

УДК 621.311.26

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Обухов Сергей Геннадьевич¹,
serob@tpu.ru

Давыдов Денис Юрьевич¹,
denisyudavydov@gmail.com

Белоглазкин Алексей Олегович²,
rcktgroupp@gmail.com

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² ООО «Рокет групп»,
Россия, 123290, г. Москва, 1-й Магистральный туп., 5а, эт. 1, ком 132л, оф. 3.

Актуальность. В настоящее время строительный сектор является одним из крупнейших потребителей сырьевых ресурсов и основным источником загрязнения окружающей среды – на его долю приходится около 40 % потребляемой энергии и примерно 30 % выбросов парниковых газов. В результате выбросов в атмосферу продуктов сгорания угля, нефти и газа наносится непоправимый урон окружающей среде. Одним из перспективных способов решения данной проблемы является внедрение технологий «энергоэффективное здание». Ключевой задачей проектирования энергоэффективных зданий является разработка системы электроснабжения, которая во многом определяет уровень комфорта и технико-экономические показатели всего объекта. Сложность данной задачи обусловлена тем, что в качестве источников электропитания часто применяются установки на основе возобновляемых источников энергии, характеризующиеся стохастической генерацией, а сами энергоэффективные здания могут существенно отличаться друг от друга по целому ряду параметров: назначению, архитектуре, размеру и этажности, составу потребителей и т. д. В статье предложена инженерная методика проектирования подобных объектов и результаты ее апробации.

Цель: разработка инженерной методики проектирования систем электроснабжения автономных энергоэффективных зданий на основе возобновляемых источников энергии.

Методы: методы статистической обработки временных рядов данных, математическое и компьютерное моделирование с использованием программной среды MatLab/Simulink.

Результаты. Предложена инженерная методика проектирования систем электроснабжения автономных объектов, ориентированная на проектирование «активных» зданий с максимально возможным использованием возобновляемых источников энергии. Описаны основные этапы проектирования, которые включают расчет и анализ энергетического баланса, выбор основного электрооборудования и разработку структурной схемы электроэнергетической системы, оптимизацию состава и типоразмеров основного электрооборудования, выбор коммутационных и защитных аппаратов, проводниковой продукции, разработку принципиальных электрических схем. Рассмотрен практический пример применения предложенной методики для проектирования системы электроснабжения автономного энергоэффективного здания в Курской области.

Ключевые слова:

энергоэффективное здание, возобновляемые источники энергии, временные ряды, гибридные электроэнергетические системы, энергетический баланс, автономная система электроснабжения.

Введение

Глобальной проблемой современной цивилизации является изменение климата, во многом обусловленное выбросами в атмосферу продуктов сгорания органического топлива. По данным международного исследовательского проекта по мониторингу выбросов парниковых газов Global Carbon Project, в 2021 г. выбросы углекислого газа во всем мире увеличились на 4,9 % по сравнению с 2020 г. и достигли отметки в 36,7 млрд т [1]. В целях борьбы с изменением климата и его негативными последствиями в 2015 г. 197 стран мира приняли Парижское соглашение [2], целью которого является сокращение глобальных выбросов парниковых газов и ограничение повышения глобальной температуры в этом столетии до 2 градусов Цельсия.

Достижение поставленной цели невозможно без внедрения новых энергоэффективных технологий, базирующихся на экологически чистых источниках энергии. Одной из таких технологий, получивших бурное развитие в последние годы, является технология «энергоэффективное здание». Необходимость развития и широкомасштабного внедрения данной технологии обусловлена тем, что именно строительный сектор является основным источником загрязнения окружающей среды – на его долю приходится около 40 % потребляемой энергии и примерно 30 % выбросов парниковых газов. На саммите ООН по климату 2019 г. было объявлено о глобальной инициативе «Здания с нулевым выбросом углерода для всех», направленной на то, чтобы к 2030 г. все новые здания отвечали требованиям нулевого потребления

энергии, а существующие здания – к 2050 г. С учетом того, что в настоящее время только около 1 % зданий соответствуют этому требованию, практическая реализация инициативы ООН потребует привлечения огромных финансовых вложений в декарбонизацию зданий – не менее 1 трлн долларов США до 2030 г.

Проведенный тематический литературный обзор показал, что проблеме развития и совершенствования технологии энергоэффективных зданий посвящено большое число современных исследований, которые проводятся во многих странах мира. Результаты анализа факторов, требований и сертификатов, определяющих энергоэффективность зданий, представлены в работах [3–5], вопросы оптимизации энергопотребления зданий рассмотрены в работах [6–8], моделированию энергетических характеристик и технико-экономическому обоснованию применения энергоэффективных зданий посвящены работы [8–11]. Примеры практической реализации проектов энергоэффективных зданий с подробным описанием используемых технологий приведены в работах [12–14].

Однако, несмотря на большое число публикаций, посвященных энергоэффективным зданиям, вопросы разработки и проектирования схем электроснабжения таких объектов практически не рассматриваются. Кроме того, на сегодняшний день отсутствуют нормативные документы, устанавливающие требования к проектированию систем электроснабжения энергоэффективных зданий. Применение нормативно-правовой базы, используемой при проектировании жилых и общественных зданий, не позволяет в полной мере решить обозначенную проблему в силу того, что система электроснабжения энергоэффективных зданий имеет ряд особенностей. Эти особенности определяются тем, что в качестве источников электропитания часто применяются установки на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), характеризующиеся стохастической генерацией, а сами энергоэффективные здания могут существенно отличаться друг от друга по целому ряду параметров: назначению, архитектуре, размеру и этажности, составу потребителей и т. д.

С учетом того, что система электроснабжения энергоэффективного здания во многом определяет уровень комфорта и технико-экономические показатели проектируемого объекта, разработка инженерной методики проектирования подобных систем является важной и актуальной задачей.

Постановка задачи и методы исследования

Основным стимулом к проведению настоящих исследований послужила разработка проекта системы электроснабжения автономных модульных домов, производимых компанией Rocket Group [15]. Реализация проекта потребовала учета целого ряда специфических требований и ограничений, характерных для систем электроснабжения автономных энергоэффективных зданий. В результате была разработана инженерная методика проектирования систем электроснабжения автономных энергоэффективных зданий на основе ВИЭ, результаты апробации которой представлены в настоящей работе.

Компания Rocket Group является приверженцем концепции достижения максимальной гармонии между человеком и окружающим миром природы. Данную концепцию компания реализует через автономные модульные дома, которые позволяют сделать жизнь людей свободнее и комфортнее и при этом сберечь окружающую среду.

В основу технологии автономных модульных домов положены следующие принципы:

- должен быть обеспечен высокий уровень комфорта и надежности;
- конструкция дома должна обеспечивать простоту его перемещения и установку в разных, в том числе и труднодоступных местах;
- в качестве основных источников энергии должны использоваться установки возобновляемой энергетики.

Данные требования позволяют сформулировать набор условий, необходимых для реализации конечной цели проекта:

1. Основной источник энергии для электроснабжения модульного дома должен быть возобновляемым, повсеместно доступным, а энергоустановка на его основе должна быть совместима с конструкцией дома. Из известных технологий возобновляемой энергетики данным условиям соответствуют фотоэлектрические станции (photovoltaic station – PVS) и ветроэнергетические установки (wind turbines – WT).
2. Резко-переменный характер генерации основного источника энергии вызывает необходимость применения накопителя энергии. С учетом того, что коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) как PVS, так и WT относительно небольшой, требование обеспечения максимальной автономии вызывает необходимость применения основного генерирующего источника достаточной установленной мощности – в 4–5 раз больше среднесуточной электрической нагрузки. Соответственно, в данных условиях необходим накопитель энергии, обладающий хорошими зарядно-разрядными характеристиками, что обеспечит максимально эффективное использование доступной возобновляемой энергии. Этим требованиям наилучшим образом соответствуют литий-ионные аккумуляторные батареи (accumulator battery – AB).
3. Для обеспечения высокой надежности электроснабжения потребителей в составе проектируемой системы необходим гарантированный источник энергии, в качестве которого целесообразно использовать бензо- или дизель-генератор (GEN).

Необходимым условием проектирования изолированных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии является достоверный прогноз и тщательный анализ энергетического баланса, который определяет требования к техническим характеристикам основного генерирующего оборудования и системам управления. При решении подобных задач широко применяют методы имитационного модели-

рования режимов электроэнергетической системы, обеспечивающие оптимальный выбор состава и типоразмеров основного электрооборудования [16]. Для достижения поставленной цели исследования предлагается использовать инженерную методику, включающую выполнение четырех последовательных этапов, описанных ниже.

Расчет и анализ энергетического баланса

Первоочередной задачей является прогноз режимов электропотребления по сезонам года и расчет максимальной электрической нагрузки проектируемого объекта. Именно данные параметры определяют выбор установленной мощности основного электрооборудования, и, соответственно, адекватность всех дальнейших расчетов.

В табл. 1 показана сводная ведомость электрических нагрузок автономного модульного дома, дополненная значениями коэффициента спроса K_c , полученных по результатам анализа большого количества проектов и паспортных данных бытовых электроприборов [17].

Таблица 1. Ведомость электрических нагрузок автономного модульного дома

Table 1. Modular house electrical load listing

Тип потребителя Electrical load	Номинальная мощность, Вт Rated power, W	Время работы, часов Operating time, hours	Среднесуточное потребление, Вт·ч. Daily average load demand, Wh	K_c
Теплые полы Underfloor heating	2000	5	10000	0,5
Бойлер/Water heater	1500	2	3000	0,6
Кондиционер/Air conditioner	400	7	2800	0,7
Рекуператор/Recuperator	80	6	480	0,8
Насосная станция/Pump	600	1	600	0,8
Чайник/Kettle	1500	0,15	225	0,3
Холодильник/Refrigerator	150	18	2700	0,8
Индукционная варочная поверхность Inductive cooktop	1500	1	1500	0,8
Микроволновая печь Microwave oven	800	0,5	400	0,3
Освещение внутреннее Indoor light	150	5	750	1,0
Освещение наружное Outdoor light	50	3	150	1,0
Проектор Home cinema projector	120	5	600	0,3
Прочее Miscellaneous electrical loads	100	3	300	0,4

Максимальная расчетная нагрузка модульного дома в соответствии с нормативами по СП 31-110-2003 [18] определяется по следующему выражению:

$$P_{\max} = \sum P_{\text{ит}} K_c = 5,01 \text{ кВт.}$$

Для построения характерных суточных графиков нагрузок проектируемого объекта использовалась методика и справочные материалы из РД 34.20.178 [19]. Данным прогнозным графикам соответствуют следу-

ющие значения среднесуточного потребления электроэнергии: зима – 24,9 кВт·ч, весна – 16,1 кВт·ч, лето – 11,5 кВт·ч, осень – 17,0 кВт·ч.

Особенностью настоящего проекта являются технические ограничения по выбору количества, размеров и типа используемых солнечных панелей (solar panel – SP). Смысл данных ограничений состоит в размещении SP максимально возможной установленной мощности в габаритах модульного дома, что обеспечит простоту изменения его географической локации.

На рис. 1 показаны планы фасадов и крыши модульного дома с предполагаемыми местами размещения SP. Конструкция модульного дома предполагает использование части SP на фасадах в качестве элементов строительной отделки стен, соответственно жестко закрепленных. При этом имеется техническая возможность изменения наклона и ориентации 12 солнечных панелей на крыше модульного дома.

В данном проекте запланировано использование фотоэлектрических модулей (photovoltaic module – PVM) монокристаллического типа, изготовленных по технологии PERC Half-Cell, мощностью 400 Вт, обеспечивающих высокую энергетическую эффективность в условиях частичного затенения.



Рис. 1. Планы крыши и фасадов модульного дома с предполагаемыми местами размещения солнечных панелей

Fig. 1. Schematic view of roof and exterior walls of modular house with suggested PV-panels placements

Для расчета генерируемой PVS электроэнергии использовалось программное обеспечение, построенное на основе оригинальных математических моделей солнечной радиации и фотоэлектрического модуля,

подробно описанных в работах [20, 21]. Исходными данными моделирования являются географические координаты размещения гелиоустановки, азимутальный и наклонный углы ориентации солнечной батареи, номер моделируемого дня года, индекс прозрачности атмосферы, альbedo земной поверхности и тип солнечного трекера.

Расчетные значения среднесуточной энергии, генерируемой одной SP мощностью 400 Вт, для предполагаемого места установки автономного модульного дома (Курская область, 51°43' с.ш., 36°11' в.д.) показаны в табл. 2.

Таблица 2. Среднесуточная энергия, генерируемая одной солнечной панелью мощностью 400 Вт, в декабре, кВт·ч

Table 2. Average daily energy generated by one solar panel with capacity 400 W in December, kWh

Угол наклона, град PV tilt angle, deg	Восток East	ЮВ S-E	Юг South	ЮЗ S-W	Запад West	СЗ N-W	Север North	СВ N-E
0	0,332	0,332	0,332	0,332	0,332	0,332	0,332	0,332
5	0,332	0,369	0,384	0,368	0,332	0,295	0,279	0,295
10	0,331	0,403	0,434	0,403	0,331	0,26	0,227	0,26
15	0,33	0,436	0,481	0,436	0,33	0,231	0,193	0,232
20	0,33	0,466	0,526	0,466	0,329	0,211	0,192	0,211
25	0,329	0,494	0,568	0,494	0,329	0,199	0,191	0,199
30	0,329	0,52	0,606	0,519	0,328	0,193	0,189	0,193
35	0,327	0,543	0,642	0,542	0,327	0,189	0,187	0,189
40	0,326	0,562	0,673	0,561	0,325	0,186	0,185	0,186
45	0,323	0,579	0,701	0,578	0,323	0,184	0,183	0,184
50	0,32	0,592	0,724	0,591	0,319	0,181	0,18	0,181
55	0,317	0,602	0,743	0,601	0,316	0,178	0,177	0,178
60	0,312	0,609	0,758	0,608	0,311	0,175	0,175	0,175
65	0,307	0,612	0,768	0,611	0,306	0,172	0,171	0,172
70	0,3	0,612	0,774	0,611	0,299	0,169	0,168	0,169
75	0,293	0,609	0,775	0,608	0,292	0,165	0,165	0,165
80	0,285	0,602	0,771	0,601	0,284	0,162	0,162	0,162
85	0,277	0,592	0,763	0,59	0,276	0,158	0,158	0,158
90	0,268	0,578	0,75	0,577	0,267	0,155	0,155	0,155

Результаты расчетов показывают, что максимальную выработку электроэнергии в зимний период в рассматриваемом месте размещения модульного дома можно получить, если расположить его главным фасадом на Север (рис. 1), а SP на крыше сориентировать на Юг под оптимальным для зимы углом наклона 70–75 градусов. Результаты расчета потенциальной выработки энергии PVS в декабре представлены в табл. 3.

Таблица 3. Среднесуточная энергия, генерируемая солнечной батареей в декабре, кВт·ч

Table 3. PV module daily average energy yield (December)

Панели PV-panels placement	Кол-во СП Number of PV	Ориентация Orientation	Угол Tilt angle	W, кВт·ч/kWh	
				1 СП 1 PV	Сумма Total
Главный фасад Principal front of modular house	4	С	90	0,1547	0,6188
Задний фасад C-side of modular house	5	Ю	90	0,75	3,75
Крыша/Roof	12	Ю	70	0,774	9,288

Выполненные расчеты показывают, что даже при оптимальном размещении SP на модульном доме суммарная среднесуточная декабрьская генерация составит 13,65 кВт·ч электроэнергии, что не обеспечит полного покрытия зимнего электропотребления.

Для оценки потенциальных возможностей WT по выработке электроэнергии и целесообразности ее применения в качестве дополнительного генерирующего источника выбрана классическая трехлопастная модель ВЭУ с горизонтальной осью вращения, номинальной мощностью 3 кВт, с типичными для моделей данного класса характеристиками. Выбор данной модели обоснован тем, что применение ВЭУ большей мощности сложно совместить с конструкцией здания.

В качестве исходных метеорологических данных для расчета ветроэнергетического потенциала использовались данные метеостанции, расположенной вблизи г. Курска [22]. Основные сведения о метеостанции и характеристики временного ряда приведены на рис. 2.

Для оценки ветроэнергетического потенциала на высоте, отличающейся от базовой, использовался метод вертикальной экстраполяции профиля скорости ветра посредством пересчета оценок параметров распределения Вейбулла (методика *Spera-Richards*) [23].

Оценка среднемесячной величины выработки электроэнергии WT определялась по следующей формуле:

$$W_i = P_{wt}(v) \cdot \rho_{i,ave} \cdot f(v, c_i, k_i) \cdot 8760,$$

где W_i – средняя расчетная выработка электроэнергии WT в i -й месяц; $P_{wt}(v)$ – зависимость мощности генерируемой WT от скорости ветра (определяется путем интерполяции энергетической характеристики выбранной WT по градиентам скорости ветра v); $\rho_{i,ave}$ – среднемесячная плотность воздуха, кг/м³; $f(v, c_i, k_i)$ – функция плотности распределения Вейбулла (c_i, k_i – оценки параметров масштаба и формы для i -ого месяца).

Результаты расчета выработки электроэнергии WT для различных высот расположения оси ветроколеса сведены в табл. 4.

Таблица 4. Оценка среднемесячной выработки электроэнергии ветротурбиной на высоте оси ветроколеса $h=10, 14, 18$ и 20 м

Table 4. Estimated monthly average electricity production of wind turbine at different hub height ($h=10, 14, 18, 20$ meters)

Месяц/Month	Расчетная выработка электроэнергии ВЭУ W, кВт·ч Estimated electricity generation of wind turbine W, kWh			
	h=10 m/m	h=14 m/m	h=18 m/m	h=20 m/m
Январь/January	69,4	100,8	126,1	137,0
Февраль/February	74,5	106,1	131,3	142,0
Март/March	87,4	121,3	147,7	158,7
Апрель/April	64,8	92,3	114,2	123,5
Май/May	30,3	45,9	59,0	64,7
Июнь/June	22,3	34,6	45,1	49,8
Июль/July	16,3	25,8	33,9	37,6
Август/August	11,7	19,4	26,3	29,3
Сентябрь/September	26,4	40,5	52,5	57,8
Октябрь/October	36,2	53,9	68,6	75,1
Ноябрь/November	62,5	90,8	113,8	123,7
Декабрь/December	85,0	120,9	149,5	161,6
Год/Annual	586,7	852,3	1068,0	1160,9



Рис. 2. Расположение и основные сведения о метеостанции и характеристики временного ряда данных
Fig. 2. Geographical location of the weather station with basic information about site and characteristics of available time-series data

Полученные результаты оценки ветроэнергетического потенциала и выработки электроэнергии WT показывают, что применение WT в качестве дополнительного источника энергии в рассматриваемом регионе нецелесообразно. Среднегодовой КИУМ WT составляет всего 0,022 при ее установке на высоте 10 м, и 0,044 на высоте 20 м. Прогнозируемая среднесуточная выработка электроэнергии (для высоты 20 м) в январе и феврале составляет около 4,5 кВт·ч.

Практический смысл рассматривать WT в качестве потенциального генерирующего источника имеет смысл при величине КИУМ WT > 0,2, при этом окончательный выбор типоразмера установки производится по результатам имитационного моделирования рабочих режимов электроэнергетической системы и решения оптимизационной задачи на третьем этапе предложенной методики.

Выбор основного электрооборудования и разработка структурной схемы электроэнергетической системы

Важной технической задачей проектирования гибридных электроэнергетических систем является определение рациональной архитектуры их построения. По архитектуре (или топологии) различают два основных варианта построения гибридных систем: с сопряжением генерирующих источников на постоянном или переменном токе, также возможны разнообразные варианты смешанных схем подключения. Каждая архитектура имеет свои достоинства и недостатки, и преимущественную область применения.

На основе проведенного анализа требований к проектируемой системе электроснабжения представляется целесообразным выбрать в качестве базовой конфигурации смешанную архитектуру построения системы (рис. 3).

Выбор данной конфигурации автономной системы электроснабжения обоснован тем, что основным генерирующим источником в проектируемой системе является PVS. Важными достоинствами данной архитектуры является эффективное использование доступной солнечной энергии и органического топлива, чем и достигается высокий уровень автономности.

В зависимости от внешних условий, текущего состояния оборудования и режимов электропотребления рассматриваемая система может функционировать в нескольких режимах.

Режим 1. При высокой интенсивности солнечного излучения обеспечивается полное покрытие электрических нагрузок и заряд АВ энергией, генерируемой PVS.

Режим 2. Нагрузка покрывается энергией от PVS и АВ, а если Солнца нет, то только от АВ. В этом режиме обеспечивается контроль остаточной емкости АВ, и при ее снижении ниже установленного порогового значения производится запуск генератора (GEN).

Режим 3. Покрытие электрической нагрузки и заряд АВ обеспечиваются от GEN. При увеличении остаточной емкости АВ выше установленного порогового значения с помощью коммутатора К производится переключение на питание нагрузки от автономного инвертора АИ (режим 1 или 2).

При такой логике функционирования системы можно использовать достаточно простую схемотехнику для построения автономного инвертора, так как в данном случае от него не требуется реализация функции droopcontrol, обеспечиваемой регулированием значений выходной частоты и напряжения. В режиме 3 обеспечивается прямое (без внешних преобразователей) подключение генератора к нагрузке, что обеспечивает эффективное использование топлива.

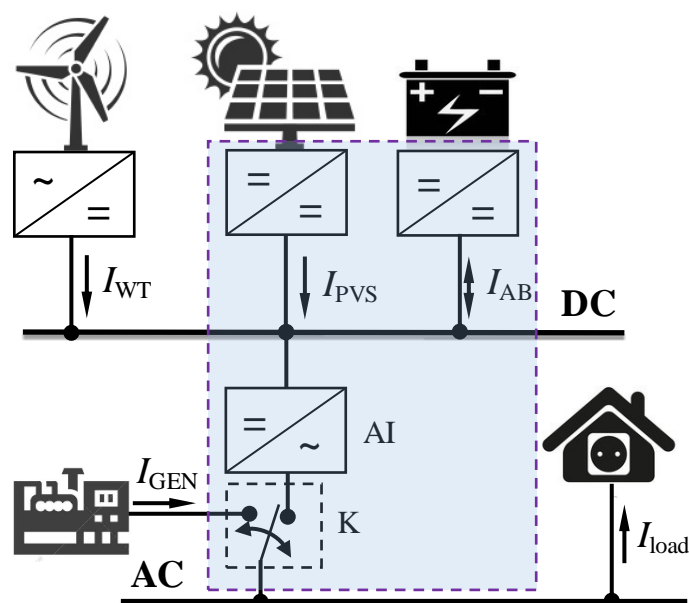


Рис. 3. Структурная схема построения гибридной электростанции с ВИЭ по смешанной топологии
Fig. 3. Structure flowchart of hybrid renewable power supply system with mixed topology

Веским аргументом в пользу выбранной топологии является наличие на рынке унифицированных солнечных гибридных инверторов, которые содержат практически все необходимые для функционирования системы встроенные электронные компоненты (на рис. 3 выделены прямоугольником). В последние годы производство инверторов данного типа освоили многие азиатские производители, они выпускаются в широком ассортименте и обладают хорошим соотношением цена/качество.

Для построения гибридной системы электроснабжения по смешанной топологии, представленной на рис. 3, требуется гибридный двухходовой инвертор с величиной мощности по постоянному току (DC входу) не менее 9 кВт, по переменному току (AC входу) не менее 5,01 кВт. Наиболее распространенными моделями гибридных инверторов данного класса являются модели с величиной напряжения DC входа – 48 В. Выбор данного напряжения позволяет с одной стороны уменьшить сечения проводников и снизить потери по сравнению с моделями на 12 и 24 В, с другой стороны – использовать готовые сборки АВ без необходимости их последовательного соединения и применения ВМС, в сравнении с моделями на 96 В и выше.

Приемлемым вариантом является модель гибридного инвертора номинальной выходной мощностью по AC входу 8 кВт, которая представлена на рынке несколькими известными производителями силовой электроники. Данная модель инвертора обеспечивает максимальную мощность по DC входу более 10 кВт и комплектуется двумя встроенными солнечными контроллерами точки максимальной мощности (maximum power point tracker – MPPT).

Определим необходимую минимальную емкость АВ $Q_{\text{batt.min}}$ (кВт·ч) по требуемому числу часов питания T_{batt} потребителей от АВ при отсутствии генерации от возобновляемых источников:

$$Q_{\text{batt.min}} = \frac{E_L T_{\text{batt}}}{24 DOD \eta_{\text{ch}} \eta_{\text{dch}}}, \quad (1)$$

где $DOD=80\%$ – допустимый уровень разряда литий-железо-фосфатных аккумуляторов; $\eta_{\text{ch}}, \eta_{\text{dch}}$ – коэффициенты полезного действия преобразователей в режиме заряда/разряда АВ, соответственно (примем $\eta_{\text{ch}}=0,9, \eta_{\text{dch}}=0,95$); $E_L=24,9$ кВт·ч – значение средне-суточной величины энергии, потребляемой нагрузкой в самый энергодефицитный месяц – декабрь.

Примем в первом приближении минимальное значение числа часов питания потребителей от АВ при отсутствии генерации от возобновляемых источников $T_{\text{batt}}=6$ часов. В результате вычислений по выражению (1) получим $Q_{\text{batt.min}}=9,1$ кВт·ч, что в пересчете на 48 В соответствует емкости АВ $C_{\text{batt}}=190$ А·ч. Принимаем для проведения технико-экономического анализа комплектный блок АВ Battery LiFePO4 Cells 48V номинальной емкостью 200 А·ч.

Заключительным этапом выбора электрооборудования является определение номинальной мощности гарантированного источника питания – генератора (GEN). В данном проекте в качестве гарантированного источника питания целесообразно применение бензогенератора инверторного типа, достоинствами которого является практически неизменный удельный расход топлива в широком диапазоне нагрузок.

Выбор необходимой мощности генератора P_{GEN} для работы в длительном режиме осуществляется по условию покрытия максимальной мощности нагрузки P_{max} и зарядной мощности P_{ch} АВ:

$$P_{\text{GEN}} > P_{\text{max}} + P_{\text{ch}} = P_{\text{max}} + 0,2 C_{\text{batt}} N_{\text{batt}} V_{\text{batt}},$$

где N_{batt} – количество блоков АВ, используемых в гибридной системе.

Для проведения технико-экономических расчетов выбираем модель генератора номинальной мощностью для длительного режима 9,0 кВт.

Оптимизация состава и типоразмеров основного электрооборудования

Основной задачей данного этапа является определение оптимальных размеров (номинальных мощностей) основного электрооборудования на основе сравнительной оценки технико-экономических показателей проектируемой системы электроснабжения. В качестве исходных данных при выполнении исследований используются технико-экономические характеристики предварительно выбранного оборудования, определенные в предыдущем разделе.

Оптимизация оборудования гибридных систем электроснабжения (hybrid power supply system – HPSS) выполняется за три последовательных этапа. На первом этапе расчетов формируются временные ряды климатических данных (солнечной радиации, скорости ветра и температуры воздуха) и график электрических нагрузок потребителя электроэнергии. Основой формирования временных климатических рядов являются географические координаты размещения HPSS и данные многолетних метеорологических наблюдений. Построение графиков электрических нагрузок осуществляется с использованием вероятностно-статистической модели электрических нагрузок децентрализованного потребителя. Исходными данными для выполнения первого этапа расчетов являются данные метеорологических сайтов и базы данных Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA). В данной работе используются временные ряды продолжительностью в один год с дискретизацией в один час, которые преимущественно применяются для решения задач оптимизации HPSS.

На втором этапе расчетов выполняется моделирование рабочих режимов HPSS, по результатам которого определяются технические показатели проектируемой электроэнергетической системы. Имитационная модель HPSS с ВИЭ реализована в программном комплексе MatLab/Simulink. Исходными данными для выполнения данного этапа расчетов служат основные технические характеристики энергетического оборудования HPSS, установленные по данным их технической спецификации.

Оптимизация состава оборудования HPSS выполняется на заключительном третьем этапе расчетов. Оптимизационная задача решается с использованием специализированного программного модуля, реализованного в виде библиотеки программ-функций MatLab. Описание используемого программного обеспечения приведено в работах [24, 25].

Следует отметить, что в данном конкретном случае нет необходимости в постановке и решении полной оптимизационной задачи с применением метаэвристических математических алгоритмов. Обосновано это тем, что оптимальное количество и тип SP установлены на предварительном этапе исследований (рис. 1), а тип и номинальную мощность инвертора определяет принятая архитектура электростанции и параметры нагрузки. Соответственно, в данном случае нужно оптимизировать только количество блоков АВ, и по полученным результатам можно скорректировать пред-

варительно принятую мощность генератора. Таким образом, задача оптимизации сводится к имитационному моделированию режимов работы HPSS на длительном (годовом) временном интервале с определением основных технико-экономических показателей проектируемой системы: экономические показатели, степень автономности, расход топлива и др. На основе сравнительного анализа полученных результатов моделирования и определяется лучший вариант.

В качестве основных экономических показателей используются два параметра: приведенная стоимость жизненного цикла (life cycle cost – LCC) и выровненная стоимость генерируемой электроэнергии (levelized cost of electricity – LCOE).

Стоимость жизненного цикла, или общие затраты на электроэнергетическую систему в течение всего ее срока службы, определяется по уравнению:

$$LCC = C_{\text{cap}} + C_{\text{main}},$$

где C_{cap} – общие капитальные затраты на проект; C_{main} – стоимость технического обслуживания.

Выровненная стоимость электроэнергии определяется по уравнению:

$$LCOE = \frac{LCC}{E_{\text{year}}},$$

где E_{year} – годовой объем электроэнергии, полученный потребителем от HPSS с ВИЭ.

За продолжительность жизненного цикла принимается срок службы одного из всех компонентов HPSS, имеющих максимальное заявленное производителем значение (в данном примере $T=25$ лет соответствует солнечным панелям).

Фактор времени при распределении капитальных затрат в течение жизненного цикла объекта учитывается с помощью коэффициента возврата капитала (capital recovery factor – CRF):

$$CRF = \frac{i \cdot (1+i)^T}{(1+i)^T - 1},$$

где i – процентная банковская ставка; T – общий срок службы энергетической системы.

Сроки службы отдельных компонентов HPSS могут значительно различаться, поэтому их необходимо привести к условиям единовременного платежа. Например, если в составе HPSS используется АВ с гарантированным сроком службы 5 лет, а значение жизненного цикла системы принято равным $T=25$ лет, приведенная стоимость АВ C_{batt} определяется по следующему выражению:

$$C_{\text{batt}} = C_{\text{batt0}} \cdot \left(1 + \frac{1}{(1+i)^5} + \frac{1}{(1+i)^{10}} + \frac{1}{(1+i)^{15}} + \frac{1}{(1+i)^{20}} \right), \quad (2)$$

где C_{batt0} – первоначальная цена АВ.

Срок службы дизель-генераторных установок и бензогенераторов измеряется количеством моточасов до капитального ремонта, поэтому их приведенная стоимость рассчитывается по аналогичной (2) формуле после определения их срока службы по уравнению:

$$T_{\text{GEN}} = \frac{H_{\text{OV}}}{H_{\text{F}}}, \text{ лет,}$$

где H_F – количество часов работы генератора в год, рассчитанное по результатам имитационного моделирования; H_{OV} – количество моточасов до капитального ремонта, заявленное производителем.

Для HPSS в рассматриваемой конфигурации суммарные приведенные капитальные затраты определяются по уравнению:

$$Cap = CRF \cdot (N_{SP} \cdot C_{SP} + N_{batt} \cdot C_{batt} + C_{GEN} + C_{inv}),$$

где N_{SP} , C_{SP} – количество и стоимость солнечных панелей; N_{batt} , C_{batt} – количество и приведенная стоимость аккумуляторных батарей; C_{GEN} – приведенная стоимость бензогенератора; C_{inv} – приведенная стоимость инвертора.

Пренебрегая затратами на обслуживание инвертора, суммарные затраты на техническое обслуживание HPSS определяются по уравнению:

$$Main = N_{SP} \cdot M_{SP} + N_{batt} \cdot M_{batt} + M_{GEN} + M_{fuel},$$

где M_{SP} , M_{batt} , M_{GEN} – ежегодные затраты на техническое обслуживание SP, AB и бензогенератора; M_{fuel} –

затраты на топливо, расход которого определяется по результатам моделирования режимов.

Искомые переменными оптимизационной задачи в данном случае является число аккумуляторов в аккумуляторной батарее N_{batt} , при которых обеспечивается минимальное значение LCOE. В зависимости от рассматриваемой конфигурации HPSS для искомых переменных могут быть установлены дополнительные ограничения.

Результаты имитационного моделирования и сравнительного технико-экономического анализа показали, что оптимальным вариантом является система электроснабжения с 2 блоками AB, со следующими значениями экономических показателей: $Cap = \$1745$, $Main = \$815$, $LCC = \$2560$, $LCOE = \$0,405$.

Графическое представление обобщенных результатов моделирования режимов HPSS представлено в виде месячного графика энергетического баланса и диаграммы, отображающей долю каждого компонента (рис. 4). Диаграмма распределения экономических затрат на компоненты системы показана на рис. 5.

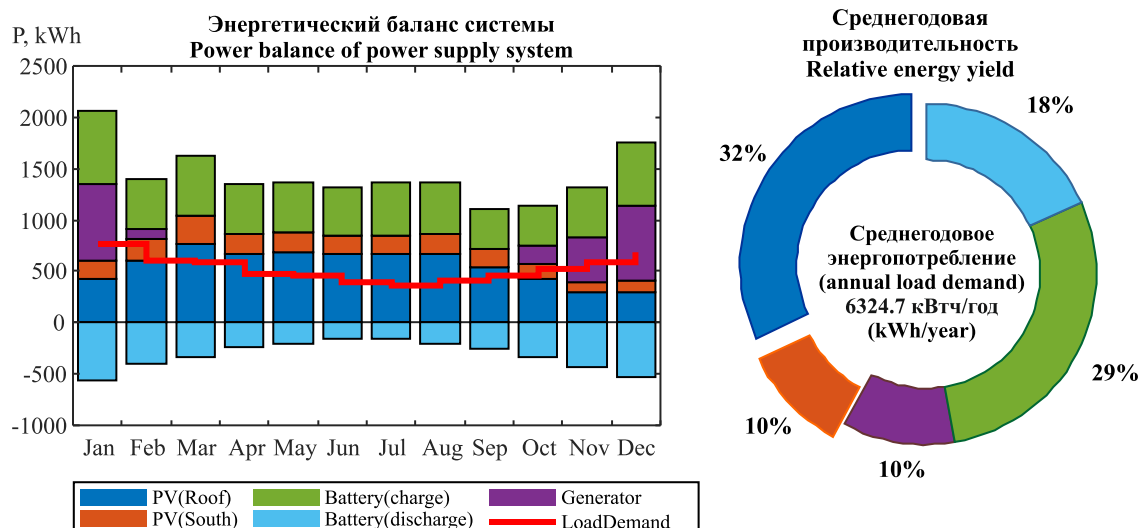


Рис. 4. Среднемесячный энергетический баланс и производительность энергетической системы

Fig. 4. Monthly-averaged power balance and year wise relative energy yield of power supply system components

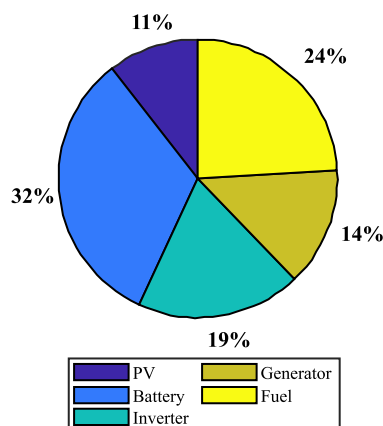


Рис. 5. Диаграмма распределения экономических затрат на компоненты энергетической системы

Fig. 5. Cost breakdown diagram of hybrid power supply system

Анализ полученных результатов показывает, что выбранная конфигурация HPSS обеспечивает достаточно высокий уровень автономности. Большую часть года, с марта по сентябрь включительно, генерируемой энергии от SP достаточно для полного покрытия электрической нагрузки. В зимние периоды года дефицит потребляемой энергии покрывается генератором, при этом за сутки он вводится в работу только один раз, а среднее время включения составляет около 4 часов.

Выбор коммутационных и защитных аппаратов, проводниковой продукции, разработка принципиальных электрических схем

Основным компонентом проектируемой системы электроснабжения является гибридный инвертор, с помощью которого обеспечивается объединение электрооборудования в единую систему и настройка

ее функциональных возможностей. Важной характеристикой гибридного инвертора является количество и технические параметры солнечных MPPT-контроллеров, которые определяют целесообразную конфигурацию PVS. Ниже приведен практический пример выбора рациональной конфигурации PVS для гибридного инвертора со следующими характеристиками:

- количество MPPT-контроллеров – 2;
- рабочий MPPT диапазон – 150–425 В;
- номинальное входное напряжение PV-массива – 370 В (125 В ~ 500 В);
- максимальный входной ток PV-массива – 26+26 А.

В соответствии с заданными характеристиками MPPT-контроллеров необходимо разделить все имеющиеся в наличии SP на группы. Для обеспечения максимально эффективного использования доступной солнечной энергии рекомендуется придерживаться следующих правил:

1. В последовательную цепочку можно включать SP только одного типа с идентичной ориентацией в пространстве.

2. Количество SP в параллельных цепях должно быть одинаковым.

Исходя из данных условий, рациональным вариантом представляется следующий:

1. Две параллельные цепи по 6 последовательных панелей в каждой (крыша) подключаются к первому MPPT-контроллеру.
 2. Цепочка из 5 последовательных панелей (стена Юг) подключается ко второму MPPT-контроллеру.
- Полезно использовать энергию, генерируемую четырьмя солнечными панелями, расположенными на северной стене здания, в данной конфигурации системы не представляется возможным, и данный вопрос требует отдельного рассмотрения.

Для построения полнофункциональной схемы электростанции кроме основного электрооборудования необходимо использовать целый ряд дополнительных компонентов, обеспечивающих необходимый уровень защиты, надежности энергетической системы и т. п. Разработанная в результате проведенных исследований блочно-монтажная схема системы электроснабжения автономного модульного дома показана на рис. 6.

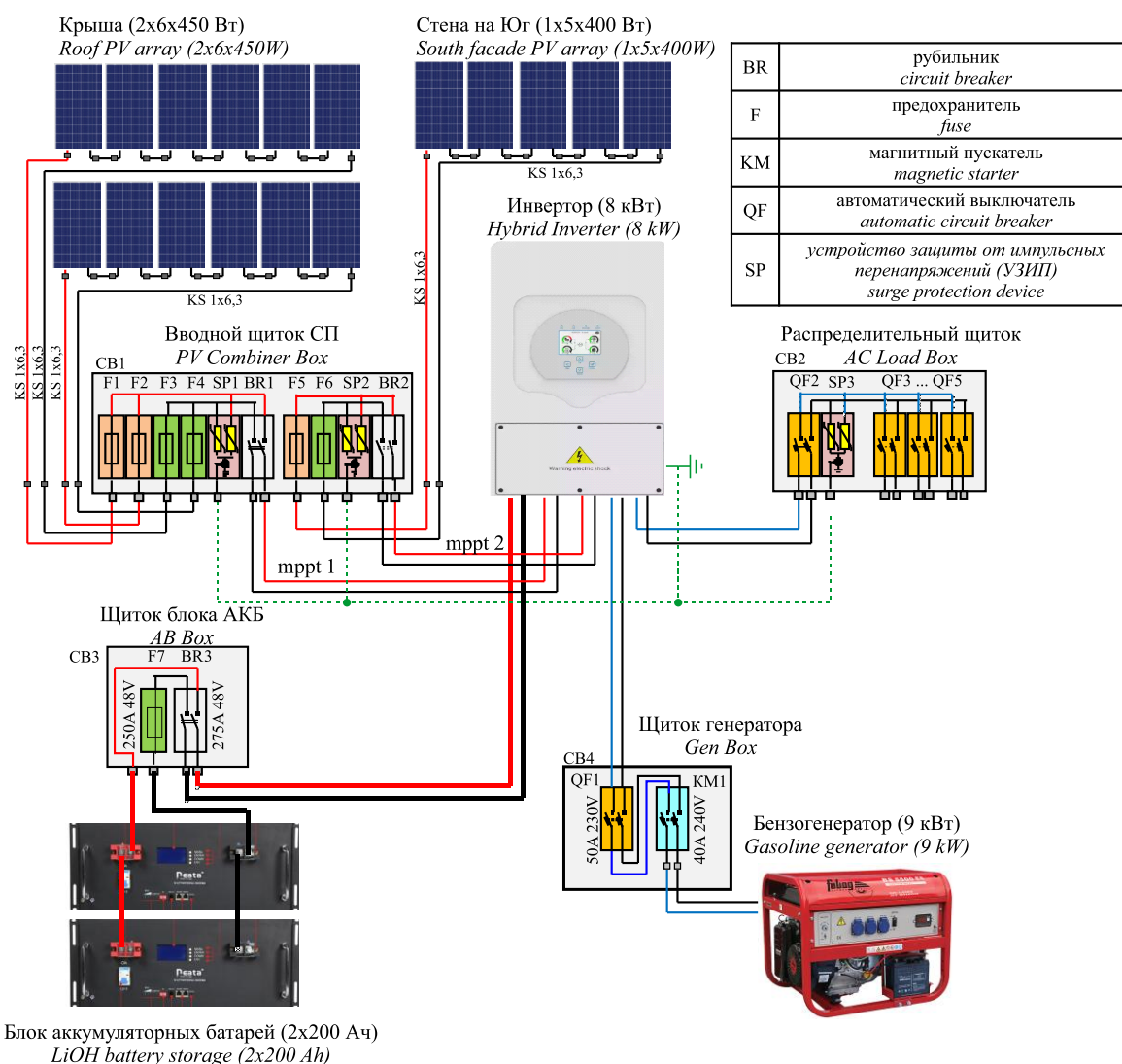


Рис. 6. Блочно-монтажная схема гибридной системы электроснабжения автономного модульного дома
 Fig. 6. Connection layout diagram of hybrid power supply system of autonomous modular house

На схеме, приведенной на рис. 6, показана только силовая часть энергетической системы. Информационные линии связи и оборудование передачи данных не обозначены. Их подключение и настройка выполняются в соответствии с руководством по эксплуатации гибридного инвертора.

Блоки подключения силового оборудования имеют следующее функциональное назначение:

1. Блок СВ1 обеспечивает токовую защиту инвертора от коротких замыканий и перегрузок в цепи солнечных батарей (плавкие предохранители) и защиту от импульсных перенапряжений (surge protection device – SPD), а также содержит устройство ручной коммутации блоков солнечных модулей (рубильники).

Условие выбора номинального напряжения SPD:

$$V_{SPD}^{PV} \geq 1,2V_{oc}N_{ser} \text{ или } V_{SPD}^{PV} = V_{rat.inv}N_{ser},$$

где V_{oc} – напряжение холостого хода PVM, В; $V_{rat.inv}$ – максимальное напряжение на входе инвертора, В; N_{ser} – число последовательно соединенных PVM.

Условие выбора номинального тока предохранителей:

$$I_{fuse}^{PV} = 1,1I_{sc}N_{par} \text{ или } I_{fuse}^{PV} \leq 1,1 \cdot I_{PVmaxSC}N_{par},$$

где I_{sc} – ток короткого замыкания PVM, А; $I_{PVmaxSC}$ – максимальный ток короткого замыкания PVM на входе инвертора, А; N_{par} – число параллельно соединенных PVM.

2. Блок СВ2 содержит аппараты токовой защиты инвертора от коротких замыканий и перенапряжений (автоматические выключатели) со стороны потребителя, а также устройства защиты от импульсных перенапряжений (SPD).

3. Блок СВ3 обеспечивает защиту инвертора от КЗ и перегрузки со стороны блока аккумуляторных батарей (плавкие предохранители), а также содержит устройство коммутации (рубильник) для ручного включения и выключения блока АВ.

4. Блок СВ4 предназначен для обеспечения пуска генератора и токовой защиты. Блок содержит автоматический выключатель и магнитный пускатель (контактор).

Выбор уставок коммутационных и защитных аппаратов, а также сечений проводников производится согласно требованиям соответствующих нормативных документов.

Заключение

Представлены результаты исследований по разработке системы электроснабжения автономного модульного дома. Предложена инженерная методика проектирования таких систем, которая состоит из четырех последовательных этапов. Методика ориентирована на проектирование систем электроснабжения «активных» зданий с максимально возможным использованием возобновляемых источников энергии. На первом этапе проектирования определяются энергетические потребности здания в электрической энергии и доступный энергетический потенциал ВИЭ с суточной дискретизацией по сезонам года. На основе анализа энергетического баланса определяется целесообразность применения того или иного ВИЭ, необходимость использования накопителей энергии и резервных генераторов на органическом топливе.

На втором этапе выбирается тип генерирующего оборудования и разрабатывается структурная схема его сопряжения в составе единой энергетической системы. На третьем этапе осуществляется имитационное моделирование рабочих режимов электроэнергетической системы на годовом временном интервале, по результатам которого определяется окончательный состав и типоразмеры основного электрооборудования. На заключительном этапе проекта производится выбор необходимой коммутационной и защитной аппаратуры, проводников и разрабатываются электрические и монтажные схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Carbon Budget 2021. URL: <https://essd.copernicus.org/articles/14/1917/2022/essd-14-1917-2022.pdf> (дата обращения 22.09.2022).
2. UNFCCC. The Paris Agreement. 2015. URL: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf (дата обращения 22.09.2022).
3. A review on zero energy buildings – Pros and cons / T. Wilberforce, A.G. Olabi, E.T. Sayed, K. Elsaid, H.M. Maghrabi, M.A. Abdelkareem // Energy and Built Environment. – 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.06.002> (дата обращения 22.09.2022).
4. Promoting energy efficiency standards and technologies to enhance energy efficiency in buildings / ECE Energy Series No. 60. – Geneva, 2020.
5. Moghaddasi H., Culp C., Vanegas J. Net zero energy communities: integrated power system, building and transport sectors // Energies. – 2021. – V. 14. – № 21. – 7065. URL: <https://doi.org/10.3390/en14217065> (дата обращения 22.09.2022).
6. Adeli M.M., Farahat S., Sarhaddi F. Optimization of energy consumption in net-zero energy buildings with increasing thermal comfort of occupants // International Journal of Photoenergy. – 2020. – V. 2020. – 9682428. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/9682428> (дата обращения 22.09.2022).
7. Bataineh K., Rabee A.A. A cost effective approach to design of energy efficient residential buildings // Frontiers of Architectural Research. – 2022. – V. 11. – № 2. – P. 297–307. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.10.004> (дата обращения 22.09.2022).
8. Cost-aware design and simulation of electrical energy systems / Y. Chen, S. Vinco, D. Baek, S. Quer, E. Macii, M. Poncino // Energies. – 2020. – V. 13. – № 11. – 2949. URL: <https://doi.org/10.3390/en13112949> (дата обращения 22.09.2022).
9. Hybrid renewable energy applications in zero-energy buildings and communities integrating battery and hydrogen vehicle storage / J. Liu, X. Chen, H. Yang, K. Shan // Applied Energy. – 2021. – V. 290. – 116733. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116733> (дата обращения 22.09.2022).
10. Feasibility study and passive design of nearly zero energy building on rural houses in Xi'an, China / H. Chang, Y. Hou, I. Lee, T. Liu, T.D. Acharya // Buildings. – 2022. – V. 12. – № 3. – 341. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12030341> (дата обращения 22.09.2022).
11. Sobhani H., Shahmoradi F., Sajadi B. Optimization of the renewable energy system for nearly zero energy buildings: a future-oriented approach // Energy Conversion and Management. – 2020. – V. 224. – 113370. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113370> (дата обращения 22.09.2022).
12. Erhorn H., Erhorn-Kluttig H. Selected examples of Nearly ZeroEnergy Buildings Detailed Report. 2014. URL: https://www.epbd-ca.eu/wp-content/uploads/2011/05/CT5_Report_Selected_examples_of_NZEBs-final.pdf (дата обращения 22.09.2022).

13. Data on nearly zero energy buildings (NZEBS) projects and best practices in Europe / D. D'Agostino, S. Tsemekidi Tzeiranaki, P. Zangheri, P. Bertoldi // Data in Brief. – 2021. – V. 39. – 107641. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107641> (дата обращения 22.09.2022).
14. Zero net energy case study homes. V. 1 // Library of Congress Cataloging-in-Publication. – California, 2021.
15. Компания Rocket Group – официальный сайт. URL: <https://rcktpro.com/> (дата обращения 22.09.2022).
16. Обухов С.Г., Ибрагим А. Оптимизация состава оборудования гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20 – № 2. – С. 64–76. URL: <https://vestnik.susu.ru/power/article/view/9923/7828> (дата обращения 22.09.2022).
17. Техническая коллекция от компании Schneider Electric: Выпуск № 11 «Проектирование электроустановок квартир с улучшенной планировкой и коттеджей». – М.: TECHCOL 1, 2007. – 241 с.
18. СП 31-110-2003. Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий // Госстрой России. Свод правил по проектированию и строительству. – М.: Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу (ГОССТРОЙ России), 2004. – 55 с.
19. РД 34.20.178. Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства // Методические указания по расчету электрических нагрузок в сетях 0,38-110 кВ сельскохозяйственного назначения. – М.: Всесоюзный государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Сельэнергопроект», 1985. – 109 с.
20. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Masolov V.G. Mathematical model of solar radiation based on climatological data from NASA SSE // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – V. 363. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/363/1/012021> (дата обращения 22.09.2022).
21. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Kryuchkova M. Simulation of electrical characteristics of a solar panel // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – V. 363. II International Conference «Cognitive Robotics». – Tomsk, 22–25 November 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/132/1/012017
22. Federal Climate Complex Data Documentation for Integrated Surface Data // National Climatic Data Center. URL: <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/isd-format-document.pdf> (дата обращения 22.09.2022).
23. Spera D.A., Richards T.R. Modified power law equations for vertical wind profiles // Proceedings of the Conference and Workshop on Wind Energy Characteristics and Wind Energy Siting. – Portland, Oregon, 19–21 June 1979. – Portland, Oregon: Battelle Memorial Institute, Pacific Northwest Laboratory, 1979. – P. 47–58.
24. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 38–51. URL: https://archive.tpu.ru/bitstream/11683/41318/1/bulletin_tpu-2017-v328-i6-04.pdf (дата обращения 22.09.2022).
25. Обухов С.Г., Климова Г.Н., Ибрагим А.И. Методика оптимизации состава оборудования электроэнергетических систем на основе возобновляемых источников энергии // Вестник ИГЭУ. – 2020. – № 6. – С. 25–38. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.025-038.

Поступила 23.10.2022 г.
Прошла рецензирование 24.11.2022 г.

Информация об авторах

Обухов С.Г., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Давыдов Д.Ю., кандидат технических наук, ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Белоглазкин А.О., директор по развитию ООО «Рокет групп» Limited Liability Company «ROCKET GROUP».

UDC 621.311.26

ENGINEERING METHODOLOGY FOR DESIGNING POWER-SUPPLY SYSTEMS OF AUTONOMOUS ENERGY EFFICIENT BUILDINGS BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

Sergey G. Obukhov¹,
serob@tpu.ru

Denis Yu. Davydov¹,
denisyudavydov@gmail.com

Alexey O. Beloglazkin²,
rcktgroup@gmail.com

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Rocket Group LLC,
5a, 1st Magistralny tupik, Moscow, 123290, Russia.

Relevance. The construction sector is currently one of the largest consumers of raw materials and a major source of environmental pollution, accounting for about 40 % of energy consumption and about 30 % of greenhouse gas emissions. As a result of emissions into the atmosphere of combustion products of coal, oil and gas, irreparable damage is caused to the environment. One of the promising ways to solve this problem is the introduction of «energy efficient building» technology. The key task of designing energy-efficient buildings is the development of a power supply system, which largely determines the level of comfort and technical and economic indicators of the entire facility. The complexity of this task is caused by the fact that installations based on renewable energy sources, characterized by stochastic generation, are mainly used as power sources, and energy-efficient buildings themselves can differ significantly from each other in a number of parameters: purpose, architecture, size and number of storeys, composition of consumers etc. The article proposes an engineering technique for designing such objects and the results of its testing.

The aim of study is to develop an engineering methodology for designing power supply systems for autonomous energy-efficient buildings based on renewable energy sources.

Methods: methods of statistical processing of time series of data, mathematical and computer modeling using the MatLab/Simulink software environment.

Results. The authors have proposed an engineering methodology for designing power supply systems for autonomous objects, focused on the design of «active» buildings with the maximum possible use of renewable energy sources. The paper describes the main design stages, which include calculation and analysis of the energy balance, choice of the main electrical equipment and development of a structural diagram of the electric power system, optimization of the composition and sizes of the main electrical equipment, selection of switching and protective devices, conductor products, development of circuit diagrams. The paper considers the practical example of application of the proposed methodology for designing the power supply system of an autonomous energy-efficient building in the Kursk region.

Key words:

energy efficient building, renewable energy sources, time series, hybrid power supply systems, energy balance, autonomous power supply system.

REFERENCES

1. *Global Carbon Budget 2021*. Available at: <https://essd.copernicus.org/articles/14/1917/2022/essd-14-1917-2022.pdf> (accessed 22 September 2022).
2. *UNFCCC. The Paris Agreement*. 2015. Available at: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf (accessed 22 September 2022).
3. Wilberforce T., Olabi A.G., Sayed E.T., Elsaid K., Maghrabie H.M., Abdelkareem M.A. A review on zero energy buildings – pros and cons. *Energy and Built Environment*, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.06.002> (accessed 22 September 2022).
4. Promoting energy efficiency standards and technologies to enhance energy efficiency in buildings. *ECE Energy Series*, no. 60, Geneva, 2020.
5. Moghaddasi H., Culp C., Vanegas J. Net zero energy communities: integrated power system, building and transport sectors. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 21, art. no. 7065. Available at: <https://doi.org/10.3390/en14217065> (accessed 22 September 2022).
6. Adeli M.M., Farahat S., Sarhaddi F. Optimization of energy consumption in net-zero energy buildings with increasing thermal comfort of occupants. *International Journal of Photoenergy*, 2020, vol. 2020, art. no. 9682428. Available at: <https://doi.org/10.1155/2020/9682428> (accessed 22 September 2022).
7. Bataineh K., Rabee A.A. A cost effective approach to design of energy efficient residential buildings. *Frontiers of Architectural Research*, 2022, vol. 11, no. 2, pp. 297–307. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.10.004> (accessed 22 September 2022).
8. Chen Y., Vinco S., Baek D., Quer S., Macii E., Poncino M. Cost-aware design and simulation of electrical energy systems. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 11, art. no. 2949. Available at: <https://doi.org/10.3390/en13112949> (accessed 22 September 2022).
9. Liu J., Chen X., Yang H., Shan K. Hybrid renewable energy applications in zero-energy buildings and communities integrating battery and hydrogen vehicle storage. *Applied Energy*, 2021, vol. 290, art. no. 116733. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116733> (accessed 22 September 2022).
10. Chang H., Hou Y., Lee I., Liu T., Acharya T.D. Feasibility study and passive design of nearly zero energy building on rural houses in Xi'an, China. *Buildings*, 2022, vol. 12, no. 3, art. no. 341. Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings12030341> (accessed 22 September 2022).
11. Sobhani H., Shahmoradi F., Sajadi B. Optimization of the renewable energy system for nearly zero energy buildings: a future-oriented approach. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 224, art. no. 113370. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113370> (accessed 22 September 2022).

12. Erhorn H., Erhorn-Kluttig H. *Selected examples of Nearly ZeroEnergy Buildings Detailed Report*. 2014. Available at: https://www.epbd-ca.eu/wp-content/uploads/2011/05/CT5_Report_Selected_examples_of_NZEBs-final.pdf (accessed 22 September 2022).
13. D'Agostino D., Tsemekidi Tzeiranaki S., Zangheri P., Bertoldi P. Data on nearly zero energy buildings (NZEBS) projects and best practices in Europe. *Data in Brief*, 2021, vol. 39, art. no. 107641. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107641> (accessed 22 September 2022).
14. Zero net energy case study homes. Vol. 1. *Library of Congress Cataloging-in-Publication*. California, 2021.
15. *Rocket Group company – official website*. Available at: <https://rcktpro.com/> (accessed 22 September 2022).
16. Obukhov S.G., Ibrahim A. Optimization of equipment composition of hybrid energy systems with renewable energy sources. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 64–76. In Rus. DOI: 10.14529/power200206
17. Tekhnicheskaya kolleksiya ot kompanii Schneider Electric: Vypusk no. 11 «Proektirovanie elektroustanovok kvartir s uluchshennoy planirovkoy i kottedzhey» [Technical collection from Schneider Electric: Issue No. 11 «Design of electrical installations of apartments with improved layout and cottages»]. Moscow, TECHCOL1 Publ., 2007. 241 p.
18. SP 31-110-2003. *Proektirovanie i montazh elektroustanovok zhi-lykh i obshchestvennykh zdaniy. Svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu* [Design and installation of electrical installations for residential and public buildings. Design and construction instructions]. Moscow, Gosstroy Rossii Publ., 2004. 55 p.
19. RD 34.20.178. *Rukovodyashchie materialy po proektirovaniyu elektrosnabzheniya selskogo khozyaystva. Metodicheskie ukazaniya po raschetu elektricheskikh nagruzok v setyakh 0,38–110 kV selskokhozyaystvennogo naznacheniya* [Guiding materials 34.20.178 Guidelines for the design of agricultural power supply. Guidelines for the calculation of electrical loads in networks of 0,38–110 kV for agricultural purposes]. Moscow, All-Union State Design and Survey and Research Institute «Senergoeroekt» Publ., 1985. 109 p.
20. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Masolov V.G. Mathematical model of solar radiation based on climatological data from NASA SSE. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 363. II International Conference «Cognitive Robotics», Tomsk, 22–25 November 2017. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/363/1/012021> (accessed 22 September 2022).
21. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Kryuchkova M. Simulation of electrical characteristics of a solar panel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 363. II International Conference «Cognitive Robotics». Tomsk, 22–25 November 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/363/1/012017
22. Federal climate complex data documentation for integrated surface data. *National Climatic Data Center*. Available at: <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/isd-format-document.pdf> (accessed 22 September 2022).
23. Spera D.A., Richards T.R. Modified power law equations for vertical wind profiles. *Proceedings of the Conference and Workshop on Wind Energy Characteristics and Wind Energy Siting*. Portland, Oregon, 19–21 June 1979. Portland, Oregon, Battelle Memorial Institute, Pacific Northwest Laboratory, 1979. pp. 47–58.
24. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Simulation model of operation of autonomous photovoltaic plant under actual operating conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 38–51. In Rus. Available at: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/41318/1/bulletin_tpu-2017-v328-i6-04.pdf (accessed 22 September 2022).
25. Obukhov S.G., Klimova G.N., Ibrahim A. Methodology of optimum unit commitment of energy systems with renewable energy sources. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2020, no. 6, pp. 25–38. In Rus. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.025-038.

Received: 23 October 2022.

Reviewed: 24 November 2022.

Information about the authors

Sergey G. Obukhov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Denis Yu. Davydov, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexey O. Beloglazkin, development director, Rocket Group LLC.