

УДК 620.92:551.509.3

**РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
КОМПЛЕКСА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ**

Ю.В. Кудрявцева, Ю.П. Симаков, А.А. Смирнов, Т.А. Шестопалова, В.А. Юриков

Рассмотрены способы оптимизации режимов работы комплексов альтернативных источников энергии за счет применения многоуровневой системы управления и алгоритма управления, который для определения оптимальных режимов работы источников использует прогнозируемые погодные условия и анализ активности потребителя. В работе предложены коэффициенты энергоэффективности всего комплекса, каждого источника и методика их расчета. Представлены результаты расчетного эксперимента, в котором сравниваются предложенный алгоритм с каскадным алгоритмом управления. Проведены расчеты для различных географических зон Российской Федерации.

Ключевые слова: гибридные энергокомплексы; альтернативные источники энергии; системы управления; солнечные коллекторы; тепловые насосы.

**БОЛЖОЛДОНУУЧУ АБА-ЫРАЙЫНЫН ШАРТТАРЫН ПАЙДАЛАНУУ МЕНЕН
АЛЬТЕРНАТИВДҮҮ ЭНЕРГИЯ БУЛАКТАРЫНЫН КОМПЛЕКСИНИН ИШТӨӨ РЕЖИМИН
ОПТИМАЛДАШТЫРУУ ЖАНА НАТЫЙЖАЛУУЛУГУН ЭСЕПТӨӨ**

Ю.В. Кудрявцева, Ю.П. Симаков, А.А. Смирнов, Т.А. Шестопалова, В.А. Юриков

Бул макалада энергия булактарынын оптималдуу иштөө режимин аныктоо үчүн аба-ырайынын болжолдонгон шарттарын жана керектөөчүнүн активдүүлүгүнө талдоо жүргүзүүнү колдонуучу көп тармактуу башкаруу системасын жана башкаруу алгоритмдерин колдонуунун эсебинен альтернативдүү энергия булактарынын комплекстеринин иштөө режимдерин оптималдаштыруу ыкмалары каралды. Бул эмгекте бүткүл комплекстин, ар бир энергия булагынын энергетикалык натыйжалуулук коэффициенттери жана аларды эсептөө методикасы сунушталды. Эсептөө экспериментинин жыйынтыктары берилди, анда сунушталган алгоритм каскаддык башкаруу алгоритми менен салыштырылат. Россия Федерациясынын ар түрдүү географиялык аймактары үчүн эсептөөлөр жүргүзүлдү.

Түйүндүү сөздөр: гибридик энергетикалык комплекстер; альтернативдүү энергия булактары; башкаруу системалары; күн коллекторлору; жылуулук насостору.

**CALCULATION OF EFFICIENCY AND OPTIMIZATION OF OPERATING MODES
OF A COMPLEX OF ALTERNATIVE ENERGY SOURCES
USING PREDICTED WEATHER CONDITIONS**

U.V. Kudryavtseva, U.P. Simakov, A.A. Smirnov, T.A. Shestopalova, V.A. Iurikov

The article discusses ways to optimize the operating modes of complexes of alternative energy sources through the use of a multi-level control system and a control algorithm, which uses predicted weather conditions and analysis of consumer activity to determine the optimal operating modes of sources. The paper proposed the energy efficiency coefficients of the entire complex, each source and the methodology for their calculation. The results of a computational experiment are presented, in which the proposed algorithm is compared with a cascade control algorithm. Calculations have been made for different geographic zones of the Russian Federation.

Keywords: hybrid energy complexes; alternative energy sources; control systems; solar collectors; heat pumps.

Введение. В настоящее время одним из приоритетных направлений развития энергетики является увеличение доли альтернативных источников энергии, таких как установки, использующие энергию солнца, ветра, а также тепло воздуха или грунта. Поскольку эффективность таких установок зависит от погодных условий, времени года и географического расположения объекта, для гарантированного снабжения энергии потребителя используют комплекс источников на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и классических источников, тем самым формируя гибридный энергокомплекс (ГЭК) [1].

Для нагрева воды и теплоснабжения потребителей широкое распространение получили установки, комбинирующие солнечные коллекторы (СК), теплонасосные установки (ТНУ) и электронагреватели. Подобные комплексы устанавливаются как для частных потребителей [<http://www.danheat.ru/we-in-russia>], не имеющих доступа к централизованной системе горячего водоснабжения (ГВС) или газоснабжения, так и для потребителей, имеющих большой расход горячей воды, таких как столовые или автомойки [2].

Для эффективного управления ГЭК необходимы системы автоматического управления (САУ), комплексно управляющие всеми источниками энергии и режимами их работы, но большинство подобных ГЭК для нагрева воды используют децентрализованную систему управления, когда каждый источник имеет свое управляющее устройство.

Системы автоматического управления, имеющие централизованное управление [3], работают намного эффективнее децентрализованных САУ, за счет управления всем энергокомплексом в целом. Однако анализ имеющихся решений централизованных систем управления ГЭК для нагрева воды, выявил ряд недостатков:

1. В управлении используются только текущие погодные условия, что не позволяет прогнозировать эффективность источников на ближайшее время – от суток до нескольких часов.

2. Не прогнозируются режимы потребления тепла, из-за чего во время пиков потребления происходит перерасход электрической энергии вследствие использования неоптимального состава источников и режимов их работы.

Цель данной работы – исследование повышения энергоэффективности энергокомплексов на основе ВИЭ для генерации тепловой энергии путем оптимизации их систем управления.

В качестве исследуемых объектов были рассмотрены системы управления энергокомплексами на основе ВИЭ для выработки тепловой энергии, использующие комбинацию ТНУ и СК.

Централизованные системы управления и каскадный алгоритм. Централизованная структура системы управления осуществляет реализацию всех процессов управления объектами в едином органе управления, который чаще всего представляет собой программируемый логический контроллер.

Таким образом, для уменьшения потребления электроэнергии при работе энергокомплекса на основе ВИЭ необходимо обеспечить алгоритм функционирования, учитывающий текущую эффективность различных источников энергии. Наиболее распространенным является каскадный алгоритм управления, когда источники подключаются в зависимости от их энергоэффективности. Рассмотрим пример каскадного алгоритма для ГЭК с функцией производства горячей воды, использующий комбинацию СК, ТНУ и теплового электронагревателя (ТЭН) [4].

Принцип работы каскадного алгоритма управления заключается в следующем: если температуру в накопительных баках можно поддерживать только солнечными коллекторами, остальные источники должны быть выключены. Если энергии солнца не хватает для поддержания заданной температуры, включается тепловой насос, а если тепловой насос не может быть включен, вода нагревается электронагревателем.

Преимуществом каскадного алгоритма является легкая его реализация в рамках централизованной системы управления и приемлемая энергоэффективность по сравнению с децентрализованными системами управления. Основным недостатком такого алгоритма является работа только в режиме реального времени без предиктивной составляющей. Таким образом, при возникновении резких

пиков потребления тепловой энергии, система управления вынуждена задействовать все возможные в данный момент источники для покрытия нужд потребителя, что приводит к перерасходу электрической энергии.

Возможным решением данной проблемы является использование более сложных алгоритмов управления, учитывающих не только текущие погодные условия, но и прогнозируемые, и как следствие, имеющие возможность предсказать энергоэффективность как отдельного источника генерации, так и комплекса в целом. Но прогноз энергоэффективности комплекса без анализа режимов потребления энергии, и предсказания возможных пиков и спадов не даст значительного сокращения потребления электрической энергии.

Однако такой алгоритм потребует значительных вычислительных мощностей, постоянной связи с метео-сервисами и интеграция его на уровне ПЛК будет затруднительна.

Структура предлагаемой системы управления и алгоритм оптимизация режимов работы комплекса альтернативных источников энергии с использованием прогнозируемых погодных условий. Можно выделить основные проблемы разработки систем управления энергокомплексами на основе ВИЭ:

1. Система должна быть адаптивна и работать с оборудованием разных фирм производителей.
2. Для эффективного управления нужно не только анализировать данные в текущий момент, но прогнозировать изменение ключевых параметров на определенное время.
3. Необходимо учитывать и прогнозировать потребности потребителя в энергии.
4. Необходимо обеспечивать приемлемый уровень надежности и безопасности системы.

Адаптивность системы – это одна из самых сложных проблем. На рынке представлено множество объектов альтернативных источников энергии, которые образуют огромное количество вариаций комплексов. Написание алгоритмов управления для каждой отдельной системы не представляется возможным. Проблему адаптивности можно решить путем применения правильных подходов к разработке архитектуры программного обеспечения системы управления. Выделение из алгоритма общих шаблонов поведения, свойственных всем объектам в совокупности с нисходящим наследованием (от общего к конкретной модели устройства), может повысить адаптивность системы. Задача прогнозирования погодных условий является весьма сложной, поэтому в разрабатываемой системе реализовать ее не представляется возможным. Для решения этой проблемы можно использовать готовые сервисы по предоставлению данных о погодных условиях.

Для решения технических проблем адаптивности можно дополнить локальную САУ облачным сервером [5–7]. Такое решение имеет ряд преимуществ:

- 1) широкий выбор вычислительных мощностей;
- 2) поддержка широкого спектра инструментов и платформ для разработки программного обеспечения;
- 3) экономичность – оплачиваются только те мощности, которые используются;
- 4) масштабируемость;
- 5) работа с большим объёмом данных.

Структура такой системы показана на рисунке 1.

Применение такой структуры, позволяет реализовать более сложный алгоритм управления ГЭЖ для нагрева воды, учитывающий прогнозируемые погодные условия и анализирующий нужды потребителя в тепле.

Принцип работы алгоритма заключается в следующем:

1. Анализ погодных условий. На данном этапе запрашивается информация у метеослужб, и моделируются функции зависимости погодных условий от времени суток.
2. Анализ нужд потребителя. Целью анализа является получение прогнозируемой функции потребления тепловой энергии, учитывая день недели, сезон или другие параметры, заложенные в модели. Получить прогнозируемые точки – момент времени начала потребления тепла, момент времени



Рисунок 1 – Структура многоуровневой САУ с применением облачного вычислительного сервера

максимального теплотребления. Если таких моментов несколько, то это будет ближайшая точка, момент времени, когда потребитель перестает активно пользоваться энергией.

3. Анализ текущего состояния системы происходит путем запроса в локальную САУ, и получает сведения о текущем количестве энергии в баках-аккумуляторах комплекса.

4. Моделирование работы источников. На данном этапе определяется, сколько энергии будет получено от максимально энергоэффективного источника к моменту начала потребления и ближайшего пика, в зависимости от прогнозируемых погодных условий. Для рассматриваемого комплекса такими источниками являются солнечные коллекторы. Если в системе обнаруживается дефицит энергии, рассчитывается время работы других источников для покрытия дефицита в порядке их энергоэффективности, и высчитывается точное время их включения.

5. Данные о составе источников, их времени работы и временными точками включения и отключения передаются в локальную САУ.

Расчет эффективности работы гибридного энергокомплекса для нагрева воды. Для определения энергоэффективности конкретного источника энергии, авторами был введен коэффициент эффективности, заключающийся в отношении произведенной тепловой энергии к затраченной электрической, за определённый промежуток времени, в виде формулы:

$$K_{эф} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} W_{мен}(p, t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} W_{эл}(p, t) dt}, \quad (1)$$

где $K_{эф}$ – коэффициент энергоэффективности источника тепловой энергии; $t_1 - t_2$ – время работы источника; $W_{эл}(p, t)$ – электрическая мощность источника; $W_{мен}(p, t)$ – тепловая мощность источника; p – прогнозируемые погодные условия, влияющие на тепловую или электрическую мощность.

Тогда для солнечного коллектора данный коэффициент можно выразить формулой:

$$K_{эф_{ск}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} W_{мен_{ск}}(E_{солн_t}, O_t, \eta_{ск}, t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} W_{эл_{ск}}(t) dt}, \quad (2)$$

где $K\text{эф}_{ск}$ – коэффициент энергоэффективности солнечного коллектора; $E_{солн_i}$ – прогнозируемая мощность солнечного излучения, приходящаяся на солнечные коллекторы в момент времени t ; O_i – прогнозируемая облачность в момент времени t ; $\eta_{ск}$ – КПД солнечного коллектора; $W_{элек}(t)$ – электрическая мощность солнечного коллектора в момент времени t для коллекторов с активной системой циркуляции теплоносителя.

В самотечных системах, где в самом источнике нет активного потребления электрической энергии, в качестве $W_{элек}(t)$ принимается электрическая мощность, которая необходима для контроля их состояния – температура теплоносителя, расход.

Для трубчатого, вакуумного солнечного коллектора, прогнозируемая мощность солнечного излучения может быть вычислена по формуле:

$$E\text{эфсол}(t) = E_{солн}(t) \cdot S_{мп} \cdot N_{мп}, \quad (3)$$

где $E_{солн}(t)$ – мощность потока солнечного излучения на поверхность солнечного коллектора; $S_{мп}$ – эффективная площадь вакуумных трубок солнечного коллектора. $N_{мп}$ – количество вакуумных трубок.

Мощность потока солнечного по формуле [8]:

$$E_{солн}(t) = Em(t) \cdot \cos\theta(t), \quad (4)$$

где $Em(t)$ – мощность потока прямого солнечного излучения на поверхность земли на перпендикулярную приемную площадку, при оптической массе атмосферы m ; $\theta(t)$ – угол падения солнца на приемную площадку СК.

Для теплового насоса коэффициент эффективности можно вычислить по формуле:

$$K\text{эф}_{мпн} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} W_{ТНмен}(T_{нв}, t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} W_{ТНэл}(T_{нв}, t) dt}, \quad (5)$$

где $T_{нв}$ – прогнозируемая температура воздуха в момент времени t ; $W_{ТНэл}$ – мощность электрическая теплового насоса; $W_{ТНмен}$ – тепловая мощность теплового насоса.

Зависимость электрической мощности ТНУ от тепловой определяется техническими характеристиками ТНУ, и указана в документации к установке.

Эффективность предложенной системы управления и алгоритма оптимизации режима работы гибридного энергокомплекса. Для сравнения эффективности работы алгоритма на удаленном сервере были смоделированы две системы управления – каскадная и система управления с прогнозируемыми погодными условиями. Для верификации моделей и в качестве реального объекта для моделирования был выбрана ГЭК для производства горячей воды в филиале МЭИ в городе Волжском.

В состав ГЭК входят:

- солнечные коллекторы с вакуумными трубками типа TZ58/1800-30R1;
- тепловой насос типа «Воздух-Вода» Mammoth Mac-05;
- ТЭН мощностью 3 кВт;
- Баки-аккумуляторы емкостью 500 л.

Для исследования сезонной энергоэффективности системы управления был проведен расчетный эксперимент, включающий следующие условия:

- 1) были загружены архивные данные погодных условий за год, с точками каждые три часа;
- 2) алгоритм с прогнозированием моделировался каждый день в режиме круглосуточной работы, с заданной температурой в баках – 70 °С;

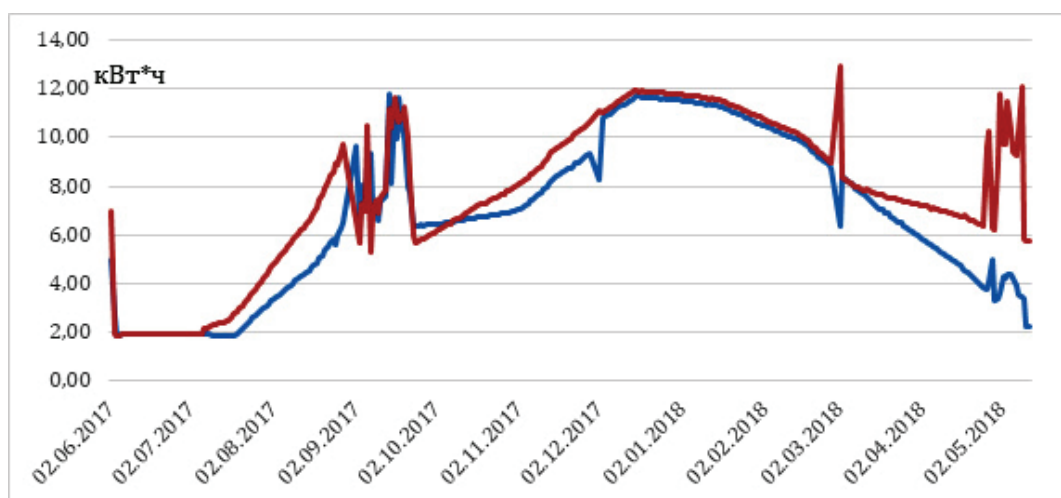


Рисунок 2 – График изменения суточного потребления для города Волжского Волгоградской области:
1 – САУ с каскадным алгоритмом, 2 – САУ с предлагаемым алгоритмом

Таблица 1 – Результаты расчетного эксперимента в различных климатических зонах

Город	Потребленная эл. энергия с САУ в каскадном режиме (кВт*ч)	Потребленная эл. энергия с САУ предложенным алгоритмом (кВт*ч)	Экономия электрической энергии, с САУ на основе предложенного алгоритма, %
Сочи	2470	2212	10
Воронеж	2700	2458	9,7
Нижний Новгород	3280	2594	20,6

3) каскадный алгоритм моделировался с теми же погодными условиями, с такими же параметрами потребления тепловой энергии, но при условии, что тепловой насос и ТЭН могли быть включены только в рабочее время с 8 до 17 часов дня, чтобы не создавать перерасхода энергии в ночное время. Солнечный коллектор включается, если температура в баках опускается ниже заданной (70 °С), и как только мощность циркуляционного насоса становится меньше вырабатываемой коллектором энергии.

На рисунке 2 показан график потребления электрической энергии для города Волжского Волгоградской области.

В результате расчетного эксперимента ГЭК с САУ на основе предложенного алгоритма потребил на 16,3 % меньше электрической энергии по сравнению с каскадным алгоритмом.

Для исследования системы управления в различных климатических зонах, были выбраны несколько городов в европейской части России: Сочи, Воронеж и Нижний-Новгород. Аналогично был проведен расчетный эксперимент энергоэффективности комплекса для подготовки горячей воды для двух систем управления каскадной и предложенной, с прогнозированием основных параметров комплекса. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Выводы. Фактор зависимости эффективности работы ВИЭ от погодных условий является наиболее проблематичным для применения энергокомплексов. Внедрение и оптимизация САУ таких комплексов, учитывающих прогнозируемые погодные условия, позволяет увеличить надежность энергоснабжения потребителя и повысить эффективность самого комплекса.

Разработанные математические модели были верифицированы на полигоне возобновляемых источников энергии, в филиале МЭИ в г. Волжском и показали свою практическую применимость к подобным энергокомплексам.

Разработанный критерий энергоэффективности и алгоритм оптимизации режимов работы комплекса может быть рекомендован для создания и оптимизации САУ энергокомплексов для выработки тепла на основе ВИЭ.

Техническая реализация в виде надстройки над локальной САУ удаленного сервера позволяет использовать сложные алгоритмы с прогнозированием режимов работы энергокомплекса за счет использования прогноза погодных условий; использовать современные методы разработки программного обеспечения, что повышает адаптивность, масштабируемость и сопровождение ПО.

Оценка эффективности использования САУ и ее работоспособность для энергокомплексов на основе ВИЭ для генерации тепловой энергии для разных климатических зон показала, что годовая экономия энергии может составлять от 10 до 20 % в год в зависимости от географического расположения объекта.

Литература

1. *Дерюгина Г.В.* Гибридные энергокомплексы на основе возобновляемых источников энергии / Г.В. Дерюгина, М.Г. Тягунов, Т.А. Шестопалова, В.А. Юриков // Вестник КРСУ. 2012. Т. 12. № 10. С. 11–17.
2. *Болдырев И.А.* Исследование эффективности функционирования комбинации нетрадиционных и возобновляемых источников электрической и тепловой энергии / И.А. Болдырев, В.С. Кузеванов // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 14. С. 49–51.
3. *Шестопалова Т.А.* Система управления комплексом альтернативных источников энергии с прогнозированием состояния / Т.А. Шестопалова, И.А. Болдырев, А.А. Смирнов // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 17–18. С. 176–180.
4. *Torreglosa J.P. et al.* Hierarchical energy management system for stand-alone hybrid system based on generation costs and cascade control / J.P. Torreglosa et al. // Energy Conversion and Management. 2014. Т. 77. С. 514–526.
5. *Liu Q. et al.* Green data center with IoT sensing and cloud-assisted smart temperature control system / Q. Liu et al. // Computer Networks. 2016. Т. 101. С. 104–112.
6. *Lee Y.T. et al.* An integrated cloud-based smart home management system with community hierarchy / Y.T. Lee et al. // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2016. Т. 62. № 1. С. 1–9.
7. *Talaat M. et al.* Hybrid-cloud-based data processing for power system monitoring in smart grids / M. Talaat et al. // Sustainable Cities and Society. 2020. Т. 55. С. 102–149.
8. *Виссарионов В.И.* Солнечная энергетика: учеб. пособие для вузов / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Калинин. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 276 с.