

УДК 697.1:620.91:631.23:681.5

ОБОСНОВАНИЕ МОДУЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ В ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Козлов Тимофей Сергеевич,

Магистрант,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»

jbmailru@mail.ru.

Волков Владимир Сергеевич,

кандидат технических наук,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»

vol9795@yandex.ru.

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы имитационного моделирования автономных гибридных энергосистем, объединяющих стохастическую генерацию на базе ветроэнергетических установок (ВЭУ), теплонасосное оборудование и разнородные системы накопления энергии. Показано, что традиционный подход к построению моделей, основанный на прямых информационных связях между физическими компонентами, приводит к возникновению алгоритмических коллизий (алгебраических петель) и неоптимальному распределению мощности при наличии конфликтующих приоритетов зарядки накопителей и покрытия пиковой нагрузки. Целью работы является обоснование метода структурной декомпозиции для создания имитационных моделей, лишенных указанных недостатков. Предложен модульный принцип построения логики управления в среде MATLAB/Simulink, при котором процессы формирования независимого энергетического запроса, иерархической диспетчеризации мощности и маршрутизации физических тепловых потоков строго разделены на последовательные уровни. Вычислительные эксперименты на годовом интервале подтверждают, что предложенная архитектура обеспечивает вычислительную устойчивость и полностью устраняет возникновение «фантомных» потерь энергии.

Ключевые слова: гибридная энергосистема, имитационное моделирование, MATLAB/Simulink, диспетчеризация мощности, тепловой аккумулятор, структурная декомпозиция, автономное энергоснабжение.

JUSTIFICATION OF MODULAR CONTROL ARCHITECTURE IN SIMULATION MODELS OF AUTONOMOUS ENERGY SYSTEMS

Kozlov Timofey Sergeevich,

Master's student.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State Agrarian University"
jbmailru@mail.ru.

Volkov Vladimir Sergeevich,

Candidate of Technical Sciences

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State Agrarian University"
vol9795@yandex.ru

ABSTRACT

This article examines the simulation modeling of autonomous hybrid power systems integrating stochastic wind turbine-based generation, heat pump equipment, and heterogeneous energy storage systems. It is shown that the traditional approach to model construction, based on direct information links between physical components, leads to algorithmic collisions (algebraic loops) and suboptimal power distribution in the presence of conflicting priorities for charging storage devices and covering peak loads. The aim of the study is to substantiate a structural decomposition method for creating simulation models devoid of these drawbacks. A modular principle for constructing control logic in the MATLAB/Simulink environment is proposed, in which the processes of generating an independent energy request, hierarchical power dispatching, and routing physical heat flows are strictly separated into sequential levels. Computational experiments over an annual interval confirm that the proposed architecture ensures computational stability and completely eliminates the occurrence of "phantom" energy losses.

Keywords: hybrid power system, simulation modeling, MATLAB/Simulink, power dispatch, thermal storage, structural decomposition, autonomous power supply.

Обеспечение надежным и экономически эффективным энергоснабжением изолированных инфраструктурных объектов в Арктической зоне РФ является стратегически важной задачей. Традиционное использование дизельных электростанций сопряжено с высокими эксплуатационными издержками из-за сложной логистики «северного завоза» и несет существенные экологические риски. Перспективной альтернативой является внедрение гибридных энергокомплексов на базе возобновляемых источников энергии, в частности, ветроэнергетических установок (ВЭУ), работающих совместно с тепловыми насосами и системами накопления энергии.

Ключевым фактором, определяющим эффективность таких систем, является не столько выбор конкретного оборудования, сколько качество стратегии управления энергетическими потоками [3,6]. В условиях стохастической генерации ВЭУ и переменного графика тепловой нагрузки возникает проблема временного дисбаланса: периоды пиковой генерации часто не совпадают с периодами максимального потребления. Для исследования и оптимизации стратегий балансировки широко применяется имитационное математическое моделирование в средах системного анализа, таких как MATLAB/Simulink [1].

Теоретическую и методологическую основу данного исследования составили справочная литература и современные аналитические публикации в области теории управления и методов численного моделирования динамических систем [1-7].

Однако разработка достоверных имитационных моделей сопряжена с рядом алгоритмических трудностей. Традиционный подход к моделированию, предполагающий «жесткую» или прямую информационную связь между физическими моделями генераторов (ВЭУ, ТН) и потребителей (нагрузка, накопители), часто приводит к структурным ошибкам. К таким ошибкам относятся возникновение неразрешимых алгебраических петель при расчете тепловых балансов с обратной связью, а также логические коллизии при одновременном формировании запросов на зарядку накопителей и покрытие пиковой нагрузки. Попытки решить эти проблемы на уровне физических моделей путем введения искусственных задержек (Unit Delay) искажают динамику процессов и снижают точность оценки интегральных показателей системы (например, автономности и коэффициента утилизации энергии).

Целью данного исследования является разработка и обоснование модульной архитектуры управления имитационной моделью автономного гибридного энергокомплекса. В работе предлагается метод структурной декомпозиции, разделяющий физические процессы преобразования энергии и логику маршрутизации мощности, что позволяет устранить алгоритмические конфликты и создать надёжную основу для последующего синтеза адаптивных стратегий диспетчеризации.

В качестве объекта моделирования рассматривается автономная система теплоснабжения, включающая ВЭУ, каскад тепловых насосов (геотермальный и воздушный), электрический аккумулятор (BESS) и водяной бак-аккумулятор тепловой энергии (ТА).

Для устранения алгоритмических коллизий, возникающих при прямой связи моделей оборудования, предложена трехуровневая архитектура системы управления (СУ). В основе предложенного подхода лежит принцип строго однонаправленного потока данных, исключающий перекрестные обратные связи в пределах одного такта моделирования. Архитектура СУ декомпозирована на три функционально независимых модуля:

Модуль формирования совокупного запроса (Request Calculator).

Модуль диспетчеризации ресурсов (Power Dispatcher).

Модуль управления тепловыми потоками (Heat Flow Manager).

Ошибкой традиционных схем является попытка ограничить запрашиваемую мощность физическими лимитами источника на этапе генерации запроса. Это приводит к недоучету реальной потребности системы.

Разработанный модуль «Request Calculator» функционирует независимо от текущей выработки ВЭУ или состояния BESS. Его задача агрегировать «идеальную» потребность. Тепловой запрос Q_{target} формируется как сумма двух независимых компонентов: оперативного дефицита нагрузки и стратегического запроса на зарядку теплового аккумулятора:

$$(1) \quad Q_{target}(k) = \max(0, Q_{load}(k) - Q_{fromtank}(k)) + \max(0, (T_{set} - T_{tank}(k)) * K_p) ,$$

Q_{load} – потребность объекта, $Q_{fromtank}$ – текущая теплоотдача ТА, T_{tank} – фактическая температура ТА, T_{set} – целевая температура ТА,

K_p – коэффициент пропорциональности (усиления регулятора)

Полученный совокупный тепловой запрос ограничивается суммарной паспортной тепловой мощностью каскада ТН ($Q_{totalmax}$) после чего конвертируется в запрос электрической мощности (P_{req}) с учетом динамически рассчитываемых коэффициентов преобразования (COP) для каждого типа тепловых насосов.

Модуль «Power Dispatcher» выступает в роли единого узла принятия решений о распределении электрической энергии. На вход модуля поступают сигнал доступной генерации ВЭУ (P_{veu}) и совокупный запрос потребителей (P_{req})

Для исключения ситуаций, при которых зарядка BESS осуществляется в ущерб работе тепловых насосов (что критично для автономности), реализован алгоритм жесткой приоритизации:

В первую очередь энергия ВЭУ направляется на удовлетворение текущего запроса ТН: $P_{direct} = \min(P_{veu}, P_{req})$

Затем, при наличии избыточной энергии, невостребованная генерация ($P_{surplus} = P_{veu} - P_{direct}$) направляется в подсистему BESS в качестве команды на зарядку.

Если прямой генерации недостаточно для работы ТН ($P_{deficit} = P_{req} - P_{direct}$), модуль формирует запрос на разрядку к модели BESS.

Итоговая электрическая мощность, выделяемая исполнительным механизмом, вычисляется как

$$P_{avail_final} = P_{direct} + P_{actualBESS} \quad (2), \text{ где } P_{actualBESS} -$$

фактическая мощность разряда аккумулятора с учетом его ограничений по SOC и мощности инвертора.

Данный алгоритм гарантирует, что система BESS выступает исключительно в роли буфера, поглощающего излишки и компенсирующего дефицит, не вступая в конкуренцию с основной тепловой нагрузкой.

Заключительным этапом алгоритма является распределение фактически произведенной тепловой энергии ($Q_{produced}$), реализуемое в модуле «Heat Flow Manager».

В классических схемах с тепловым аккумулятором теплоноситель от генераторов всегда проходит через ТА. Это приводит к термодинамическому парадоксу: при подаче высокопотенциального тепла в остывший бак происходит деградация качества энергии (снижение температуры смешения), что не позволяет оперативно покрыть пиковую нагрузку теплицы.

Для решения этой проблемы в модуле реализована логика «управляемого байпаса». Произведенная тепловая мощность распределяется по следующему приоритету:

Тепло направляется непосредственно потребителю, минуя ТА:

$$Q_{direct} = \min(Q_{produced}, Q_{load}) \quad (3)$$

Излишки тепла направляются на нагрев ТА:

$$Q_{to_tank} = Q_{produced} - Q_{direct} \quad (4)$$

Если прямой генерации недостаточно, активируется разрядка бака, но только при условии, что его температура превышает минимальный технологический порог ($T_{tank} < T_{min}$)

Такая архитектура исключает потерю высокопотенциального тепла и обеспечивает мгновенный отклик системы на рост тепловой нагрузки.

Для верификации предложенной архитектуры управления была проведена серия вычислительных экспериментов в среде MATLAB/Simulink. Моделирование осуществлялось с шагом дискретизации 3 часа на временном горизонте в один календарный год (8760 часов), с использованием реальных метеорологических профилей для условий Арктической зоны.

В ходе первичного моделирования со стандартной архитектурой, где сигналы доступной мощности и состояния накопителей передавались в модуль запроса в рамках одного расчетного такта, наблюдался эффект «конкуренции за ресурс». Введение искусственных задержек сигнала для разрыва алгебраических петель приводило к запаздыванию реакции системы, формированию невыполнимых запросов и сбросу до 40% полезной энергии.

Внедрение предложенной трехуровневой архитектуры полностью устранило данные логические КОЛЛИЗИИ.



Рисунок 1 – Покрытие тепловой нагрузки в январе

График наглядно демонстрирует, что линия фактически поставленной тепловой мощности (красная) полностью перекрывает область расчетной потребности (серая) объекта. Модель успешно справляется с пиками потребления свыше 200 кВт, что подтверждает физическую адекватность реализованных алгоритмов маршрутизации тепла. Отказ от прямых информационных связей в пределах одного шага интегрирования позволил использовать стандартные решатели с фиксированным шагом (fixed-step solvers) без риска возникновения фатальных ошибок.

Список литературы:

1. 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
2. Воропай Н.И., Стенников В.А. Иерархическое моделирование систем энергетики. Новосибирск: Академическое издательство «ГЕО», 2020. 314 с.
3. Muhammad F. Z., Elhaussin E., Mohamed B. Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects // Applied Energy. – 2018 – Vol. 222, Pages 1033–1055. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.04.103
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2008. 288 с.
5. Дьяконов В.П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. М.: ДМК Пресс, 2011. 976.
6. Lanre O., Saad M., Ismail M.S., Moghavvemi M. Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016 – Vol. 62, Pages 821–835. – DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.040
7. Bo Zhao, Xiangjin Wang, Da Lin, Madison M. Calvin. Energy Management of Multiple Microgrids Based on a System of Systems Architecture // IEEE Transactions on Power Systems. – 2018 – Vol. 33, Issue 6, Pages 6410–6421. – DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2840055

References:

1. 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
2. Voropai N.I., Stennikov V.A. Hierarchical Modeling of Energy Systems. Novosibirsk: Academic Publishing House "GEO", 2020. 314 p. (In Russ)
3. Muhammad F.Z., Elhaussin E., Mohamed B. Microgrids Energy Management Systems: A Critical Review on Methods, Solutions, and Prospects. *Applied Energy*, 2018, Vol. 222, Pages 1033–1055. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.04.103
4. Chernykh I.V. Modeling of Electrical Devices in MATLAB, SimPowerSystems, and Simulink. Moscow: DMK Press, 2008. 288 p. (In Russ)
5. Dyakonov, V.P. MATLAB and SIMULINK for Radio Engineers. Moscow: DMK Press, 2011. 976 p. (In Russ)
6. Lanre, O., Saad, M., Ismail, M.S., Moghavvemi, M. Energy Management Strategies in Hybrid Renewable Energy Systems: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, Vol. 62, Pages 821–835. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.040
7. Bo Zhao, Xiangjin Wang, Da Lin, Madison M. Calvin. Energy Management of Multiple Microgrids Based on a System of Systems Architecture. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, Vol. 33, Issue 6, Pages 6410–6421. DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2840055