заключение

В этой статье представлена новая структура оптимизации для управления фотоэлектрическими системами, подключенными к сети, с использованием SSA-ПИ-регулятора. Предлагаемый подход решает критические проблемы в динамическом управлении энергией, включая быструю стабилизацию, подавление гармонических искажений и эффективное извлечение энергии. Комплексные оценки производительности показывают, что ПИ-регулятор с настройкой SSA превосходит традиционные методы на основе PSO и методы P&O по ключевым показателям.

Количественно, регулятор, настроенный с помощью SSA, обеспечивает снижение THD на 52,38% по сравнению с методом P&O и на 19,87% по сравнению с PSO, демонстрируя превосходное качество электроэнергии. Он также улучшает время реагирования на 39,47% по сравнению с PSO и на 70,13% по сравнению с P&O. Параметр MPPT повышается на 12,06% по сравнению с P&O. Кроме того, RMSE тока сети снижается до 55,88%, что указывает на более точное и стабильное регулирование тока при колебаниях освещенности.

ПИ-регулятор, настроенный с помощью алгоритма SSA, демонстрирует превосходную адаптивность к динамическим условиям окружающей среды, таким как колебания интенсивности излучения, что подчеркивает его пригодность для приложений реального времени в интеллектуальных энергосетях. Благодаря более быстрому времени реагирования и улучшенному качеству электроэнергии, этот подход способствует развитию интеграции возобновляемых источников энергии в современные энергосистемы.

Помимо повышения производительности, предлагаемая структура ПИ-регулирования на основе SSA представляет собой масштабируемую и интеллектуальную стратегию оптимизации, которую можно обобщить на другие нелинейные системы управления. Ее потенциал для развертывания в реальном времени в сочетании с простотой алгоритма и надежностью делает ее перспективным кандидатом для широкого использования в инфраструктурах интеллектуальных энергосетей следующего поколения.

Дальнейшие исследования могли бы изучить экспериментальную проверку предложенной методологии и ее расширение на варианты моделирования многоцелевой оптимизации, такие как минимизация затрат и увеличение срока службы батарей, что еще больше укрепило бы ее применимость к крупномасштабным распределенным системам возобновляемой энергии.

О вкладе авторов в проект CRediT

Юссеф Акарне: написание текста — рецензирование и редактирование, концептуализация, формальный анализ, подготовка данных, написание оригинального текста статьи, подтверждение достоверности. **Ахмед Эссадики:** подтверждение достоверности, научное руководство. **Таму Нассер:** подтверждение достоверности, научное руководство. **Маха Аннукуби:** научное руководство, подтверждение достоверности. **Ссадик Чаради:** подтверждение достоверности, 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

Данное исследование не получило никакого конкретного гранта от финансирующих организаций государственного, коммерческого или некоммерческого секторов. Рабатский университет Мохаммеда V спонсировал исследование за счет институциональных ресурсов и средств, предоставленных авторам.

Список используемой литературы

- [1] С. Чаради, Х.Е. Чакир, А. Редуан и др., Двухцелевое оптимальное управление потоками активной и реактивной мощности в гибридных микросетях переменного/постоянного тока, подключенных к сети, с использованием метаэвристики PSO, *Clean Energy* 7(6) (2023).
- [2] Ю. Акарне, А. Эссадки, Т. Нассер и др., Интеграция электромобиля и фотоэлектрической системы в микросети переменного тока, подключенной к сети, в: Международная конференция по достижениям в области энергетики, исследований, материаловедения и строительства, Springer Nature Switzerland, Шам, 2023, стр. 25-31.
- [3] Ю. Акарне, А. Эссадки, Т. Нассер и др., Экспериментальный анализ эффективного двухуровневого управления энергией и контроля мощности в системе микросети переменного тока, *IEEE Access* 12 (2024) 30577-30592.
- [4] И. Джрилифа, Х. Уади, А. Джилбаб и др., Неинтрузивный мониторинг нагрузки на основе Vmd-gru для системы управления энергией в доме, *IFAC PapersOnLine* 58 (13) (2024) 176-181.
- [5] И. Джрилифа, Х. Уади, А. Джилбаб и др., Планирование работы бытовых приборов с использованием бинарного алгоритма поиска воробья для управления спросом, *IFAC-PapersOnLine* 58 (13) (2024) 194-199.
- [6] С. Чаради, Х.Е. Чакир, А. Редуан и др., Новый гибридный алгоритм империалистической конкуренции – метаэвристический алгоритм оптимизации роя частиц для экономически эффективного управления энергией в многоисточниковых бытовых микросетях, *Energies* 16(19) (2023) 6896.
- [7] Дж. Тан, В. Гао, Новый каскадный H-мостовой фотоэлектрический инвертор с гибкой функцией подавления дуги, *Global Energy Interconnect.* 7 (4) (2024) 513-527.
- [8] И. Джулифа, Х. Уади, А. Джилбаб и др., Подход VMD-глубокого обучения для индивидуального мониторинга нагрузки и прогнозирования энергопотребления жилых зданий, *e-Prime Adv.Electr.Eng.Electron.Energy* (2024) 100624.
- [9] С. Чаради, Х. Э. Чакир, М. Эт-Таусси и др., Стендовые испытания для управления потоком мощности в гибридных микросетях переменного/постоянного тока с использованием системы передних: исследование и проектирование, *IFAC-PapersOnLine* 58 (13) (2024) 552-557.
- [10] А.Х.Али, А.Наджафи, Оптимизация и повышение производительности подключенной к сети фотоэлектрической установки на основе алгоритмов ANN-PSO и P&O, *Int.Trans.Electr.Energy Syst.*2022 (1) (2022)1278492.
- [11] З. Алаас, З. М. С. Эльбарбари, А. Резвани и др., Анализ и усовершенствование метода MPPT для повышения точности и скорости в фотоэлектрических системах в различных условиях, *Optik* 289 (2023) 171208.

- [12] О. Салим, С. Али, Дж. Икбал, Надежное управление MPPT автономных фотоэлектрических систем с помощью адаптивного саморегулирующегося ПИД-регулятора дробного порядка, *Energies* 16 (13) (2023) 5039.
- [13] Х. Рафия, Х. Уади, Б. Эльбхири, Адаптивные пропорционально-интегральные контроллеры на основе искусственной нейронной сети и оптимизатор энергии с поиском экстремума для ветровых систем, *IEEE Access* (2024).
- [14] Х.Агила-Леон, К.Варгас-Сальгадо, Д.Диас-Белло и др., Оптимизация фотоэлектрических систем: метаоптимизационный подход с использованием алгоритма PSO, улучшенного GWO, для улучшения контроллеров MPPT, *Renew.Energy* 230 (2024) 120892.
- [15] С. Мохаммад, Джибасилан, С. Д. Сундарсингх, Гибридная синусоидальная косинусоидальная оптимизация и оптимизация на основе шимпанзе с использованием пятнистой гиены для настройки ПИ-контроллера в микросетях, *Sci.Rep.*14 (1) (2024) 25930.
- [16] Г. Али, Х. Али, Т. Литтл, Автоматическое управление генерацией многозонной гибридной системы возобновляемой энергии с использованием предлагаемого нового самонастраивающегося ПИД-контроллера на основе нечеткой логики, *Energies* 17 (9) (2024) 2000.
- [17] С. Маларвили, С. Магешвари, Нелинейный ПИД-контроллер (N-PID) для управления инвертором, подключенным к сети SSSP, фотоэлектрическими системами, *Electr.Pow.Syst.Res.* 211 (2022) 108175.
- [18] Л. Загба, А. Борни, М.К. Бенбитур и др., Повышение производительности фотоэлектрической системы, подключенной к сети, с помощью новой гибридной техники MPPT в условиях переменной атмосферы, *Sci.Rep.* 14 (1) (2024) 8205.
- [19] Х. Рафия, Х. Уади, Ф. Гири и др., Усовершенствованное гибридное управление асинхронным двигателем, сочетающее регулятор скорости ANN-PID с нейронным предиктивным регулятором тока на основе оптимизации роя частиц, *Trans.Instit.Meas.Control* 47 (7) (2025) 1387-1402.
- [20] Б. Бабес, А. Бутаган, Н. Хамуда и др., Новое оптимальное управление двигателем постоянного тока с постоянными магнитами для систем подачи проволоки фотоэлектрических элементов, *J.Eur.Syst.Automat.* 53 (6) (2020) 811-823.
- [21] Б. Талби, Ф. Крим, А. Лаиб и др., Подход к настройке весового коэффициента с использованием сугено-нечеткой логики в модельно-предиктивном управлении для многоуровневого инвертора PUC7, подключенного к сети фотоэлектрических систем, в: 3-я Международная конференция по интеллектуальным сетям и возобновляемой энергии (SGRE), 2022, стр. 1-6.
- [22] С. Шауш, М. Хасни, А. Бутаган и др., Управление двигателем постоянного тока с использованием платы Arduino-Uno для системы подачи проводов, в: Международная конференция по электротехническим наукам и технологиям в Маррибе (CISTEM), 2018, IEEE, стр. 1-6.
- [23] Н. Хамуда, Б. Бабес, А. Бутаган и др., Оптимальная настройка ПИ-контроллера λ D μ для управления скоростью двигателя PMDC с использованием алгоритма оптимизации муравьиной колонии для повышения устойчивости WFS, в: 1-я Международная конференция по связи, системам управления и обработке сигналов (CCSSP), 2020, стр. 364-369.
- [24] И. Бушаки, А. Реддаф, М. Буджерда и др., Проектирование и улучшение характеристик сверхширокополосной антенны со структурой DGS с использованием алгоритма оптимизации серого волка, *Heliyon* 10(5) (2024).
- [25] М.Межааче, О.Ф.Бенауда, Х.Сехане и др., Улучшенный PSO с членом возмущения для решения задачи ORPD в энергосистемах, *Adv.Electr.Electron.Eng.*20 (4) (2022) 478.

[26] Р. Дембри, Л. Рахмани, Б. Бэйбс и др., Оптимизированная конструкция регулятора FOFPID с SSO для повышения производительности системы ветротурбины на основе двухфазного асинхронного генератора, Sci.Rep.14 (1)(2024) 28305.

[27] Ю. Акарне, А. Эссадки, Т. Нассер и др., Моделирование и управление подключенной к сети микросетью переменного тока с интеграцией электромобиля, Clean Energy 7 (4) (2023) 707-720.

[28] Ю. Акарне, А. Эссадки, Т. Нассер, Х. Лагридат, Моделирование и управление фотоэлектрическими системами в подключенной к сети микросети переменного тока, в: J.Kasprzyk, M.Ezziyuni, V.E.Balas (ред.), Международная конференция по передовым интеллектуальным системам для устойчивого развития (AI2SD 2022), Springer Nature, Швейцария, Шам, 2023, стр. 130-137, https://doi.org/10.1007/978-3-031-35245-4_12.

[29] М. Аннукуби, А. Эссадки, Ю. Акарне, Модель прогнозирующего управления многоуровневым инвертором, используемым в системе преобразования энергии ветра, e-Prime - Достижения в электротехнике, электронике и энергетике, Том 9, 2024, 100717, ISSN 2772-6711, <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100717>.

[30] Ю. Акарне, А. Эссадки, Т. Нассер и др., Моделирование и управление системой ветротурбины на основе PMSG в подключенной к сети микросети переменного тока, в: Международная конференция по интегрированному проектированию и производству, Springer International Publishing, Чам, 2022, стр. 595-604.

[31] Ю. Акарне, А. Эссадки, Т. Нассер и др., Улучшенная оптимизация мощности фотоэлектрической системы в подключенной к сети микросети переменного тока при переменных атмосферных условиях с использованием метода PSOMPPT, в: 4-я Международная конференция по чистой и зеленой энергетике (CGEE), 2023, стр. 19-24.

[32] Х. Рафия, Х. Уади, Б. Эль-Бхири, Контроллер App- π для преобразователей на стороне сети в системах преобразования энергии ветра при провалах напряжения, IFAC-PapersOnLine 58 (13) (2024) 575-580.

[33] Дж. Сюэ, Б. Шен, Новый подход к оптимизации на основе роевого интеллекта: алгоритм поиска воробья, Syst.Sci.Control Eng. 8 (1) (2020) 22-34.

Получено 13 февраля 2025 г.;

отредактировано 20 мая 2025 г.; принято 25 мая 2025 г.

* Ответственный автор

Адрес электронной почты: youssef_akarne@um5.ac.ma (Ю. Акарне).

Эта статья переведена из журнала <Global Energy Interconnection> (ISSN: 2096-5117), выпуск 4, 2025 г. Оригинальное название статьи:< Optimized control of grid-connected photovoltaic systems: Robust PI controller based on sparrow search algorithm for smart microgrid application>. Перевод предоставляется исключительно для справки; преимущественную силу имеет оригинал: <https://doi.org/10.1016/j.gloe.2025.05.004>

2096-5117/© 2025 Global Energy Interconnection Group Co.Ltd. Издательские услуги предоставлены Elsevier B.V. от имени KeAi Communications Co.Ltd. Данная статья находится в открытом доступе и распространяется по лицензии CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Юссеф Акарне имеет докторскую степень по электротехнике, полученную в Национальной высшей школе компьютерных наук и системного анализа (ENSIAS), Марокко, в рамках Научно-исследовательского центра инженерных и медицинских наук и технологий. Он также является членом исследовательской группы по электротехнике, робототехнике и автоматизации (ERERA) Национальной высшей школы искусств и ремёсел в Рабате (ENSAM), Марокко. В настоящее время доктор Акарне работает научным сотрудником в Политехническом университете имени Мохаммеда VI, Марокко. Его научные интересы включают в себя возобновляемые источники энергии, технологии интеллектуальных сетей, управление микросетями и передовые системы управления энергией. Доктор Акарне занимается инновационными разработками для решения вопросов в области устойчивой энергетики, используя междисциплинарные подходы для объединения технологий и практической реализации.