

УДК 621.311:681.5

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ: СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД

Козлов Тимофей Сергеевич,

Магистрант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»
jbmailru@mail.ru

Аннотация

В статье рассматривается проблема обеспечения надежного и энергоэффективного функционирования автономных лесопитомников закрытого типа в экстремальных климатических условиях Арктической зоны. На основе системного подхода гибридный энергокомплекс исследован как сложная многосвязная динамическая система, функционирующая в условиях высокой неопределенности возмущающих воздействий. Выполнена математическая формализация целевых показателей системы в виде трех конфликтующих интегральных критериев: экономического (минимизация расхода дизельного топлива), технологического (обеспечение жестких требований к температурному режиму) и эксплуатационного (снижение динамических нагрузок и износа оборудования). Установлено, что синтез системы управления представляет собой задачу многокритериальной оптимизации, не имеющую единственного идеального решения. Обоснована целесообразность применения методов интеллектуального управления, в частности аппарата нечеткой логики и нейро-нечетких сетей (ANFIS), для поиска компромиссных решений на множестве Парето и адаптивной подстройки приоритетов управления в режиме реального времени.

Ключевые слова: системный анализ, многокритериальная оптимизация, гибридный энергокомплекс, арктический лесопитомник, нечеткая логика, ANFIS, автономное энергоснабжение, управление микроклиматом.

MULTICRITERIA ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF HYBRID ENERGY COMPLEXES: A SYSTEMATIC APPROACH

Kozlov Timofey Sergeevich,

Master's student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint
Petersburg State Agrarian University"
jbmailru@mail.ru

ABSTRACT

This article examines the problem of ensuring the reliable and energy-efficient operation of autonomous closed-type tree nurseries in the extreme climatic conditions of the Arctic zone. Using

a systems approach, the hybrid energy complex is studied as a complex multi-connected dynamic system operating under conditions of high uncertainty of disturbances. The system's target indicators are mathematically formalized as three conflicting integral criteria: economic (minimizing diesel fuel consumption), technological (ensuring strict temperature requirements), and operational (reducing dynamic loads and equipment wear). It is established that the synthesis of a control system is a multi-criteria optimization problem with no single ideal solution. The feasibility of using intelligent control methods, in particular fuzzy logic and neural-fuzzy networks (ANFIS), to search for compromise solutions on the Pareto set and adaptively adjust control priorities in real time is substantiated.

Keywords: systems analysis, multicriteria optimization, hybrid energy complex, arctic tree nursery, fuzzy logic, ANFIS, autonomous power supply, microclimate control.

В настоящее время одной из приоритетных государственных задач является развитие изолированных и труднодоступных территорий Арктической зоны. Обеспечение жизнедеятельности и функционирования инфраструктурных объектов в таких регионах жестко связано с проблемой надежного энергоснабжения. Традиционный подход, основанный исключительно на использовании дизельных электростанций, демонстрирует низкую экономическую эффективность из-за сложной логистики северного завоза топлива, а также наносит существенный экологический ущерб хрупкой экосистеме региона.

В связи с этим наиболее перспективным направлением является внедрение АГЭК - автономных гибридных энергокомплексов, интегрирующих возобновляемые источники энергии (например, ветроэнергетические установки или солнечные панели) и традиционную генерацию. Особую сложность представляет энергообеспечение специализированных объектов с жесткими требованиями к микроклимату, таких как закрытые лесопитомники, где нарушение температурного режима неизбежно ведет к гибели биологического фонда.

Управление подобными системами сопряжено с рядом фундаментальных противоречий. Высокая стохастичность возобновляемой генерации в связи с изменчивостью скорости ветра и другие экстремальные погодные возмущения требуют непрерывного балансирования потоками мощности. При этом возникает конфликт целевых показателей: стремление к максимальной экономии углеводородного топлива противоречит требованиям к обеспечению абсолютной надежности теплоснабжения и минимизации износа коммутационного оборудования [1].

С позиций системного анализа, выбор оптимальной стратегии управления режимами работы такого АГЭК не может быть осуществлен на основе единственного критерия. Проблема требует перехода к методологии многокритериальной оптимизации, позволяющей формализовать конфликтующие требования в виде математических целевых функций и найти компромиссные решения [2,3].

Целью данной работы является системный анализ и математическая формализация критериев эффективности для задачи оптимального управления автономным гибридным энергокомплексом изолированного лесопитомника в условиях климатической неопределенности.

Теоретической и методологической основой данной работы послужили принципы системного анализа и теории управления сложными техническими комплексами. В ходе исследования был проведен анализ актуальной научно-технической литературы, включающий современные обзорные статьи отечественных и зарубежных авторов,

посвященные вопросам интеграции возобновляемых источников энергии в децентрализованные энергосистемы северных территорий [1-7].

Основным методом исследования выбран системный подход, позволяющий рассматривать гибридный энергокомплекс и здание лесопитомника не как набор разрозненного оборудования, а как единую динамическую систему.

С позиций системного анализа гибридный энергокомплекс лесопитомника представляет собой многосвязную динамическую систему. Введем базовые переменные: Пусть $u(t)$ - вектор управляющих воздействий (например, команды на запуск дизель-генератора и изменение мощности теплового насоса, когда ВЭУ не справляется), $x(t)$ - вектор состояний системы (внутренняя температура, уровень заряда накопителей, к примеру, для BESS), а $w(t)$ - вектор неконтролируемых возмущающих воздействий климатического характера (скорость ветра, температура наружного воздуха, солнечная радиация). Время управления рассматривается на интервале $t \in [0, T]$. Для синтеза оптимальной системы управления необходимо сформулировать векторный критерий качества K , компоненты которого отражают противоречивые требования к объекту.

Экономический критерий (минимизация расхода топлива).

Главной экономической задачей для арктических объектов является снижение зависимости от привозного углеводородного топлива. Целевая функция представляет собой суммарный расход дизельного топлива за период управления:

$$K_1(u) = \int_0^T G_{дг}(P_{дг}(t, u, w)) dt \rightarrow \min \quad (1)$$

где $G_{дг}$ - функция секундного расхода топлива, нелинейно зависящая от текущей электрической мощности дизель-генератора $P_{дг}$. Минимизация данного критерия требует максимального использования стохастической энергии ветра, однако это влечет за собой риски для других подсистем.

Технологический критерий (обеспечение микроклимата).

Агротехнический регламент выращивания саженцев накладывает жесткие ограничения на температурный режим. Любые отклонения от эталонной температуры замедляют рост растений, а выход за критические пределы ведет к их гибели. Формализуем этот критерий как интеграл квадратичной ошибки поддержания температуры:

$$K_2(u) = \int_0^T (T_{вн}(x, t, w) - T_{уст})^2 dt \rightarrow \min \quad (2)$$

где $T_{вн}$ - фактическая температура внутри лесопитомника, $T_{уст}$ - эталонная (заданная) температура. При этом система должна строго соблюдать фазовое ограничение $T_{min} \leq T_{вн}(t) \leq T_{max}$.

Эксплуатационный критерий (минимизация износа оборудования).

В условиях изолированной работы частые запуски, остановки и резкие набросы мощности на дизель-генератор и прочее оборудование приводят к их ускоренному износу. Для продления ресурса оборудования введем критерий, штрафующий систему за резкие изменения управляющих воздействий:

$$K_3(u) = \int_0^T \left(\frac{dP_{дг}(t, u, w)}{dt} \right)^2 dt \rightarrow \min \quad (3)$$

Этот критерий требует от системы «сглаживания» переходных процессов, что напрямую противоречит необходимости мгновенно компенсировать провалы ветровой генерации.

Таким образом, задача оптимального управления АГЭК сводится к поиску такого вектора управлений $u(t)$, который минимизирует векторный критерий:

$$K(u) = (J_1(u), J_2(u), J_3(u))^T \rightarrow \min \quad (4)$$

Сложность решения данной задачи заключается в противоречивом характере критериев. Например, попытка минимизировать расход топлива

($K1 \rightarrow \min$) при падении скорости ветра неизбежно приведет к увеличению ошибки регулирования температуры ($K2 \rightarrow \max$). В такой постановке не существует единственного идеального решения, и задача сводится к поиску компромиссного множества Парето. Выбор конкретной, наиболее рациональной рабочей точки на этом множестве является ключевой проблемой управления, требующей применения интеллектуальных методов. Необходимость перехода к интеллектуальным алгоритмам обусловлена тем, что традиционные методы оптимального управления (например, линейно-квадратичные регуляторы) демонстрируют высокую эффективность лишь в детерминированных условиях. Однако их применение для гибридных арктических энергокомплексов существенно ограничено. Это связано с высокой стохастичностью возмущающих воздействий $w(t)$. Кроме того, для выбора точки на множестве Парето классическая математика требует точного задания статических весовых коэффициентов для критериев $K1$, $K2$ и $K3$. На практике сделать это крайне сложно, так как приоритеты управления динамически меняются. Например, при критическом падении температуры внутри лесопитомника ($K2$) экономический критерий ($K1$) должен временно отходить на второй план, чтобы не допустить гибели растений. Именно поэтому разрешение данного многокритериального конфликта в условиях неопределенности целесообразно осуществлять с применением методов искусственного интеллекта, в частности - аппарата нечеткой логики (Fuzzy Logic) и гибридных нейро-нечетких сетей (ANFIS) [4].

Нечеткая логика позволяет: Формализовать экспертные знания - опыт можно перевести в базу нечетких правил вида «IF скорость ветра падает AND температура снижается быстро, THEN плавно увеличить мощность ДГУ». Это позволяет напрямую минимизировать износ оборудования ($K3$), избегая резких скачков мощности.

Адаптивно смещать приоритеты - нечёткая логика способна в режиме реального времени оценивать текущее состояние системы (вектор $x(t)$) и динамически выбирать оптимальную компромиссную точку на множестве Парето, балансируя между экономией топлива и поддержанием микроклимата.

Работать с неполными данными - нечеткий вывод устойчив к зашумленным показаниям датчиков и резким погодным флуктуациям, что критически важно для изолированных арктических объектов.

Таким образом, переход от жестких детерминированных алгоритмов к интеллектуальным нейро-нечетким системам управления является наиболее перспективным путем повышения энергоэффективности и надежности подобных объектов.

В ходе проведенного исследования выполнен системный анализ проблемы управления автономным гибридным энергокомплексом изолированного лесопитомника в условиях Арктической зоны. Рассматриваемый объект концептуально представлен как сложная многосвязная динамическая система, функционирующая в условиях высокой климатической неопределенности. Синтез системы управления таким объектом не может быть сведен к одномерной задаче регулирования. В работе математически формализованы три конфликтующих критерия эффективности: экономический (минимизация расхода дизельного топлива), технологический (минимизация ошибки поддержания требуемого микроклимата) и эксплуатационный (минимизация динамических нагрузок на оборудование).

Задача управления сводится к поиску компромисса в условиях антагонистического конфликта критериев. Для преодоления ограничений классических методов управления и разрешения выявленного конфликта целесообразно использование интеллектуальных подходов на базе нечеткой логики и нейро-нечетких моделей. Полученные результаты математической формализации и системного анализа лягут в основу разработки

имитационной модели и синтеза адаптивной нейро-нечеткой системы управления гибридным энергокомплексом в дальнейших исследованиях.

Список литературы:

1. Пиркин А.Г. Теоретические основы системного анализа энергообеспечения предприятий: учебное пособие. - СПб.: СПбГАУ. - 2021. - 92 с.
2. Гулин С.В., Пиркин А.Г. Системный анализ в энергетике агропромышленного комплекса // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. - 2022. - № 3 (68). - С. 121-130. - DOI:10.24412/2078-1318-2022-3-121-130.
3. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Системный анализ и управление". - Изд. 3-е, перераб. и доп. - СПб.: СПбГПУ. - 2004. - 520 с.
4. Штовба С.Д. Проектирования нечётких систем средствами MATLAB. - М.: Горячая линия-Телеком. - 2007. - 284 с.
5. Rashad M. K., Aymen C., Ken N. RETRACTED: Wind power smoothing using fuzzy logic pitch controller and energy capacitor system for improvement Micro-Grid performance in islanding mode // Energy. - 2010 - Vol. 35, Issue 5, Pages 2119-2129. - DOI: 10.1016/j.energy.2010.01.030
6. Косякова Л.Н., Магомедмирзоева Д.Я. Методологические подходы системного анализа в управлении инвестиционно-инновационными процессами в АПК // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. -2015. - № 39. - С. 222-227,
7. Edward O., Harsh N.R. Simulation of renewable energy source integration in a smart energy grid using MATLAB/Simulink // Next Energy. - 2025 - Vol. 8, article 100327. - DOI: 10.1016/j.nxener.2025.100327.

References:

1. Pirkin, A.G. Theoretical Foundations of Systems Analysis of Enterprise Energy Supply. A Textbook. SPb.: SPbSAU, 2021, 92 p. (In Russ).
2. Gulin, S.V., Pirkin, A.G. Systems Analysis in the Energy Sector of the Agro-Industrial Complex. Bulletin of the St. Petersburg State Agrarian University, 2022, No. 3 (68), pp. 121-130. DOI: 10.24412/2078-1318-2022-3-121-130. (In Russ).
3. Volkova, V.N., Denisov, A.A. Fundamentals of Systems Theory and Systems Analysis: A Textbook for Students of Higher Education Institutions Studying in Systems Analysis and Management. - 3rd ed., revised and enlarged, SPb.: SPbSPU, 2004, 520 p. (In Russ).
4. Shtovba S.D. Designing Fuzzy Systems Using MATLAB. Moscow: Goryachaya Liniya-Telecom, 2007, 284 p. (In Russ).
5. Rashad M.K., Aymen C., Ken N. RETRACTED: Wind Power Smoothing Using Fuzzy Logic Pitch Controller and Energy Capacitor System for Improving Micro-Grid Performance in Islanding Mode. Energy, 2010, Vol. 35, Issue 5, pp. 2119-2129. DOI: 10.1016/j.energy.2010.01.030.
6. Kosyakova L.N., Magomedmirzoeva D.Ya. Methodological Approaches to Systems Analysis in Managing Investment and Innovation Processes in the Agro-Industrial

Complex. Bulletin of the Saint Petersburg State Agrarian University, 2015, No. 39, pp. 222–227. (In Russ).

7. Edward O., Harsh N.R. Simulation of Renewable Energy Source Integration in a Smart Energy Grid Using MATLAB/Simulink. Next Energy, 2025, Vol. 8, article 100327. DOI: 10.1016/j.nxener.2025.100327.