

УДК 620.92

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-67-78

## Анализ стратегий управления гибридным энергокомплексом на базе возобновляемых источников энергии

А.А. Мирошниченко, Е.В. Соломин, Е.М. Гордиевский, А.З. Кулганатов, В.И. Станчаускас

Одна из приоритетных задач российской электроэнергетики — энергоснабжение децентрализованных зон. К ним относят регионы Крайнего Севера и Дальнего Востока, для которых характерны удаленность от единой энергосистемы, низкая плотность населения на огромных территориях, слабые транспортные связи и неразвитая промышленность. Руководствуясь вышеперечисленным, можно сделать выводы, что подключение подобных потребителей к единой энергосистеме экономически невыгодно. Наиболее перспективно — применение возобновляемых источников энергии. Это было отмечено президентом России В.В. Путиным в ходе «Российской энергетической недели»: «Ветроэнергетика, как способ решения проблемы электроснабжения населения, безусловно, перспективна, но правильнее было бы говорить о комплексном использовании альтернативных источников энергии...».

В последнее время идея использования гибридных систем генерации энергии приоритетна при рассмотрении вопроса электрификации изолированных регионов. При выполнении расчетов было доказано, что такие системы являются более надежными и экономически выгодными по сравнению с выработкой энергии только от одного из источников. Применение комбинированных систем генерации энергии обусловлено несколькими факторами, главный из которых — непостоянство того или иного вида возобновляемой энергии, что ведет к проблемам с бесперебойностью электроснабжения. В случае гибридных систем таких ситуаций не возникает. Рассмотрена возможность использования стратегии управления распределением нагрузки для гибридной системы, состоящей из фотоэлектрических панелей, дизельного генератора и аккумуляторных батарей, работающей по заданному графику нагрузки с известными циклами зарядки/разрядки батарей. Программный комплекс HOMER необходим для оптимизационного анализа относительно технико-экономических и экологических факторов предложенных систем с учетом изменения нагрузки, циклов зарядки/разрядки и распределенной нагрузки. Данная программа позволяет выбрать наиболее оптимальную стратегию управления для комбинированных систем электроснабжения, что повышает не только ее надежность, но также увеличивает эффективность и срок службы.

*Ключевые слова:* автономные потребители, гибридные установки, система и стратегия управления, возобновляемые источники энергии.

*Для цитирования:* Мирошниченко А.А., Соломин Е.В., Гордиевский Е.М., Кулганатов А.З., Станчаускас В.И. Анализ стратегий управления гибридным энергокомплексом на базе возобновляемых источников энергии // Вестник МЭИ. 2020. № 5. С. 67—78. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-67-78.

## Analyzing the Strategies for Controlling a Hybrid Energy Complex Based on Renewable Energy Sources

А.А. Miroshnichenko, E.V. Solomin, E.M. Gordievsky, A.Z. Kulganatov, V.I. Stanchauskas

One of the priority objectives faced by the Russian electric power industry is supplying power to decentralized areas. These areas include the regions of the Far North and the Far East, which are characterized by remoteness from the unified energy system, low population density in vast territories, weak transport links, and undeveloped industry. In view of these features, it can be concluded that it is economically unprofitable to connect such consumers to the unified energy system. The use of renewable energy sources is the most promising solution to this problem. This, in particular, was noted by the President of Russia V.V. Putin during the “Russian Energy Week”: ‘Wind power, of course holds promise as a method for solving the problem of supplying electricity to the population, but it would be more correct to talk about the integrated use of alternative energy sources...’

Recently, the idea of using hybrid energy generation systems has become a priority issue in considering the electrification of isolated regions. Calculations have shown that such systems are more reliable and economically profitable in comparison with the generation of energy from only one of the sources. The use of combined energy generation systems is dictated by several factors, the main of which is that individual sources of renewable energy are variable in nature, which entails difficulties in ensuring uninterrupted power supply. Such problems do not arise in the case of using hybrid systems.

The possibility of using a load distribution control strategy for a hybrid system consisting of photovoltaic panels, a diesel generator, and storage batteries, and operating according to a specified load schedule with the known battery charge/discharge cycles is considered. It is pointed out that the HOMER software package is a suitable tool for carrying out an optimization analysis regarding the technical, economic, and environmental factors of the proposed systems, taking into account the load variation pattern, battery charge/discharge cycles and distributed load. By using this software, it is possible to select the most optimal control strategy for combined power supply systems that allows, along with improving their reliability, better efficiency and longer service life to be obtained.

*Key words:* autonomous consumers, hybrid plants, control system, control strategy, renewable energy sources.

*For citation:* Miroshnichenko A.A., Solomin E.V., Gordievsky E.M., Kulganatov A.Z., Stanchauskas V.I. Analyzing the Strategies for Controlling a Hybrid Energy Complex Based on Renewable Energy Sources. Bulletin of MPEI. 2020;5:67—78. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-67-78.

## Введение

Повышение спроса на электрическую энергию и истощение месторождений с ископаемым топливом послужили толчком к обеспокоенности в потреблении энергии в будущем. К тому же утилизация отработанных продуктов горения топлива приводит к загрязнению атмосферы, которое вызывает глобальное потепление. Концентрация углекислого газа в земной атмосфере впервые в истории человечества превысила 415 частей на миллион (ppm), то есть в каждом 1 м<sup>3</sup> воздуха присутствует не менее 415 мл углекислого газа [1]. Эти данные должны подтолкнуть человечество к еще более быстрому переходу на возобновляемые источники энергии с целью снижения загрязнения окружающей среды.

Выработка энергии от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) демонстрирует экспоненциальный рост за последние несколько лет. К концу 2017 г. приблизительно 26,5% в общемировой выработке энергии пришлось на ВИЭ [2]. Нетрадиционная энергетика, включающая использование солнечной, ветровой энергии, энергии потоков рек, геотермальную энергию, энергию биомассы, — неисчерпаема и экологически чиста. Однако главный недостаток ВИЭ заключается в ее непредсказуемости и непостоянстве во времени. С целью повышения надежности работы установок на базе ВИЭ, увеличения суммарной установленной мощности, а также бесперебойности энергообеспечения, такие установки комбинируют в гибридные системы. Различные генерирующие и накапливающие энергию элементы (дизельные генераторы, батареи аккумуляторов, суперконденсаторы и др.) интегрируют в гибридную систему для повышения стабильности выработки и сглаживания пиков нагрузки (при недостаточной выработке от ВИЭ).

Оптимальная конструкция гибридной установки требует определения основных и вспомогательных генерирующих установок, а также подходящей модели управления [3]. Назовем системой управления набор команд, алгоритмов и операций, заложенных в технических средствах управления установкой (контроллер), стратегией управления — порядок определенных действий для работы системы в определенной ситуации и определенный момент времени, т. е. стратегия управления позволяет разработать систему управления, являясь предшествующим шагом.

Выбор подходящей стратегии имеет ключевое значение, поскольку она отвечает за распределение потоков энергии в системе и определяет приоритет каждого компонента. Грамотно подобранная стратегия увеличивает надежность работы системы, формирует минимальную стоимость энергии, защищает компоненты гибридной установки от повреждений из-за возможных перегрузок. Более того, в установках, подключенных к единой сети, она необходима для контроля потоков мощности из сети при недостатке мощности и в

сеть при ее избытке. В зависимости от конфигурации системы и оптимизационных целей стратегии работают на основе различных технических и экономических критериев [4].

Гибридные энергокомплексы, существующие без стратегии управления, представляют собой упрощенные системы, где выработка происходит при непосредственном спросе на энергию потребителем. С другой стороны, установки, имеющие компоненты с системами управления, такие как дизельный генератор или батареи аккумуляторов, более сложны в моделировании, потому что должны выполнять определенные требования для обеспечения надежности, например, в периоды отсутствия генерации мощности от ВИЭ. В таком случае, должен ли генератор на жидком топливе заряжать аккумуляторные батареи, или они должны заряжаться только от избытка солнечной энергии, или генератор необходим в периоды пиковых нагрузок? Этот вопрос позволит ввести определенные «правила» в работе генераторов и аккумуляторов. Их формируют две основные стратегии управления: работа по графику нагрузки и работа по циклам зарядки/разрядки.

Под работой по графику нагрузки понимаем такой режим, в котором генератор вырабатывает только требуемую потребителем энергию и не участвует в зарядке аккумуляторов. Батареи аккумуляторов заряжаются только от ВИЭ. Под работой по циклам зарядки/разрядки скрывается такой режим, в котором генератор работает на максимальной установленной мощности, удовлетворяя потребителя, а излишками заряжая АКБ. В данном случае может быть достигнуто заданное значение уровня заряда АКБ.

При существовании некой «уставки» уровня заряда АКБ система не останавливает процесс зарядки до тех пор, пока не будет достигнуто ее требуемое значение. Подобная стратегия применяется только в тех случаях, когда генератор и батареи аккумуляторов работают параллельно в течение всего времени работы.

Сравнение эффективности двух стратегий управления, а также возможность их совмещенной работы проанализируем в программном комплексе HOMER [5]. Он был разработан Национальной лабораторией возобновляемой энергетики США и признан одним из наиболее мощных инструментов для оптимизации работы гибридных энергокомплексов благодаря проведению технико-экономического анализа системы. В качестве генерирующих установок могут быть использованы различные элементы гибридных систем: фотоэлектрические панели, ветроэнергетические, гидро- и биогазовые установки, АКБ, суперконденсаторы, маховики. Комплекс позволяет смоделировать обе вышеуказанные стратегии для контроля за работой генератора и уровнем заряда АКБ, а также выбрать наиболее экономически выгодный вариант. Программа симулирует тысячи вариантов возможных состояний энергокомплекса и выбирает из них наиболее экономи-

чески выгодный и отвечающий требованиям нагрузки вариант.

В работах [6 — 8] определено оптимальное распределение мощности с учетом различных параметров, таких как цена топлива, эффективность его использования генератором, операционные расходы, степень внедрения ВИЭ, емкость АКБ и установленная мощность генератора. Более того, стратегии управления по графику нагрузки и циклами зарядки/разрядки установлены как простейшие и наиболее эффективные инструменты управления гибридным энергокомплексом, однако с некоторыми недостатками. При использовании генератора для подзарядки АКБ, стратегия управления циклами зарядки/разрядки способствовала получению большего количества энергии для АКБ. Этот подход прекращает работу генератора в период низких нагрузок, что в результате снизило суммарное время эксплуатации генератора. Однако указанный процесс зарядки/разрядки АКБ может привести к повреждению или полному выходу из строя АКБ, что влечет за собой дополнительные расходы на замену оборудования. С другой стороны, когда генератор работает на удовлетворение потребностей нагрузки без зарядки батарей, стратегия работы по графику нагрузки гарантирует, что зарядка АКБ идет от ВИЭ гибридного энергокомплекса. Более того, использование АКБ ограничено, и срок ее службы может быть продлен. Однако главный недостаток стратегии работы по графику нагрузки заключается в том, что большую часть времени генератор работает на часть нагрузки, что ведет к снижению его КПД. В большинстве случаев одна из предложенных стратегий управлений имеет преимущество над другой в определенной ситуации, но предсказать, какая из стратегий является подходящей до запуска модели, невозможно.

Основанные на литературном обзоре доводы о недостаточном полном изучении данного вопроса, в частности, применимы к России. Авторы настоящей работы предлагают более глубоко изучить данный вопрос на основе технико-экономического анализа работающей изолированно от единой сети установки, состоящей из фотоэлектрических панелей, дизельного генератора и аккумуляторных батарей, функционирующей для электроснабжения условного индивидуального дома, находящегося на территории республики Крым. Климат данного региона как раз располагает к использованию солнечной энергии.

Дополнительно рассмотрим комбинированную стратегию управления электроснабжением, включающую стратегии работы по графику нагрузки и циклами зарядки/разрядки. Это позволит более эффективно использовать генератор и АКБ.

### Методология

Успешная оценка любого проекта, связанного с возобновляемой энергетикой, требует применения со-

ответствующих параметров для точного анализа моделирования различных сценариев [9]. Рассмотрим следующие параметры:

- описание местности и график нагрузки потребителя;
- метеорологические данные (солнечную инсоляцию и температуру);
- компоненты гибридного энергокомплекса;
- математическое обоснование.

В качестве объекта электроснабжения возьмем индивидуальный жилой дом (коттедж), не подключенный к центральным электрическим сетям. В коттедже проживает семья из трех человек, специфические электроприемники отсутствуют. Данные по электроприборам, а также по времени их использования отражены в табл. 1 [10].

На основе данных табл. 1 составим график потребления электрической энергии в течение дня (рис. 1). Он имеет усредненную форму и схож со стандартным графиком энергопотребления для жилых помещений [11].

Значения суммарной солнечной инсоляции и температуры окружающей среды представляют собой параметры, значительно влияющие на выходную мощность. Они определяются программой благодаря специализированному сайту NASA [12], который аккумулирует необходимые данные за последние 50 лет.

Среднегодовое значение солнечной радиации для выбранного условного коттеджа (45° с. ш., 34° в. д.) составляет 3,86 кВт/м<sup>2</sup>/день, максимальное — 8 кВт/м<sup>2</sup>/день в июне, а минимальное — 0,11 кВт/м<sup>2</sup>/день в декабре.

Данные о средней температуре окружающей среды играют значительную роль в расчете солнечных панелей. В данном случае точность измерений температуры воздуха окружающей среды крайне необходима. Наибольшее среднемесячное значение температуры окружающей среды наблюдается в июле и составляет 28 °С, наименьшее — в декабре (январе) и равно -4,5 °С.

### Компоненты системы

Пусть гибридная энергоустановка состоит из четырех компонентов: фотоэлектрических панелей, дизельного генератора, преобразователя мощности и аккумуляторных батарей (рис. 2). Технико-экономические параметры выбранных компонентов отражены в табл. 2.

Программа способна самостоятельно подбирать мощность и количество оборудования, входящего в состав гибридной установки. Поскольку в данном случае состав конкретного оборудования неизвестен, примем усредненные параметры элементов энергокомплекса (1 кВт для СБ, ДГ, АКБ и инвертора). Также возможно выбрать существующее оборудование из каталога, а программа предоставит необходимое количество оборудования для бесперебойного электроснабжения потребителя.

Для каждого параметра указаны различные единицы измерения. Это связано с тем, что для расчета требуются данные именно с такими единицами из-

Таблица 1

Данные по электроприборам и времени их использования в индивидуальном жилом доме

| Электроприбор        | Мощность прибора $P_p$ , кВт | Время потребления $T_p$ , ч |             |             |            | Итого, Вт·ч |
|----------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------|-------------|------------|-------------|
|                      |                              | утро (2 ч)                  | день (10 ч) | вечер (4 ч) | ночь (8 ч) |             |
| Телевизор            | 0,20                         | 0,16                        | 0,00        | 2,00        | 0,00       | 0,432       |
| Компьютер            | 0,10                         | 0,50                        | 3,00        | 2,00        | 2,00       | 0,750       |
| Ноутбук (2 шт.)      | 0,20                         | 0,50                        | 3,00        | 2,00        | 1,00       | 1,300       |
| Фен                  | 1,00                         | 0,50                        | 0,00        | 0,50        | 0,00       | 1,000       |
| Плойка               | 0,20                         | 0,33                        | 0,00        | 0,00        | 0,33       | 0,132       |
| Стиральная машина    | 1,50                         | 0,50                        | 0,00        | 0,50        | 0,00       | 1,500       |
| Аудиосистема         | 0,10                         | 0,00                        | 0,00        | 0,16        | 0,00       | 0,016       |
| Посудомоечная машина | 0,50                         | 0,50                        | 0,00        | 0,00        | 0,50       | 0,500       |
| Пылесос              | 2,00                         | 0,00                        | 0,16        | 0,00        | 0,00       | 0,320       |
| Электроплита         | 1,50                         | 0,50                        | 0,50        | 0,50        | 0,50       | 3,000       |
| Микроволновая печь   | 1,80                         | 0,16                        | 0,00        | 0,00        | 0,16       | 0,576       |
| Освещение            | 0,80                         | 0,10                        | 0,00        | 0,00        | 0,26       | 0,288       |
| 1 этаж               | 0,10                         | 1,00                        | 2,00        | 4,00        | 0,50       | 0,750       |
| 2 этаж               | 0,10                         | 1,00                        | 2,00        | 4,00        | 0,50       | 0,750       |
| Гараж                | 0,05                         | 1,00                        | 0,00        | 1,00        | 0,00       | 0,100       |
| Миксер               | 0,20                         | 0,00                        | 0,00        | 0,00        | 0,16       | 0,032       |
| Утюг                 | 1,80                         | 0,00                        | 0,00        | 0,00        | 0,16       | 0,288       |
| Сигнализация         | 0,05                         | 2,00                        | 10,0        | 4,00        | 8,00       | 1,200       |
| Холодильник          | 1,00                         | 1,00                        | 2,00        | 2,00        | 2,00       | 7,000       |
| Другие приборы       | 1,00                         | 1,00                        | 0,00        | 0,00        | 0,00       | 1,000       |
| Итого                | 14,2                         | —                           | —           | —           | —          | 20,934      |

Энергопотребление, кВт·ч

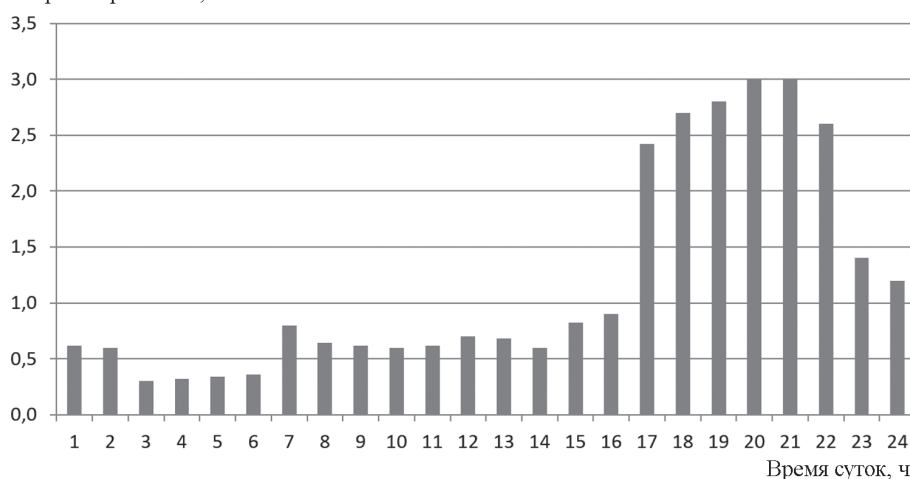


Рис. 1. График электрической нагрузки коттеджа

мерения. Например, суммарные затраты отражены в руб./кВт для солнечных батарей, дизельного генератора и инвертора (предварительные данные взяты из базисных в 1 кВт). Для аккумуляторных батарей цена указана уже за конкретную модель, а программа вычислит требуемое количество АКБ. Единица измерения операционных расходов для солнечных батарей

указана в руб./год, т. к. данная величина практически не зависит от мощности батарей (или генерируемой в течение года энергии). Однако для дизельного генератора параметр измеряется в руб./кВт·ч и показывает, что величина операционных расходов зависит от времени работы генератора и его загрузки (количества вырабатываемых кВт·ч энергии). Срок службы СБ, АКБ

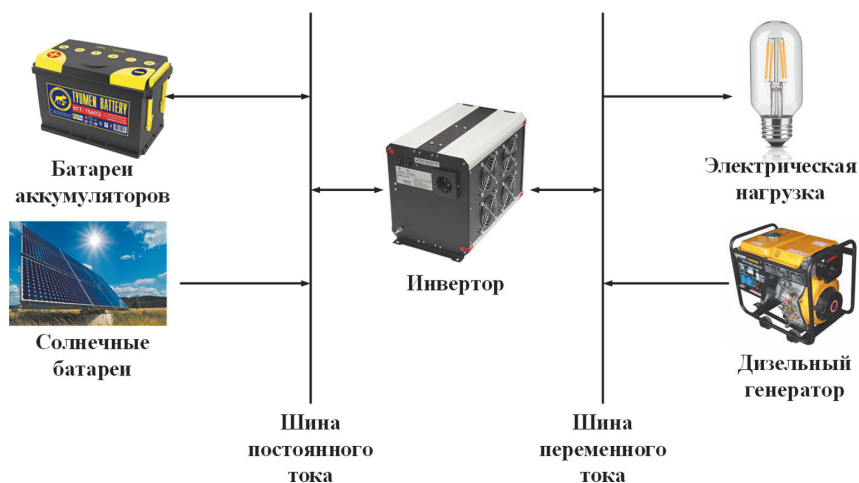


Рис. 2. Схема исследуемого гибридного энергокомплекса

Таблица 2

Элементы и технико-экономические параметры энергокомплекса

| Элемент                     | Параметр                               | Расчетное значение |
|-----------------------------|----------------------------------------|--------------------|
| Солнечные батареи [13]      | Система слежения за солнцем            | Отсутствует        |
|                             | Номинальная рабочая температура ячейки | 47 °С              |
|                             | Температурный коэффициент              | -0,5 %/°С          |
|                             | КПД при стандартных условиях испытаний | 18%                |
|                             | Снижающий коэффициент                  | 0,8                |
|                             | Суммарные затраты                      | 70000 руб./кВт     |
|                             | Операционные расходы                   | 800 руб./год       |
|                             | Стоимость замены                       | 70000 руб./кВт     |
|                             | Срок службы                            | 25 лет             |
| Дизельный генератор [14]    | Суммарные затраты                      | 15000 руб./кВт     |
|                             | Операционные расходы                   | 0,6 руб./кВт/ч     |
|                             | Стоимость замены                       | 15000 руб./кВт     |
|                             | Срок службы                            | 15000 ч            |
| Аккумуляторные батареи [15] | Суммарные затраты                      | 27500 руб          |
|                             | Срок службы                            | 15 лет             |
|                             | Номинальное напряжение                 | 48 В               |
|                             | Минимальный уровень заряда             | 20%                |
| Инвертор [16]               | КПД                                    | 95%                |
|                             | Суммарные затраты                      | 35000 руб./кВт     |
|                             | Срок службы                            | 15 лет             |

и инвертора измерен в годах, а для дизельного генератора в часах, как это заявлено в документации на оборудование (иногда срок службы генератора измеряется в моточасах).

Расчет параметров компонентов системы

Вычислим в программе HOMER выходную мощность солнечных батарей в конкретный момент времени через солнечную инсоляцию региона и температуру окружающей среды:

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left( \frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) \left[ 1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC}) \right],$$

где  $Y_{PV}$  — расчетная мощность солнечных батарей при стандартных условиях, кВт;  $f_{PV}$  — коэффициент энергетической эффективности солнечной батареи;  $G_T$  — полная освещенность, кВт/м<sup>2</sup>;  $G_{T,STC}$  — полная освещенность при стандартных условиях испытаний, 1 кВт/м<sup>2</sup>;  $T_c$  — температура ячейки СБ, °С;  $T_{c,STC}$  — тем-

пература ячейки СБ при стандартных условиях испытаний, 25 °С.

Температуру ячейки СБ рассчитаем по следующему выражению:

$$T_c = \frac{T_a + (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) \left( \frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right) \left[ 1 - \frac{\eta_{mp,STC} (1 - \alpha_p T_{c,STC})}{\tau \alpha} \right]}{1 + (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) \left( \frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right) \left( \frac{\alpha_p T_{c,STC}}{\tau \alpha} \right)},$$

где  $T_a$  — температура окружающей среды, °С;  $T_{c,NOCT}$  — номинальная рабочая температура фотоэлектрического элемента, °С;  $T_{a,NOCT}$  — температура окружающей среды, являющейся номинальной рабочей для фотоэлектрического элемента, 20 °С;  $G_{T,NOCT}$  — полная освещенность, являющаяся номинальной рабочей для фотоэлектрического элемента, 0,8 кВт/м<sup>2</sup>;  $\eta_{mp,STC}$  — максимальный КПД при стандартных условиях испытаний, %;  $\tau$  — коэффициент пропускания солнечной энергии, %;  $\alpha$  — степень поглощения солнечного излучения фотоэлектрического элемента, %.

Учитывая предлагаемое программой уменьшение операционной стоимости компонентов и поиск оптимальной конфигурации системы, следует уделить внимание экономическим расчетам, играющим важнейшую роль в исследовании. Оптимальное сочетание компонентов гибридной установки может быть найдено через чистую текущую стоимость, которая является суммой всех стоимостей и доходов в течение срока эксплуатации установки и рассчитывается следующим образом:

$$NPC = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i, T_p)},$$

где  $C_{ann,tot}$  — общегодовые затраты, руб./год;  $i$  — реальная годовая процентная ставка, %;  $T_p$  — срок реализации проекта, лет;  $CRF$  — рентабельность установки, равная

$$CRF(i, T_p) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1},$$

где  $n$  — номер года реализации проекта.

Утилизационные расходы представляют из себя остаточную стоимость компонентов системы к концу срока реализации проекта

$$SC = C_{RC} \frac{T_{rem}}{T_{com}},$$

где  $C_{RC}$  — цена замены оборудования, руб;  $T_{rem}$  — оставшийся срок службы компонента, лет;  $T_{com}$  — срок эксплуатации компонента, лет.

Определим цену за 1 кВт генерируемой мощности:

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{ann,tot}},$$

где  $E_{ann,tot}$  — суммарная электрическая нагрузка, кВт/год.

### Стратегии управления для работы по графику нагрузки

На рисунке 3 представлена стратегия управления для работы по графику нагрузки. Операции в данной модели могут быть классифицированы в трех случаях.

- генерируемая СБ энергия равна мощности нагрузки (энергия СБ тратится на удовлетворение потребностей нагрузки, АКБ не заряжаются, генератор отключен, т. е. нет дефицита мощности);
- выходная мощность СБ выше мощности нагрузки (СБ работают на удовлетворение потребностей нагрузки, а непотребленная энергия накапливается в АКБ, если АКБ заряжены полностью, то избытки энергии демпфируются (например, на балластной нагрузке), генератор также не используется);
- генерируемая СБ энергия ниже требуемой нагрузки, тогда возможны два варианта:

— уровень заряда АКБ минимален, генератор работает на потребности нагрузки (совместно с СБ), генератор вырабатывает энергию только для покрытия нагрузки, подзарядка АКБ не осуществляется, если же минимальная генерируемая энергия от генератора выше требуемой нагрузкой энергии, тогда генератор работает на потребности нагрузки, а излишки энергии заряжают АКБ;

— уровень заряда АКБ больше минимального уровня, стоимости энергий, полученных от АКБ и генератора сравниваются, если стоимость энергии от АКБ выше, тогда батареи не будут разряжаться, пока генератор работает и удовлетворяет потребности нагрузки, подзарядка АКБ не осуществляется, в противном случае энергия потребляется от АКБ.

Найдем стоимость энергии от разряда АКБ:

$$C_{disch} = C_{bat,wear}$$

где  $C_{bat,wear}$  — стоимость цикла зарядки АКБ, руб./кВт,

$$C_{bat,wear} = \frac{C_{bat,rep}}{N_{bat} Q_{life} \sqrt{\eta_{rt}}},$$

где  $C_{bat,rep}$  — стоимость ремонта АКБ, руб;  $N_{bat}$  — число модулей в АКБ;  $Q_{life}$  — выходная мощность одного модуля, кВт;  $\eta_{rt}$  — КПД АКБ, %.

Стоимость выработки от генератора в случае, если генератор работает только на потребности нагрузки, получим из следующего выражения:

$$C_{gen} = \frac{F_{con} F_{price}}{L_{served} G_{output}} + \frac{C_{gen,rep}}{L_{served} G_{lifetime}} + \frac{C_{gen,O\&M}}{L_{served}},$$

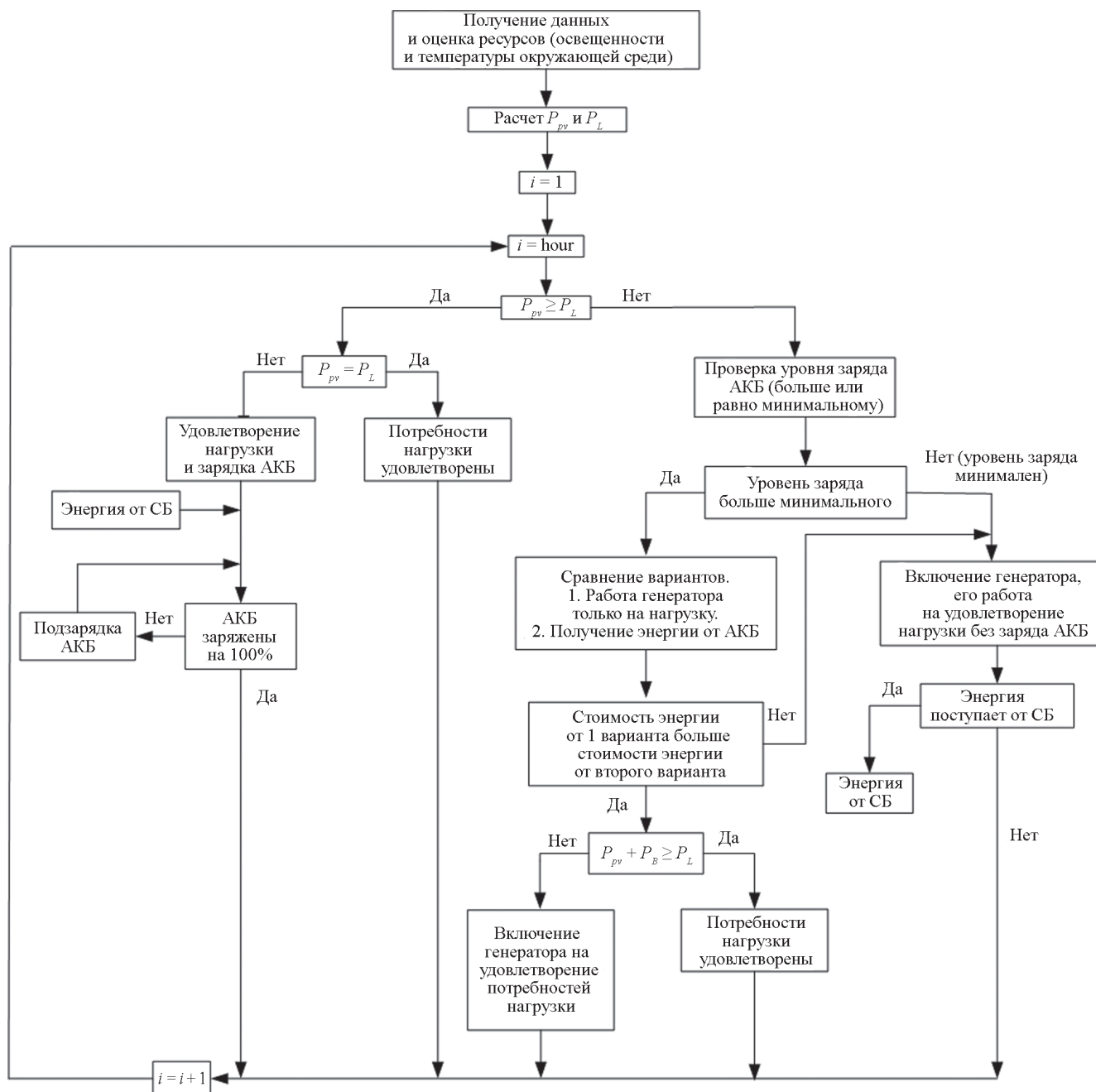


Рис. 3. Алгоритм работы по стратегии работы по графику нагрузки

**Стратегия управления для работы по циклам зарядки/разрядки**

Графическая схема данной стратегии управления дана на рис. 4. Операции в ней идентичны предыдущей стратегии, отличие лишь в том, что генератор постоянно работает на максимальной мощности, удовлетворяя потребности нагрузки, излишками энергии заряжая АКБ.

Стоимость энергии от разряда АКБ выглядит как:

$$C_{disch} = C_{bat,wear} + C_{bat,energy}$$

где  $C_{bat,energy}$  — стоимость электроэнергии от АКБ, рассчитываемая для каждого момента времени  $n$ ,

$$C_{bat,energy} = \sum_{i=1}^{n-1} C_{cc,i} / \sum_{i=1}^{n-1} E_{cc,i}$$

где  $C_{cc,i}$  — стоимость цикла зарядки АКБ в момент времени  $i$ , руб.;  $E_{cc,i}$  — количество энергии, полученной от АКБ в момент времени  $i$ , кВт.

Стоимость получения энергии от генератора при его работе на максимальной мощности для удовлетворения потребностей нагрузки и зарядки АКБ вычислена по следующему выражению:

$$C_{gen,ch} = C_{gen} + C_{cc} - C_{batt,energy}$$

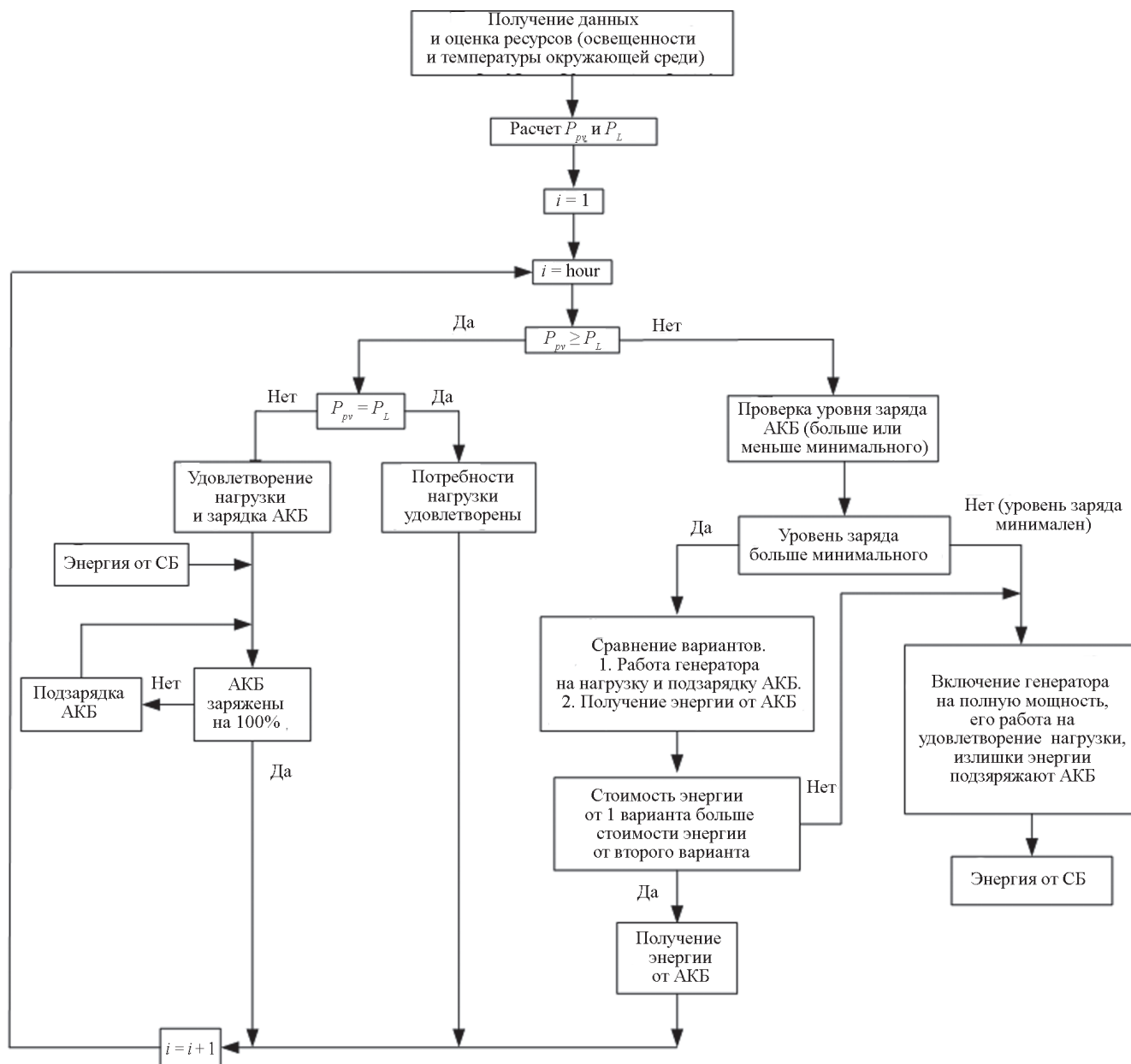


Рис. 4. Алгоритм работы по стратегии работы по циклам зарядки/разрядки

где  $C_{cc}$  — стоимость цикла зарядки АКБ в конкретный момент времени,

$$C_{cc} = C_{gen,marg} + C_{bat,wear}$$

где  $C_{gen,marg}$  — предельная издержка в работе генератора, равная

$$C_{gen,marg} = \frac{F_{slope} F_{price}}{\eta_{rt}}$$

где  $F_{slope}$  — тангенс наклона кривой потребления топлива, л/кВт.

#### Комбинированная стратегия управления

Предсказать величину дальнейшей потребности нагрузки достаточно трудно, необходимо использовать

значение текущей нагрузки и аппроксимировать его на ближайший период с целью определения, будет ли осуществляться подзарядка АКБ от генератора. Комбинированная стратегия позволяет использовать стратегию работы по графику нагрузки во время максимумов нагрузки, а стратегию циклов зарядки/разрядки АКБ в период низких нагрузок. В период низких нагрузок, согласно второй стратегии, сводится к минимуму использование генератора. С другой стороны, стратегия работы по графику нагрузки гарантирует использование генератора в период высоких нагрузок. Гибкость комбинированной стратегии основана на работе при высоких и низких нагрузках и дает широкое представление о работе в реальных условиях по сравнению с использованием только одной из стратегий.



Алгоритм комбинированной стратегии представлен на рис. 5. Согласно данной схеме возможны три варианта работы системы. В каждый период времени комбинированная стратегия просчитывает каждый из представленных вариантов и выбирает наиболее экономичный из них. Стоимость работы по этому варианту включает в себя затраты на текущий момент времени и ожидаемую величину любого изменения накопленной энергии батареи. Решение принимается в соответствии с наиболее разумным выбором между предельными затратами на эксплуатацию генератора и степенью износа батареи.

Возможны три варианта работы по комбинированной стратегии управления. В первом случае генератор

работает только на удовлетворение потребностей нагрузки без подзарядки АКБ. Во втором генератор работает на удовлетворение нагрузки, а излишки энергии запасаются в АКБ, а в третьем нагрузка удовлетворяется исключительно от АКБ.

Системные операции в данной модели могут быть следующими:

- если мощность СБ равна или выше потребностей нагрузки, то мощности распределятся также, как и в одиночных стратегиях;
- если мощность СБ меньше потребностей нагрузки, возможны два варианта:
  - при минимальном уровне заряда АКБ контроллер сравнивает стоимость работы от генератора без

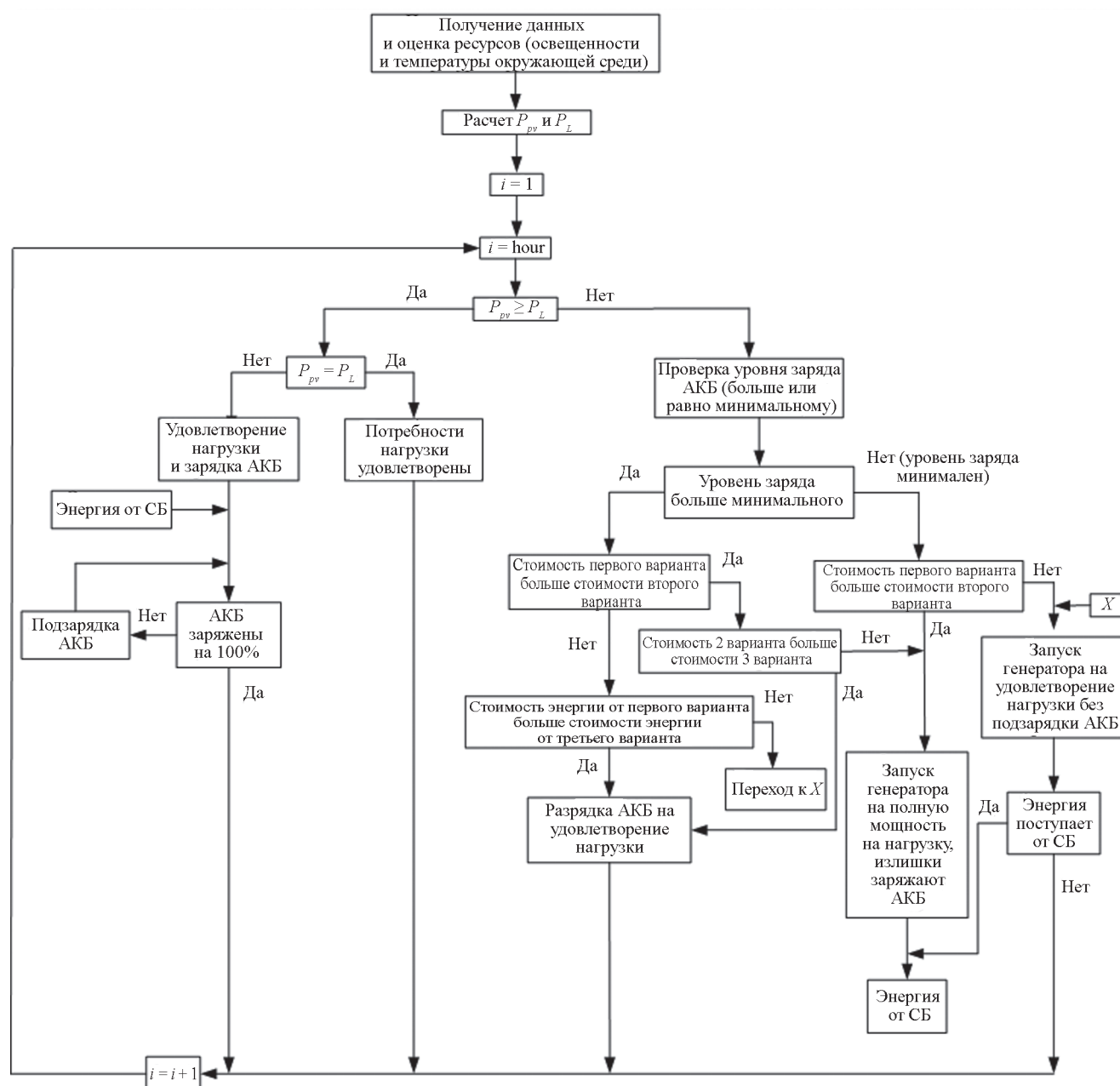


Рис. 5. Алгоритм работы по комбинированной стратегии

подзарядки АКБ с режимом работы, когда генератор работает на полную мощность, и излишки энергии подзаряжают АКБ при удовлетворении потребностей нагрузки. Положительное решение будет принято для режима с наименьшей стоимостью;

— при уровне заряда АКБ выше минимального три варианта работы сравниваются между собой: стоимость работы генератора на потребности нагрузки без подзарядки АКБ, цена работы генератора на минимальной мощности с переводом излишек на подзарядку АКБ и вариант, при котором энергия генерируется только от АКБ. Из них выбирается наиболее экономически выгодный.

### Результаты моделирования и их обсуждение

Выполнено моделирование трех стратегий управления. Проверка технической реализуемости проекта проведена для определения возможности бесперебойного обеспечения потребителя энергией в течение всего года. В расчетах учитывали экономическую устойчивость и воздействие на окружающую среду. Расчеты проведены при годовой ставке дисконтирования в 8% и сроке реализации проекта в 25 лет, а также при условии того, что потребитель должен постоянно быть обеспечен энергией, а минимальный уровень заряда АКБ не должен опуститься ниже 20% от номинальной емкости.

Сравнение полученных результатов работы энергокомплекса при работе под различными стратегиями управления представлено в табл. 3.

Итоги моделирования показали, что оптимальный состав энергокомплекса наблюдается при комбинированной стратегии и состоит из солнечных панелей, мощностью 2,07 кВт, дизельного генератора мощностью 7,3 кВт, шести АКБ мощностью 1 кВт и инвертора мощностью 1,3 кВт. Затраты на реализацию проекта составили 1480000 руб. Средняя стоимость 1 квт·ч энергии — 24,95 руб.

В стратегии управления при работе по графику нагрузки использование энергии от ВИЭ составило 37,3% от общей генерации. Наименьшее время работы генератора зафиксировано при работе по циклам зарядки/разрядки, равно 1100 ч/год и обеспечивает наименьшее потребление топлива.

Емкость аккумуляторных батарей — один из основных параметров энергокомплекса, потому что он характеризует надежность системы. Пропускная способность АКБ (кВт·ч/год/1 АКБ) представляет собой меру определения количества энергии, которая проходит через АКБ в течение года. Пропускная способность АКБ определяет срок службы, т.е. чем ниже пропускная способность, тем ниже ее износ и тем выше срок службы. В данном случае комбинированная способность показала наименьшую пропускную способность, что является наилучшим показателем.

Время разрядки батарей (автономность их работы) дает количество часов, которое способна проработать АКБ без подзарядки. Этот параметр особенно важен в сезон дождей, когда выработка от СБ не покрывает потребностей нагрузки. Наилучший показатель по-

Таблица 3

### Результаты моделирования

| Параметр                                    | Стратегии работы    |                            |                 |
|---------------------------------------------|---------------------|----------------------------|-----------------|
|                                             | по графику нагрузки | по циклам зарядки/разрядки | комбинированная |
| Солнечные батареи, кВт                      | 2,52                | 1,49                       | 2,07            |
| Аккумуляторная батарея, шт.                 | 8                   | 6                          | 6               |
| Дизельный генератор, кВт                    | 7,3                 | 7,3                        | 7,3             |
| Инвертор, кВт                               | 1,28                | 1,28                       | 1,3             |
| Затраты на реализацию проекта, руб.         | 1540000             | 1410000                    | 1480000         |
| Стоимость энергии, руб./кВт                 | 25,92               | 23,87                      | 24,95           |
| Доля возобновляемой энергетики, %           | 37,3                | 21,1                       | 27              |
| Выработка от СБ, кВт·ч/год                  | 3028                | 1791                       | 2493            |
| Выработка от ДГ, кВт·ч/год                  | 2875                | 3619                       | 3345            |
| Излишки энергии, %                          | 16,6                | 9,7                        | 17              |
| Суммарная выработка, кВт·ч/год              | 5903                | 5410                       | 5838            |
| Время работы генератора, ч/год              | 1368                | 1100                       | 1314            |
| Потребление дизельного топлива, л/год       | 1250                | 1333                       | 1347            |
| Пропускная способность АКБ, кВт·ч/год/1 АКБ | 1712                | 1278                       | 1205            |
| Номинальная емкость батарей, кВт·ч          | 8                   | 6                          | 6               |
| Время разрядки АКБ, ч                       | 12,2                | 9,17                       | 9,17            |

лучен для первой стратегии — 12,2 ч. (использовано 8 батарей вместо 6).

Наименьшие затраты на реализацию проекта составили 1410000 руб. при работе по стратегии циклов зарядки/разрядки. Это вызвано использованием СБ наименьшей мощности. Средний вариант наблюдался при комбинированной стратегии.

Стоимость 1 кВт·ч энергии различается незначительно и зависит от многих параметров. Разница между минимальным, средним и максимальным показателями составила всего 1 руб. за 1 кВт·ч энергии.

### Литература

1. **Концентрация** углекислого газа в атмосфере Земли достигла исторического максимума [Электрон. ресурс] [www.tass.ru/obschestvo/6423526](http://www.tass.ru/obschestvo/6423526) (дата обращения 18.02.2020).
2. **Renewables Now** [Электрон. ресурс] [www.ren21.net](http://www.ren21.net) (дата обращения 18.02.2020).
3. **Гордиевский Е.М., Мирошниченко А.А., Кулганатов А.З., Ишмаматьева А.В.** Моделирование мобильного гибридного энергокомплекса на основе возобновляемых источников энергии с помощью Matlab/Simulink // *Colloquium-journal*. 2019. № 9-1 (33). С. 63—67.
4. **Мирошниченко А.А. и др.** Сравнительный анализ систем управления гибридными энергокомплексами на базе ВИЭ в программе HOMER // *Colloquium-journal*. 2019. № 25-2 (49). С. 65—69.
5. **Efficient**, Informed Decisions about Distributed Generation and Distributed Energy Resources [Электрон. ресурс] [www.homerenergy.com](http://www.homerenergy.com) (дата обращения 18.02.2020).
6. **Rajbongshi R., Borgohain D., Mahapatra S.** Optimization of PV-biomass-diesel and Grid Base Hybrid Energy Systems for Rural Electrification by using HOMER // *Energy*. 2017. V. 126. Pp. 461—474.
7. **Singh A., Baredar P., Gupta B.** Techno-economic Feasibility Analysis of Hydrogen Fuel Cell and Solar Photovoltaic Hybrid Renewable Energy System for Academic Research Building // *Energy Convers. Manag.* 2017. V. 145. Pp. 398—414.
8. **Lombardi P. e. a.** Isolated Power System in Russia: a Chance for Renewable Energies // *Renewable Energy*. 2016. V. 90. Pp. 532—541.
9. **Бобыль А.В. и др.** Анализ применимости коммерческих программ в задачах технико-экономического моделирования солнечных энергоустановок // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2019. № 2 (99). С. 32—50.
10. **Кирпичникова И.М.** Расчет и выбор гелио- и ветроэнергетической установки для горячего водоснабжения объектов Челябинской области. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2013.
11. **Кирпичникова И.М., Соломин Е.В.** Возобновляемые источники энергии. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2009.

### Заключение

Оптимизация энергоресурсов представляет собой оценку реализуемости гибридного энергокомплекса [17]. Для выбранного региона рассчитаны ключевые показатели в работе системы. Полученные в работе численные значения могут отличаться от реальных ввиду значительного разнообразия цен на оборудование, входящее в состав энергокомплекса. Показаны основные принципы стратегий управления, которые возможно переориентировать для различных компоновок гибридной системы, стоимости оборудования и региона.

### References

1. **Kontsentratsiya** Uglekislogo Gaza v Atmosfere Zemli Dostigla Istoricheskogo Maksimuma [Elektron. Resurs] [www.tass.ru/obschestvo/6423526](http://www.tass.ru/obschestvo/6423526) (Data Obrashcheniya 18.02.2020). (in Russian).
2. **Renewables Now** [Elektron. Resurs] [www.ren21.net](http://www.ren21.net) (Data Obrashcheniya 18.02.2020).
3. **Gordievskiy E.M., Miroshnichenko A.A., Kulganatov A.Z., Ishmamet'eva A.V.** Modelirovanie Mobil'nogo Gibridnogo Energokompleksa na Osnove Vozobnovlyаемых Istochnikov Energii s Pomoshch'yu Matlab/Simulink. *Colloquium-journal*. 2019;9-1 (33):63—67. (in Russian).
4. **Miroshnichenko A.A. i dr.** Sravnitel'nyy Analiz Sistem Upravleniya Gibridnymi Energokompleksami na Baze VIE v Programme HOMER. *Colloquium-journal*. 2019;25-2 (49):65—69. (in Russian).
5. **Efficient**, Informed Decisions about Distributed Generation and Distributed Energy Resources [Elektron. Resurs] [www.homerenergy.com](http://www.homerenergy.com) (Data Obrashcheniya 18.02.2020).
6. **Rajbongshi R., Borgohain D., Mahapatra S.** Optimization of PV-biomass-diesel and Grid Base Hybrid Energy Systems for Rural Electrification by using HOMER. *Energy*. 2017;126:461—474.
7. **Singh A., Baredar P., Gupta B.** Techno-economic Feasibility Analysis of Hydrogen Fuel Cell and Solar Photovoltaic Hybrid Renewable Energy System for Academic Research Building. *Energy Convers. Manag.* 2017;145:398—414.
8. **Lombardi P. e. a.** Isolated Power System in Russia: a Chance for Renewable Energies. *Renewable Energy*. 2016;90:532—541.
9. **Bobyly' A.V. i dr.** Analiz Primenimosti Kommercheskikh Programm v Zadachakh Tekhniko-ekonomicheskogo Modelirovaniya Solnechnykh Energoustanovok. *Tekhnologii i Tekhnicheskie Sredstva Mekhanizirovannogo Proizvodstva Produktsii Rastenievodstva i Zhivotnovodstva*. 2019;2 (99):32—50. (in Russian).
10. **Kirpichnikova I.M.** Raschet i Vybor Gelio- i Vetroenergeticheskoy Ustanovki dlya Goryachego Vodосnabzheniya Ob'ektov Chelyabinskoy Oblasti. *Chelyabinsk: Izdat. Tsentr YUUrGU*, 2013. (in Russian).
11. **Kirpichnikova I.M., Solomin E.V.** Vozobnovlyаемые Istochniki Energii. *Chelyabinsk: Izdat. Tsentr YUUrGU*, 2009. (in Russian).

12. **Space Weather Prediction Center** [Электрон. ресурс] [www.swpc.noaa.gov](http://www.swpc.noaa.gov) (дата обращения 18.02.2020).

13. **Garni H.Z.A., Awasthi A., Ramli M.A.** Optimal Design and Analysis of Grid-connected Photovoltaic Under Different Tracking Systems Using HOMER // *Energy Convers. Manag.* 2018. V. 155. Pp. 42—57.

14. **Halabi L.M., Mekhilef S., Olatomiwa L., Hazelton J.** Performance Analysis of Hybrid PV/diesel/battery System Using HOMER: a Case Study Sabah, Malaysi // *Energy Convers. Manag.* 2017. V. 144. Pp. 322—339.

15. **Bimble Solar** [Электрон. ресурс] [www.bimblesolar.com/batteries/lithium-batteries/48v-lithium](http://www.bimblesolar.com/batteries/lithium-batteries/48v-lithium) (дата обращения 18.02.2020).

16. **Aziz A.S., Tajuddin M.F.N., Adzman M.R.** Feasibility Analysis of PV/wind/battery Hybrid Power Generation: a Case Study // *Int. J. Renew. Energy Res.* 2018. V. 8. Pp. 661—671.

17. **Гордиевский Е.М. и др.** Разработка имитационной модели мобильного энергокомплекса на базе ВИЭ в программе Matlab // *Вестник ПНИПУ. Серия «Электротехника, информационные технологии, системы управления».* 2019. № 31. С. 51—71.

12. **Space Weather Prediction Center** [Elektron. Resurs] [www.swpc.noaa.gov](http://www.swpc.noaa.gov) (Data Obrashcheniya 18.02.2020).

13. **Garni H.Z.A., Awasthi A., Ramli M.A.** Optimal Design and Analysis of Grid-connected Photovoltaic Under Different Tracking Systems Using HOMER. *Energy Convers. Manag.* 2018;155:42—57.

14. **Halabi L.M., Mekhilef S., Olatomiwa L., Hazelton J.** Performance Analysis of Hybrid PV/diesel/battery System Using HOMER: a Case Study Sabah, Malaysi. *Energy Convers. Manag.* 2017;144:322—339.

15. **Bimble Solar** [Elektron. Resurs] [www.bimblesolar.com/batteries/lithium-batteries/48v-lithium](http://www.bimblesolar.com/batteries/lithium-batteries/48v-lithium) (Data Obrashcheniya 18.02.2020).

16. **Aziz A.S., Tajuddin M.F.N., Adzman M.R.** Feasibility Analysis of PV/wind/battery Hybrid Power Generation: a Case Study. *Int. J. Renew. Energy Res.* 2018;8:661—671.

17. **Gordievskiy E.M. i dr.** Razrabotka Imitatsionnoy Modeli Mobil'nogo Energokompleksa na baze VIE v Programme Matlab. *Vestnik PNIPU. Seriya «Elektrotehnika, Informatsionnye Tekhnologii, Sistemy Upravleniya».* 2019;31:51—71. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Мирошниченко Алексей Александрович** — аспирант кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения Южно-Уральского государственного университета, e-mail: alex.miroshnichenko@mail.ru

**Соломин Евгений Викторович** — доктор технических наук, профессор кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения Южно-Уральского государственного университета, e-mail: nii-uralmet@mail.ru

**Гордиевский Евгений Михайлович** — магистрант кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения Южно-Уральского государственного университета, e-mail: gordievskiy@gmail.com

**Кулганатов Аскар Зайдакбаевич** — магистрант кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения Южно-Уральского государственного университета, e-mail: kulganatov97@gmail.com

**Станчаускас Виталий Иванович** — студент кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения Южно-Уральского государственного университета, e-mail: mr.stanchauskas@mail.ru

#### Information about authors:

**Miroshnichenko Aleksey A.** — Ph.D.-student of Power Stations, Networks and Power Supply Systems Dept., South Ural State University, e-mail: alex.miroshnichenko@mail.ru

**Solomin Evgeniy V.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Power Stations, Networks and Power Supply Systems Dept., South Ural State University, e-mail: nii-uralmet@mail.ru

**Gordievsky Evgeniy M.** — Master Student of Power Stations, Networks and Power Supply Systems Dept., South Ural State University, e-mail: gordievskiy@gmail.com

**Kulganatov Askar Z.** — Master Student of Power Stations, Networks and Power Supply Systems Dept., South Ural State University, e-mail: kulganatov97@gmail.com

**Stanchauskas Vitaliy I.** — Student of Power Stations, Networks and Power Supply Systems Dept., South Ural State University, e-mail: mr.stanchauskas@mail.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 16.01.2020

**The article received to the editor:** 16.01.2020