Бердоносов В. Д., Недиков И. О., Шамак В. А., Светлаков А. А.
V. D. Berdonosov, I. O. Nedikov, V. A. Shamak, A. A. Svetlakov

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА РОЯ ПЧЁЛ

SOFTWARE FOR PRELIMINARY PARAMETRIC OPTIMIZATION OF HYBRID POWER SYSTEMS BASED ON THE BEE SWARD ALGORITHM

Бердоносов Виктор Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: berd1946@gmail.com.
Victor D. Berdonosov – PhD in Engineering, Associate Professor, Applied Mathematics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: berd1946@gmail.com.

Недиков Илья Олегович – студент Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: ilyandkv@gmail.com.
Ilya O. Nedikov – Student, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (Russia, Saint Petersburg). E-mail: ilyandkv@gmail.com.

Шамак Виктория Александрова – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: shamak.va@mail.ru.
Victoria A. Shamak – a Post-graduate, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: shamak.va@mail.ru.

Светлаков Анатолий Антонович – доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Россия, Томск). E-mail: office@kcup.tusur.ru.
Anatolii A. Svetlakov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer Systems in Control and Design, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Russia, Tomsk). E-mail: office@kcup.tusur.ru.

Аннотация. В статье представлена методика предварительной параметрической оптимизации автономной гибридной энергетической системы, состоящей из четырёх этапов. Также приведено описание программного обеспечения для выполнения представленной методики. Программный комплекс состоит из следующих компонентов: пользовательского интерфейса, географического информационного модуля, вычислительного и оптимизационного модулей. Для хранения параметров оборудования, а также информации о поселениях используется база данных, которая взаимодействует с программой.

Summary. The article presents a methodology for preliminary parametric optimization of an autonomous hybrid energy system, consisting of four stages. The description of the software for performing the presented methodology is also given. The software package consists of the following components: user interface, geographic information module, computational and optimization modules. To store the parameters of the equipment, as well as information about the settlements, a database is used that interacts with the program.

Ключевые слова: солнечная энергия, ветровая энергия, автономные гибридные электростанции, накопители, математическая модель, оптимизация, программный комплекс.

Key words: solar energy, wind energy, autonomous hybrid power plants, storage devices, mathematical model, optimization, software package.

УДК 004.9

Введение

Почти каждый месяц появляется информация о новых достижениях в области систем, использующих солнечную и/или ветровую энергии [1; 2]. Тем не менее гибридная энергетика развивается умеренными темпами. С одной стороны, многие страны, например Германия, Испания, Италия, Австралия, год от года увеличивают объём энергии, получаемой от возобновляемых источников [3]. С другой стороны, стоимость единицы энергии от возобновляемых источников продолжает оставаться выше, чем аналогичная стоимость от традиционных источников [4; 5]. По этой причине гибридная энергетика, как правило, дотационная. В России с её огромными территориями, не охваченными централизованным электроснабжением, ситуация несколько иная. Так как стоимость единицы энергии в автономных посёлках, не связанных общероссийской энергосистемой, в несколько раз превышает стоимость в поселениях, включённых в общую энергосистему, то использование в плане экономики выглядит более предпочтительно. Для оценки целесообразности использования гибридной энергетики в автономных поселениях первоначально следует провести предварительные расчёты потребности и стоимости основных компонентов системы автономных гибридных электростанций (АГЭС). Кроме того, необходимо определиться с зависимостью этих параметров от динамики потоков солнечной и ветровой энергий, а также от характера изменения потока потребления в течение нескольких лет. В работе в качестве примера рассматривается методика и результаты данного подхода применительно к автономным поселениям Хабаровского края.

Постановка задачи предварительной параметрической оптимизации АГЭС

Для предварительной оптимизации рассматривается следующее оборудование, формирующее АГЭС: солнечные и ветрогенераторы, а также накопители энергии. Обслуживающее оборудование (преобразователи, кабели, коннекторы и т. д.) в предварительную оптимизацию не включаются из-за их относительно небольшого процента участия в стоимости, который может быть учтён соответствующим коэффициентом. Для предварительного расчёта варьировалось количество солнечных и ветрогенераторов, а также количество накопителей. Всё оборудование, включённое в расчёт, выпускается промышленно и доступно для приобретения в России. Кроме количественных и качественных характеристик оборудования использовалась информация о поступающих потоках энергии солнца и ветра, входных-выходных потоках накопителей, а также информация о потоке потребления. Во многих работах [6; 7; 8] для расчётов используются среднегодовые значения этих потоков, что вносит значительные погрешности в эти расчёты, понижая их достоверность. Погрешность в первую очередь связана с существенной динамикой этих потоков. В общем виде динамика может быть: погодовой, помесячной, подневной, почасовой, поминутной и т. д. Очевидно, чем более «мелкая» динамика используется, тем ближе к реальности полученные результаты. Однако использование «мелкой» динамики повышает как трудоёмкость получения исходных данных, так и сложность расчётов. Так, если для получения погодовых потоков достаточно получить информацию на сайте ГИС ВИЭ [9], то для подневных потоков уже потребуется информация с сайтов, размещающих дневники [10], с последующей нормализацией. Если при построении трёхгодичного погодового графика достаточно провести расчёты для трёх точек, то для почасового графика понадобятся расчёты уже для 26 280 точек, и это только без оптимизации. По этой причине актуальна задача оценки предпочтительной дискретизации динамики. Ясно, что погодовая и помесячная дискретизации недостаточны хотя бы по той причине, что в этих случаях нет возможности учесть роль накопителей [11; 12]. Таким образом, стоит задача выбрать и обосновать этот выбор между подневной и почасовой дискретизацией.

Методика предварительной параметрической оптимизации АГЭС

Методика включает четыре основных этапа:

1. Задание начального качественного и количественного состава оборудования АГЭС и степени дискретизации.
2. Расчёт энергетических балансов по заданным параметрам.
3. Расчёт, накопление и анализ стоимости оборудования для количественного состава оборудования.

4. Вариация количественного состава по результатам анализа в предыдущем пункте и переход, в случае необходимости, к расчёту энергетических балансов.

Этап 1 – задание начального качественного и количественного состава оборудования АГЭС и степени дискретизации – производится на основе имеющегося опыта.

Этап 2 – расчёт энергетических балансов по заданным параметрам – производится в соответствии с нижеприведёнными выражениями.

Погодовой энергетический баланс определяется в соответствии с выражением

$$Sun_Out^{Year}(vill,N_{sun},Mod_{sun}) + Wind_Out_{Year}(vill,N_{wind},Mod_{wind}) > Load^{Year}(vill),$$

где $Sun_Out^{Year}(vill,N_{sun},Mod_{sun})$ – суммарная за год величина энергии на выходе N_{sun} солнечных модулей (панелей) типа Mod_{sun}, равная

$$Sun_Out^{Year}(vill,N_{sun},Mod_{sun}) = Sun_In^{Year}(vill)\cdot S(Mod_{sun})\cdot Mod_eff(Mod_{sun})\cdot N_{sun}(Mod_{sun}),$$

здесь $Sun_In^{Year}(vill)$ – солнечная радиация за год, усреднённая по площади (кВт·ч/м^2·год) для конкретного посёлка (vill);
$S(Mod_{sun})$, $Mod_eff(Mod_{sun})$, $N_{sun}(Mod_{sun})$ – соответственно площадь, эффективность и количество солнечных панелей, используемых в АГЭС;
$Wind_Out^{Year}(vill,N_{wind},Mod_{wind})$ – суммарная за год величина энергии на выходе N_{wind} ветрогенераторов типа Mod_{wind}, равная

$$Wind_Out^{Year}(vill,N_{wind},Mod_{wind}) = Wind_In(vill) \cdot N(Mod_{wind}) \cdot S(Mod_{wind}) \cdot Mod_eff(Mod_{wind}) \cdot N_hour^{Year},$$

здесь $Wind_In(vill)$ – среднегодовая плотность мощности ветрового потока (на высоте 30 метров) (кВт/м^2);
$S(Mod_{wind})$, $Mod_eff(Mod_{wind})$, $N(Mod_{wind})$ – соответственно площадь относительно потока ветра, эффективность и количество ветрогенераторов, используемых в АГЭС;
N_hour^{Year} – число часов в году;
$Load^{Year}(vill)$ – энергопотребление за год конкретным посёлком (vill).

Помесячный годовой энергетический баланс определяется в соответствии с выражением

$$\forall i \in I,\ Batt^{Month}(vill,N_{batt},Mod_{batt})_i > Load^{Month}(vill)_i,$$

где i – номер месяца в периоде исследования;
I – массив номеров месяцев, не менее двенадцати и, как правило, не больше тридцати шести;
$Batt^{Month}(vill,N_{batt},Mod_{batt})_i$ – суммарная, за i-й месяц, величина энергии, накопленной в аккумуляторах, равная

$$Batt^{Month}(vill,N_{batt},Mod_{batt})_i = Batt^{Month}(vill,N_{batt},Mod_{batt})_{i-1} + Sun_Out^{Month}(vill,N_{sun},Mod_{sun})_i + \\ + Wind_Out^{Month}(vill,N_{wind},Mod_{wind})_i - Load^{Month}(vill)_i,$$

здесь $Sun_Out^{Month}(vill,N_{sun},Mod_{sun})_i$ – суммарная за i-й месяц величина энергии на выходе N_{sun} солнечных модулей (панелей) типа Mod_{sun}, равная

$$Sun_Out^{Month}(vill,N_{sun},Mod_{sun})_i = Sun_In^{Month}(vill)_i \cdot S(Mod_{sun}) \cdot Mod_eff(Mod_{sun})\cdot N_{sun}(Mod_{sun}),$$

здесь $Sun_In^{Month}(vill)_i$ – солнечная радиация за i-й месяц, усреднённая по площади (кВт·ч/м^2·месяц) для конкретного посёлка (vill);
$Wind_Out^{Month}(vill,N_{wind},Mod_{wind})_i$ – суммарная за i-й месяц величина энергии на выходе N_{wind} ветрогенераторов типа Mod_{wind}, равная

$$Wind_Out^{Month}(vill,N_{wind},Mod_{wind})_i = Wind_In(vill)_i \cdot N(Mod_{wind}) \cdot S(Mod_{wind}) \cdot Mod_eff(Mod_{wind}) \times \\ \times N_hour^{Month}{}_i,$$

здесь $Wind_In(vill)_i$ – среднемесячная для i-го месяца плотность мощности ветрового потока (на высоте 30 метров) (кВт/м^2);
$N_hour^{Month}{}_i$ – число часов в i-м месяце;
$Load^{Month}(vill)_i$ – среднемесячное для i-го месяца энергопотребление конкретным посёлком (vill).

Подневной годовой энергетический баланс определяется в соответствии с выражением

$$\forall j \in J,\ \mathrm{Batt}^{\mathrm{Day}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{batt}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{batt}})_{\mathrm{j}} > \mathrm{Load}^{\mathrm{Day}}(\mathrm{vill})_{\mathrm{j}},$$

где j – номер дня за период исследования;
J – массив номеров дней, не менее 365 дней и, как правило, не больше 1065;
$\mathrm{Batt}^{\mathrm{Day}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{batt}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{batt}})_{\mathrm{j}}$ – суммарная за j-й день величина энергии накопленной в аккумуляторах, равная

$$\mathrm{Batt}^{\mathrm{Day}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{batt}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{batt}})_{\mathrm{j}} = \mathrm{Batt}^{\mathrm{Day}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{batt}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{batt}})_{\mathrm{j-1}} + \mathrm{Sun_Out}^{\mathrm{Day}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{sun}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{sun}})_{\mathrm{j}} + \\ + \mathrm{Wind_Out}^{\mathrm{Day}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{wind}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{wind}})_{\mathrm{j}} - \mathrm{Load}^{\mathrm{Day}}(\mathrm{vill})_{\mathrm{j}};$$

здесь $\mathrm{Sun_Out}^{\mathrm{Day}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{sun}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{sun}})_{\mathrm{j}}$ – суммарная за j-й день величина энергии на выходе $\mathrm{N}_{\mathrm{sun}}$ солнечных модулей (панелей) типа $\mathrm{Mod}_{\mathrm{sun}}$, равная

$$\mathrm{Sun_Out}^{\mathrm{Day}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{sun}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{sun}})_{\mathrm{j}} = \mathrm{Sun_In}^{\mathrm{Day}}(\mathrm{vill})_{\mathrm{j}} \cdot \mathrm{S}(\mathrm{Mod}_{\mathrm{sun}}) \cdot \mathrm{Mod_eff}(\mathrm{Mod}_{\mathrm{sun}}) \cdot \mathrm{N}_{\mathrm{sun}}(\mathrm{Mod}_{\mathrm{sun}}),$$

здесь $\mathrm{Sun_In}^{\mathrm{Day}}(\mathrm{vill})_{\mathrm{j}}$ – солнечная радиация за j-й день, усреднённая по площади (кВт·ч/м^2·день) для конкретного посёлка (vill);
$\mathrm{Wind_Out}^{\mathrm{Day}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{wind}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{wind}})_{\mathrm{j}}$ – суммарная за j-й день величина энергии на выходе $\mathrm{N}_{\mathrm{wind}}$ ветрогенераторов типа $\mathrm{Mod}_{\mathrm{wind}}$, равная

$$\mathrm{Wind_Out}^{\mathrm{Day}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{wind}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{wind}})_{\mathrm{j}} = \mathrm{Wind_In}(\mathrm{vill})_{\mathrm{j}} \cdot \mathrm{N}(\mathrm{Mod}_{\mathrm{wind}}) \cdot \mathrm{S}(\mathrm{Mod}_{\mathrm{wind}}) \cdot \mathrm{Mod_eff}(\mathrm{Mod}_{\mathrm{wind}}) \cdot \mathrm{N_hour}^{\mathrm{Day}}_{\mathrm{j}},$$

здесь $\mathrm{Wind_In}(\mathrm{vill})_{\mathrm{j}}$ – среднедневная для j-го дня плотность мощности ветрового потока (на высоте 30 метров), кВт/м^2;
$\mathrm{N_hour}^{\mathrm{Day}}_{\mathrm{j}}$ – число часов в i-м дне;
$\mathrm{Load}^{\mathrm{Day}}(\mathrm{vill})_{\mathrm{j}}$ – среднедневное для j-го дня энергопотребление конкретным посёлком (vill).

Почасовой годовой энергетический баланс определяется в соответствии с выражением

$$\forall k \in K,\ \mathrm{Batt}^{\mathrm{Hour}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{batt}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{batt}})_{\mathrm{k}} > \mathrm{Load}^{\mathrm{Hour}}(\mathrm{vill})_{\mathrm{k}},$$

где k – номер часа за период исследования;
K – массив номеров часов, не менее 8760 часов и, как правило, не больше 25 560;
$\mathrm{Batt}^{\mathrm{Hour}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{batt}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{batt}})_{\mathrm{k}}$ – суммарная за k-й час величина энергии, накопленной в аккумуляторах, равная

$$\mathrm{Batt}^{\mathrm{Hour}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{batt}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{batt}})_{\mathrm{k}} = \mathrm{Batt}^{\mathrm{Hour}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{batt}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{batt}})_{\mathrm{k-1}} + \mathrm{Sun_Out}^{\mathrm{Hour}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{sun}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{sun}})_{\mathrm{k}} + \\ + \mathrm{Wind_Out}^{\mathrm{Hour}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{wind}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{wind}})_{\mathrm{k}} - \mathrm{Load}^{\mathrm{Hour}}(\mathrm{vill})_{\mathrm{k}},$$

здесь $\mathrm{Sun_Out}^{\mathrm{Hour}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{sun}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{sun}})_{\mathrm{k}}$ – суммарная за k-й час величина энергии на выходе $\mathrm{N}_{\mathrm{sun}}$ солнечных модулей (панелей) типа $\mathrm{Mod}_{\mathrm{sun}}$, равная

$$\mathrm{Sun_Out}^{\mathrm{Hour}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{sun}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{sun}})_{\mathrm{k}} = \mathrm{Sun_In}^{\mathrm{Hour}}(\mathrm{vill})_{\mathrm{k}} \cdot \mathrm{S}(\mathrm{Mod}_{\mathrm{sun}}) \cdot \mathrm{Mod_eff}(\mathrm{Mod}_{\mathrm{sun}}) \cdot \mathrm{N}_{\mathrm{sun}}(\mathrm{Mod}_{\mathrm{sun}}),$$

здесь $\mathrm{Sun_In}^{\mathrm{Hour}}(\mathrm{vill})_{\mathrm{k}}$ – солнечная радиация за k-й час, усреднённая по площади (кВт·ч/м^2·час) для конкретного посёлка (vill);
$\mathrm{Wind_Out}^{\mathrm{Hour}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{wind}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{wind}})_{\mathrm{k}}$ – суммарная за k-й час величина энергии на выходе $\mathrm{N}_{\mathrm{wind}}$ ветрогенераторов типа $\mathrm{Mod}_{\mathrm{wind}}$, равная

$$\mathrm{Wind_Out}^{\mathrm{Hour}}(\mathrm{vill},\mathrm{N}_{\mathrm{wind}},\mathrm{Mod}_{\mathrm{wind}})_{\mathrm{j}} = \mathrm{Wind_In}(\mathrm{vill})_{\mathrm{k}} \cdot \mathrm{N}(\mathrm{Mod}_{\mathrm{wind}}) \cdot \mathrm{S}(\mathrm{Mod}_{\mathrm{wind}}) \cdot \mathrm{Mod_eff}(\mathrm{Mod}_{\mathrm{wind}}),$$

здесь $\mathrm{Wind_In}(\mathrm{vill})_{\mathrm{k}}$ – среднечасовая для k-го часа плотность мощности ветрового потока (на высоте 30 метров), кВт/м^2;
$\mathrm{Load}^{\mathrm{Hour}}(\mathrm{vill})_{\mathrm{k}}$ – среднечасовое для k-го часа энергопотребление конкретным посёлком (vill).

Этап 3 – расчёт стоимости оборудования независимо от дискретности исследований – производится в соответствии со следующим выражением:

$$\mathrm{Cost}_{\mathrm{total}} = \mathrm{Cost}_{\mathrm{sun}} + \mathrm{Cost}_{\mathrm{wind}} + \mathrm{Cost}_{\mathrm{batt}},$$

где $\mathrm{Cost}_{\mathrm{total}}$ – общая стоимость оборудования;

$Cost_{sun} = Cost_{sun}(Mod_{sun}) \cdot N_{sun}$ – стоимость солнечных модулей;
здесь $Cost_{sun}(Mod_{sun})$ – стоимость солнечного модуля типа Mod_{sun};
$Cost_{wind} = Cost_{wind}(Mod_{wind}) \cdot N_{wind}$ – стоимость ветрогенераторов,
здесь $Cost_{wind}(Mod_{wind})$ – стоимость ветрогенератора типа Mod_{wind};
$Cost_{batt} = Cost_{batt}(Mod_{batt}) \cdot N_{batt}$ – стоимость аккумуляторов,
здесь $Cost_{batt}(Mod_{batt})$ – стоимость аккумулятора типа Mod_{batt}.

Накопление и анализ производятся для реализации вариации параметров с целью минимизации общей стоимости оборудования ($Cost_{total}$).

Этап 4 – вариация количественного состава по результатам анализа этапа 3 и переход, если минимум $Cost_{total}$ не достигнут, к расчёту энергетических балансов с обновлёнными параметрами.

Программное обеспечение предварительной параметрической оптимизации АГЭС

Программное обеспечение Energy Device Calculator (EDC), предназначенное для предварительной параметрической оптимизации автономных гибридных энергетических систем, разработано на языке программирования C# с использованием технологии ASP.NET Core и паттерна программирования MVC. Выбранный подход делает программу кроссплатформенной, устойчивой к ошибкам, связанным с контролем сборки мусора, задаёт высокий уровень безопасности к различным типам удалённых нежелательных атак и позволяет легко дополнять функционал без опасности нарушить работу ранее реализованной логики.

Взаимодействие программы с базой данных реализовано с использованием Entity Framework Core 3.1.4, что позволило решить проблему совместимости и дальнейшего сопровождения. Сама база данных является автоматически сгенерированной из объектов расчётной модели и поддерживает возможность обновлений с помощью автоматически сгенерированных миграций на основе изменений расчётной модели.

Для удобства работы с системой реализован визуальный геоинформационный модуль на основе API 2GIS. Модуль позволяет выполнять отбор населённого пункта для расчёта посредством простого выбора на актуальной географической карте.

На рис. 1 представлена диаграмма взаимодействия компонентов платформы Energy Device Calculator.

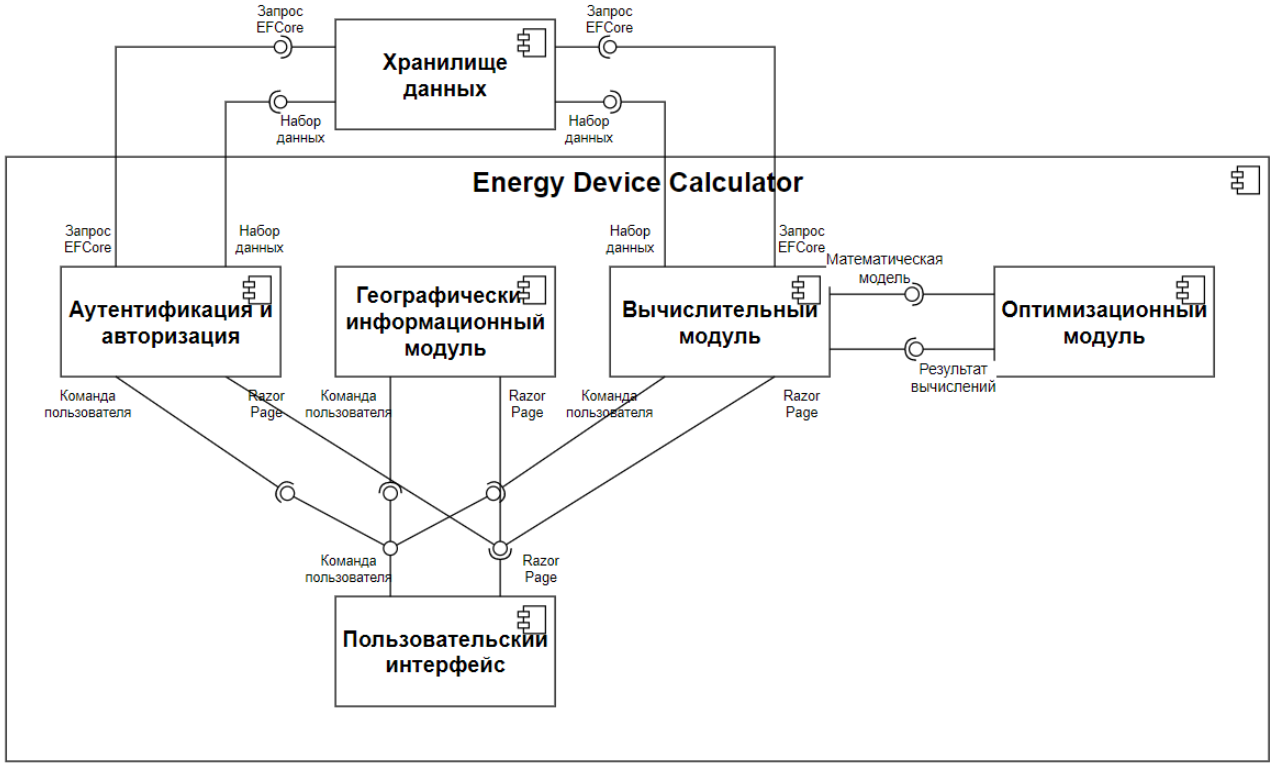

Рис. 1. Диаграмма компонентов Energy Device Calculator

Пользовательский интерфейс

Программа выполнения оформлена в виде веб-приложения, а всё взаимодействие с внутренней логикой происходит посредством веб-страниц. Для разработки веб-страниц использовался механизм Razor Page, позволяющий легко встраивать динамические элементы в страницы. Имеется защищённая область веб-сайта, для доступа к которой необходимо пройти процедуру авторизации.

На главной странице для удобства восприятия хранимой информации представлен геоинформационный модуль, на котором располагаются все доступные для расчётов населённые пункты. На странице «Исследования» имеется возможность выбирать тип интересуемых результирующих данных и вводить стартовые параметры при запуске расчётов.

Страница «База данных» является переходной к страницам управления таблицами хранилища данных. На страницах «Посёлки», «Солнечные панели», «Ветрогенераторы», «Аккумуляторы» можно добавлять, изменять и удалять соответствующие объекты. Доступные для хранения характеристики объектов представлены в разделе «Хранилище данных». Страница «Авторизация» предназначена для аутентификации и присвоения прав доступа пользователю. На странице «Контакты» предоставлены контактные данные всех лиц, участвующих в исследовании.

Географический информационный модуль

Географический модуль выполнен с использованием 2GIS API, являющегося свободно распространяемым программным обеспечением. Данный модуль даёт возможность быстро и легко выполнить расчёт по интересующему населённому пункту при помощи простого клика по метке на карте (см. рис. 2). Данные для меток берутся из таблицы с населёнными пунктами базы данных.

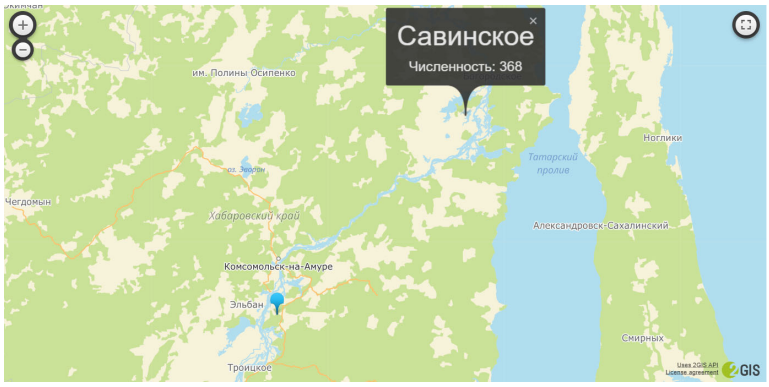

Рис. 2. Интерфейс геоинформационного модуля

Вычислительный модуль

Расчёт выполняется согласно методике предварительной параметрической оптимизации АГЭС, подробно описанной выше.

Оптимизационный модуль

Экономическая оптимизация гибридной энергетической системы основана на целевой функции, минимизирующей стоимость конфигурации системы, учитывающей ограничения по непрерывному обеспечению потребностей потребителей. В этом контексте на рис. 3 представлена блок-схема оптимизации целевой функции методом «рой пчёл».

На вход алгоритма поступают стоимость отобранных для расчёта солнечных панелей, ветрогенераторов и аккумуляторов, целевая функция согласно методике предварительной параметрической оптимизации АГЭС и ограничения по пространству поиска. Далее производится первичная инициализация алгоритма оптимизации, выделяется память, необходимая для выполнения расчётов, подготавливаются абстрактные «пчёлы», участвующие в расчётах.

Во время проведения практических тестов по определению оптимальных параметров было обнаружено, что приемлемыми по времени выполнения расчёта и точности итоговых значений являются следующие параметры для инициализации алгоритма оптимизации:

– первичный запуск 100 «пчёл-разведчиков»;

– выделение 50 лучших решений среди всех найденных;
– выделение 25 случайных решений среди оставшихся;
– отправка по 100 «пчёл» в область поиска для каждого из набора лучших решений;
– отправка по 50 пчёл в область поиска для каждого из набора случайных решений;
– выполнение 250 итераций расчёта;
– сужение области поиска с каждой итерацией на 1 % от предыдущего размера области.

После инициализации производится первичный запуск 100 «пчёл» в случайные точки пространства поиска. В данных позициях производится проверка на выполнение заданных ограничений, и выполняется расчёт стоимости системы по заданным параметрам.

Среди найденных решений выполняется ранжировка по критерию минимума стоимости системы по выбранным параметрам (координатам «пчёл»). Лучшее локальное решение сохраняется как глобальное лучшее, 50 лучших решений запоминаются в наборе «лучшие решения», 25 решений среди оставшихся запоминаются в наборе «другие решения».

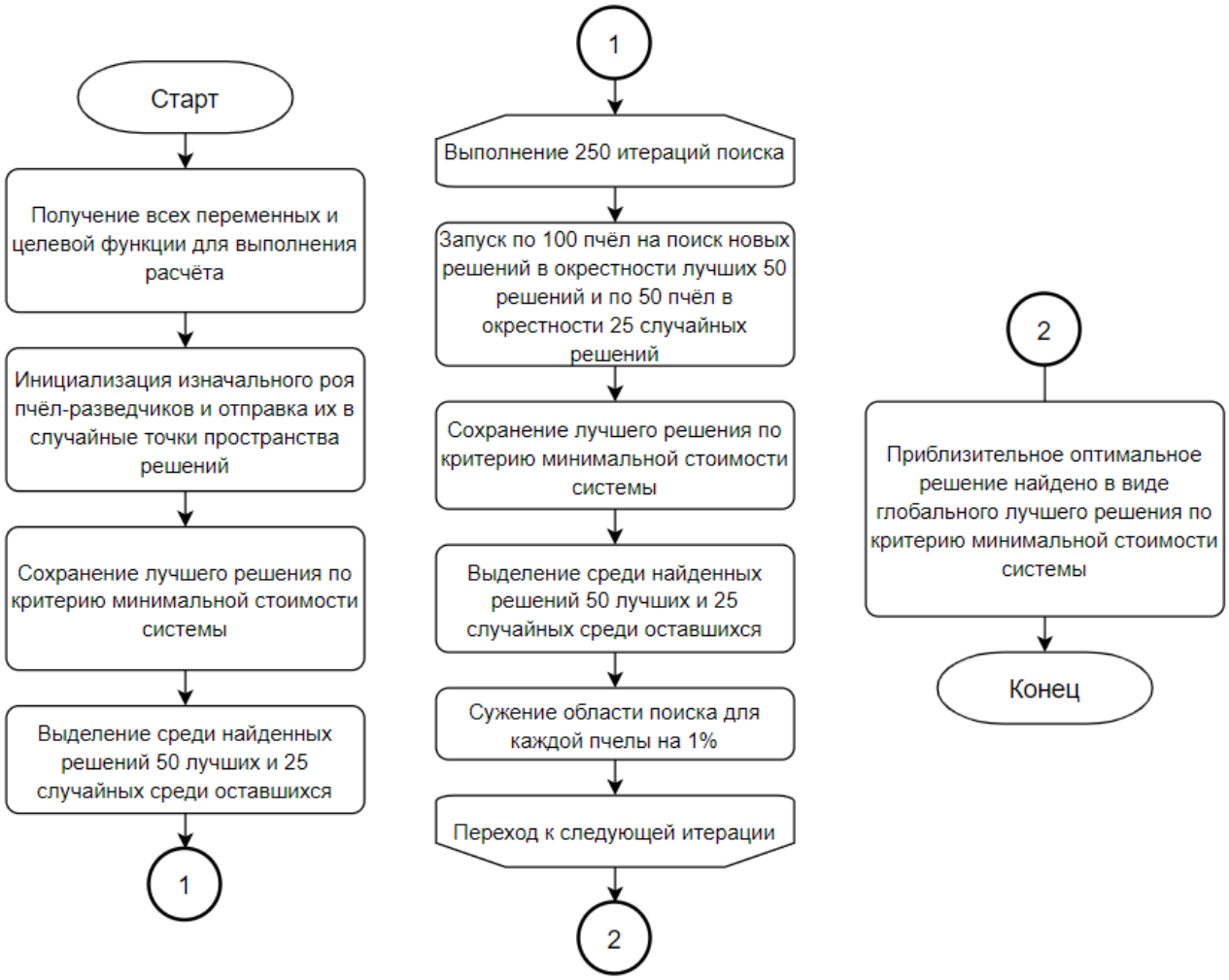

Рис. 3. Высокоуровневая блок-схема алгоритма оптимизации целевой функции

Далее выполняются 250 итераций попыток улучшения найденного глобального оптимума. В каждой итерации производится запуск по 100 пчёл в окрестности каждой точки пространства из набора «лучшие решения» и по 50 пчёл в окрестности каждой точки пространства поиска из набора «другие решения». В общей сложности на каждой итерации цикла по заданным первоначальным параметрам алгоритма оптимизации выполняется $100 \cdot 50 + 50 \cdot 25 = 6250$ проверок точек на соответствие критерию минимума стоимости конфигурации оборудования. Далее снова выполня-

ется сохранение нового глобального оптимума, при его наличии, выделяются новые наборы «лучшие решения» и «другие решения», размеры окрестностей поиска пчёл сужаются на 1 % от предыдущих значений.

После выполнения всех итераций поиска в результате на выходе имеется глобальное оптимальное решение алгоритма «рой пчёл», которое является приблизительным и приемлемым оптимальным решением задачи оптимизации параметров автономных гибридных энергетических систем. Для демонстрации результатов расчёта алгоритма использовалась информация по посёлку Савинское Ульчского района Хабаровского края (см. табл. 1).

Таблица 1

Параметры и стоимость оборудования АГЭС при разных итерациях

Номер итерации	Количество солнечных панелей	Количество ветрогенераторов	Количество аккумуляторов	Общая стоимость конфигурации (тыс. р.)
1	10 951	0	1026	207 889,70
2	9803	0	978	187 808,70
3	8846	0	987	172 462,20
4	7895	0	985	156 899,00
5	6985	0	995	142 347,40
10	3439	12	1143	96 742,70
25	1224	0	762	87 591,60
50	1538	47	1065	86 791,09
150	1769	44	936	84 873,15
250	1771	43	946	84 526,76

По результатам расчёта было выявлено, что оптимальным будет включение в конфигурацию АГЭС в посёлке Савинское 1771 солнечной панели, 43 ветрогенераторов и 946 аккумуляторов. Общая стоимость оборудования без учёта установки и настройки составит 84 526,76 тыс. р. по состоянию на октябрь 2020 года.

Хранилище данных

В качестве хранилища информации для Energy Device Calculator была выбрана реляционная база данных MSSQL Server 2017 Express. Данное решение выбрано из-за характера хранимых данных. Схема базы данных, используемая в программном обеспечении на октябрь 2020 года, представлена на рис. 4.

Таблицы базы данных были сгенерированы автоматически адаптером для Entity Framework Core 3.1.4 Microsoft.EntityFrameworkCore.SqlServer 3.1.4. Такое решение было выбрано для простоты поддержки соответствия схемы базы данных с внутренней математической моделью Energy Device Calculator.

Аутентификация и авторизация

В разработке модуля аутентификации и авторизации использовалась встроенная в ASP.NET Core система ASP.NET Core Identity, которая позволяет с минимальными усилиями и высокой надёжностью реализовать проверку личности пользователя. Доступ к веб-приложению предоставляется на основе сессионного механизма.

Результаты работы Energy Device Calculator

Рассмотрим результаты работы на примере посёлка Савинское Хабаровского края. Посёлок Савинское располагается на 52°09′ с.ш., 140°22′ в.д. Результаты расчётов годовых энергетических балансов представлены в табл. 2 и на рис. 5-7.

Расчёт на рис. 5 даёт очень грубые оценки количества необходимого оборудования и его стоимости, т. к. не позволяет провести оптимизацию с учётом требований к аккумуляторам.

Расчёт на рис. 6 позволяет провести параметрическую оптимизацию и снизить при этом стоимость оборудования в несколько раз.

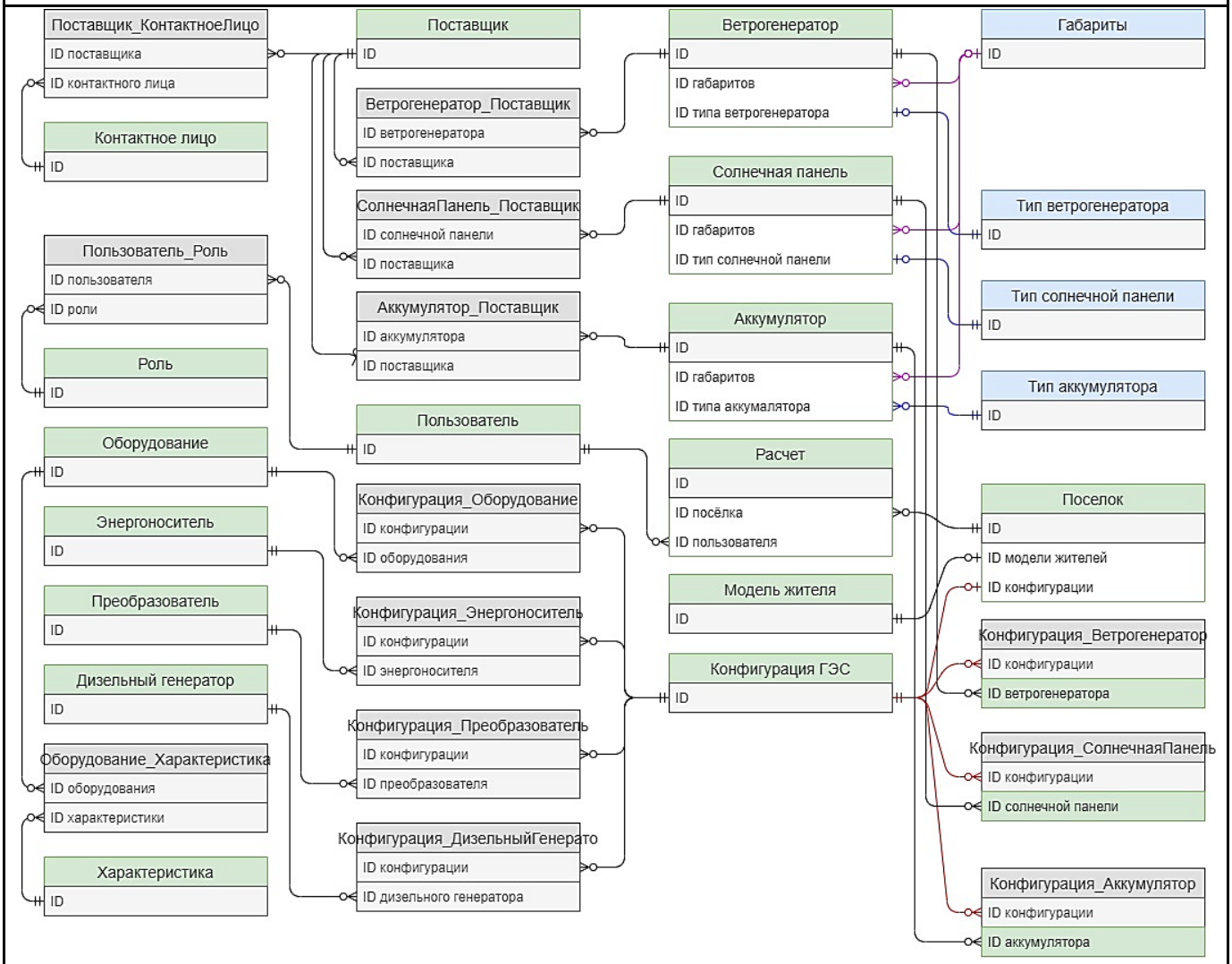

Рис. 4. Схема таблиц используемой базы данных

Таблица 2

Расчёты годовых энергетических балансов

Оборудование	Параметры	Погодовой баланс		Помесячный баланс	Подневной баланс	Почасовой баланс
Солнечные панели	Количество, шт.	1510	0	1 208	1771	1822
	Стоимость, тыс. р.	24 620	0	19 696	28 876	29 707
Ветрогенераторы	Количество, шт.	0	80	16	43	47
	Стоимость, тыс. р.	0	53 200	10 640	28 595	31 255
Аккумуляторы	Количество, шт.	-	-	77 000	946	1006
	Стоимость, тыс. р.	-	-	2 202 151	27 055	28 771
Общая стоимость	тыс. р.	24 620	53 200	2 232 487	84 526	89 733
Стоимость на одного жителя	тыс. р.			6 067	230	244
Обеспечение непрерывности подачи энергии		Нет	Нет	Да	Да	Да

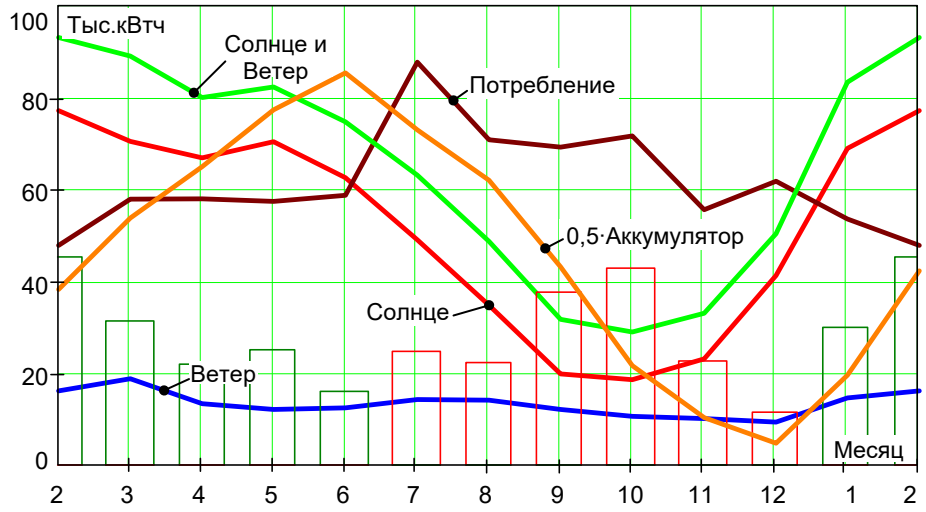

Рис. 5. Помесячный энергетический баланс

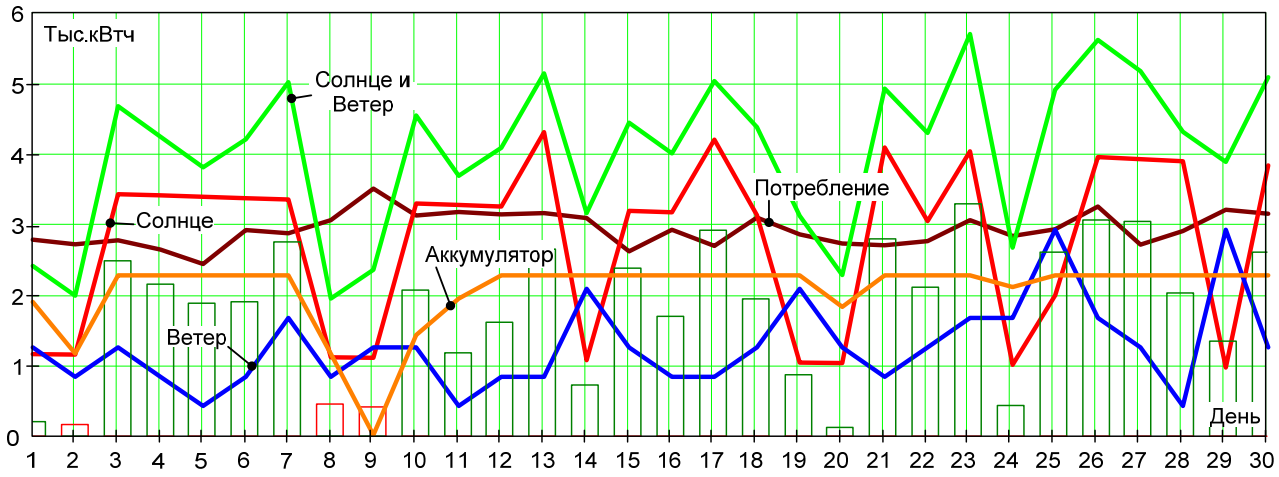

Рис. 6. Подневной энергетический баланс

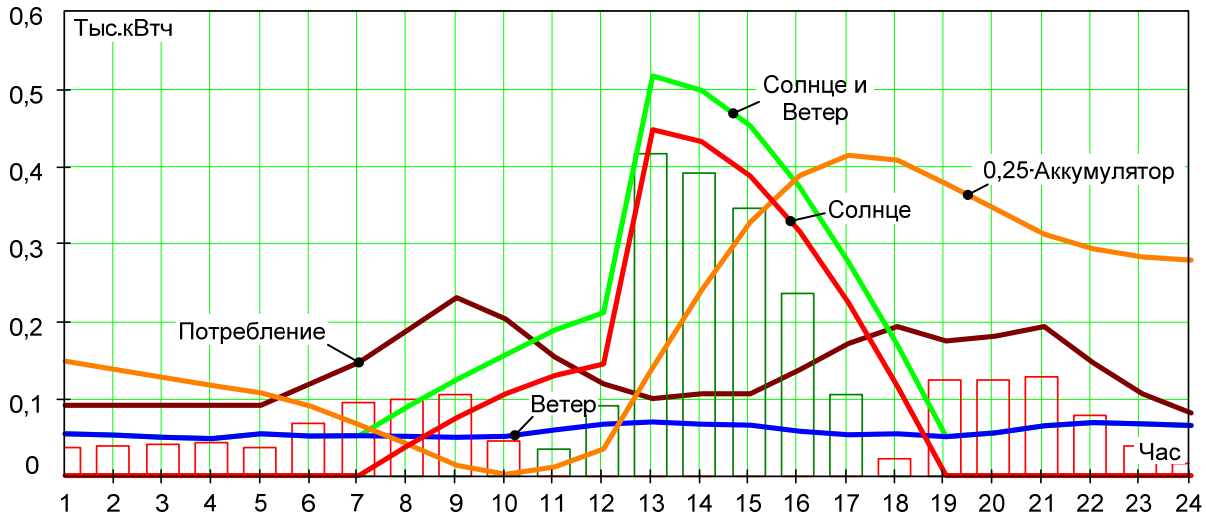

Рис. 7. Почасовой энергетический баланс

Расчёт на рис. 7, как и предыдущий, позволяет провести оптимизацию оборудования, повышенная дискретизация (почасовая) позволяет более точно учитывать необходимое количество аккумуляторов.

Представленные на рис. 8 результаты расчётов вкладов оборудования для энергетических балансов с разной дискретизацией показывают, что оптимизация, выравнивая вклады оборудования, существенно (более чем в 20 раз) уменьшает общую стоимость оборудования. Сравнение подневных и почасовых балансов показывает, что стоимость оборудования при почасовом балансе незначительно больше (немного больше 6 %). На основании этого можно сделать вывод, что достаточно производить расчёты по подневным балансам с девятипроцентным увеличением количества оборудования каждого типа.

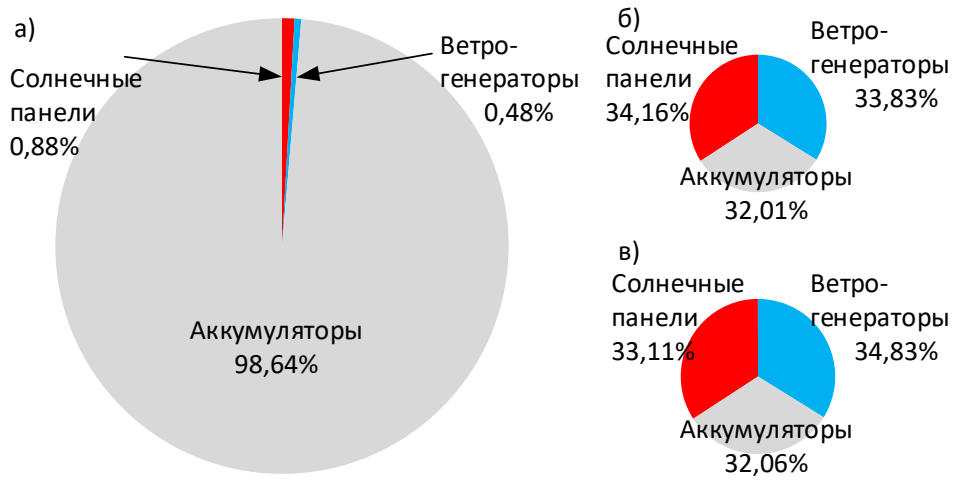

Рис. 8. Распределение вклада по стоимости оборудования АГЭС:
а – по помесячному балансу (без оптимизации);
б – по подневному балансу (с оптимизацией); в – по почасовому балансу (с оптимизацией)

Заключение

Разработан программный комплекс, позволяющий на основе энергетических балансов АГЭС провести оптимизацию количественного состава оборудования АГЭС. Оптимизация позволила получить значительный выигрыш в общей стоимости оборудования. Программный комплекс может использоваться для параметрической оптимизации АГЭС автономных посёлков Хабаровского края, не имеющих связи с централизованной энергетической системой. Широкие возможности по заданию степени дискретизации при расчётах от помесячных до почасовых позволяют выработать рекомендации по использованию подневной дискретизации, позволяющей получить достоверные данные при приемлемых вычислительных затратах. Дальнейшее совершенствование методов оптимизации должно быть направлено на модернизацию моделей входных и выходных энергетических потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yu Fu, Jianhua Yang, and Tingting Zuo. Optimal Sizing Design for Hybrid Renewable Energy Systems in Rural Areas, in Book Computer and Computing Technologies in Agriculture, 4th IFIP TC 12 Conference, Nanchang, China, Part II, 2010. – P. 131-138.
2. Amina Gaabour, Abderrezak Metatla, Ridha Kelaiaia, Farid Bourennan, Adlen Kerboua. Recent Bibliography on the Optimization of Multi-source Energy Systems, in Book Archives of Computational Methods in Engineering, 2018. – P. 1-22.
3. Maurizio Faccio, Mauro Gamberi, Marco Bortolini, and Mojtaba Nedaei. State-of-art review of the optimization methods to design the configuration of hybrid renewable energy systems (HRESs), in Journal Frontiers in Energy, Vol. 12. – P. 1-32.

4. Binayak Bhandari, Kyung-Tae Lee, Gil-Yong Lee, Young-Man Cho, Sung-Hoon Ahn. Optimization of Hybrid Renewable Energy Power Systems: A Review, in International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2015, Vol. 2, No. 1. – P. 99-112.
5. Berdonosov V. D., Shamak V. A., Zhivotova A. A., Zheltov M. V. Hybrid Power Systems Optimization For Regions Of The Far North // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. 2019. P. 8934884. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934884.
6. Muthukumar R., Balamurugan P. A novel power optimized hybrid renewable energy system using neural computing and bee algorithm, in Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications, 2019, Vol. 60. – P. 332-339.
7. Matthew D. Stuber. A Differentiable Model for Optimizing Hybridization of Industrial Process Heat Systems with Concentrating Solar Thermal Power, in Journals, Processes, 2018, Vol. 6(7). – P. 1-25.
8. Iromi Ranaweera, Mohan Lal Kolhe, Bernard Gunawardana. Hybrid Energy System for Rural Electrification in Sri Lanka: Design Study, in Book Solar Photovoltaic System Applications, 2015. – P. 165-184.
9. Карты объектов возобновляемой энергетики на территории России [Электронный ресурс] / ГИС ВИЭ, 2021. – Режим доступа: https://gisre.ru/maps (дата обращения: 01.03.2021).
10. Дневник погоды в Комсомольске-на-Амуре [Электронный ресурс] / 1998 – 2021, Мэп Мэйкер. – Режим доступа: https://www.gismeteo.ru/diary/4853/ (дата обращения: 01.03.2021).
11. Ranjay Singh, Ramesh C. Bansal, Arvind R. Singh, and Raj Naidoo. Multi-Objective Optimization of Hybrid Renewable Energy System Using Reformed Electric System Cascade Analysis for Islanding and Grid Connected Modes of Operation, in Journals & Magazines, IEEE Access, 2018, Vol. 6. – P. 47332-47354.
12. Debao Zhang, Junwei Liu, Shifei Jiao, Hao Tian, Chengzhi Lou, Zhihua Zhou, Ji Zhang, Chendong Wang, and Jian Zuo. Research on the configuration and operation effect of the hybrid solar-wind-battery power generation system based on NSGA-II, in Journal Energy, 2019, Vol. 189. – P. 116-121.
13. Victor D. Berdonosov, Sergey A. Gordin, Viktoria A. Shamak, Ilya O. Nedikov. Optimal Strategy of Storage Unit Selection for Stand-Alone Hybrid Power Systems. In Book Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies, 2020. – P. 735-743. DOI: doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0_79.
14. Бердоносов, В. Д. Методика расчёта для выполнения оптимизации необходимого количества аккумуляторов в автономной гибридной энергетической системе / В. Д. Бердоносов, В. А. Шамак, И. О. Недиков // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2020. – № 3 (8). – С. 80-88.
15. Бердоносов, В. Д. Оптимизация гибридных энергетических систем для удалённых поселений на примере посёлка Чильба / В. Д. Бердоносов, В. А. Шамак // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 14 июня 2019 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – С. 34-39.
16. Гордин, С. А. К вопросу повышения эффективности систем управления дутьём твёрдотопливных котлов / С. А. Гордин, И. В. Зайченко, М. С. Гринкруг // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V-1 (45). – С. 25-30.