

**С.М. Асанова¹, Арфан аль Хакам¹, Т.Ж. Жабудаев¹, Т.К. Сатаркулов²,
И.Н. Тилебаев³, Г.К. Усубалиева³**

¹Кыргызский государственный технический университет им.И.Раззакова,
Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: a_sm07@mail.ru

²ОсОО "Нур Ал Энерго", г.Бишкек, ул.Исакеева 1/5, e-mail: timsat76@mail.ru

³Филиал им. академика Х.А. Рахматуллина в г. Токмок при КГТУ им.
И.Раззакова, e-mail: gulnara.u@mail.ru

ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ И УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ БАЛАНСОМ В НИХ

Разрабатывается методика создания универсальной системы автоматизированного проектирования автономных распределенных гибридных энергокомплексов (АРГЭК) и методика управления энергетическим балансом в ней, т.е. потоками мощностей, циркулирующих в этой системе. Обобщенная схема методики проектирования АРГЭК состоит из следующих этапов: исследование и создание базы статистических данных об электрических нагрузках потребителей, о скорости ветра рассматриваемого региона, о гидроэнергетических ресурсах горных и равнинных рек, о солнечной энергии, а также исследование и создание базы знаний о преобразователях энергии ветра и энергии воды в электрическую энергию. Рассматривается задача синтеза оптимальной структуры распределенной гибридной системы генерации, обеспечивающей требуемый уровень генерируемой мощности и минимальную стоимость.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии; автономный распределенный гибридный энергокомплекс; энергетический баланс; система управления; синтез оптимальной структуры; ориентированный граф.

Введение. С развитием общества возрастает дефицит электрической энергии, вырабатываемой традиционным способом, что приводит к понижению функциональной надежности подачи их потребителям в требуемом объеме. Для разрешения данной проблемы, т.е. разгрузки существующих энергосистем, во всем мире начали уделять повышенное внимание разработке и использованию автономных энергокомплексов, функционирующих на возобновляемых (нетрадиционных) источниках энергии (ВИЭ) [1-4]. Однако мощности ВИЭ рассредоточены в пространстве, обладают низкой плотностью и имеют изменчивый характер. В связи с этим возникает необходимость в создании теоретической и методической основы к проектированию автономных энергокомплексов, включающей следующие основные задачи:

- исследование и создание базы статистических данных об электрических нагрузках потребителей;
- исследование ВИЭ для разных регионов и создание базы статистических данных;
- разработка эффективных, с позиций коэффициента полезного действия (КПД), надежности и стоимости, преобразователей ВИЭ в электрическую энергию и создание базы знаний о них на основе существующих и вновь разработанных [1-6];

- разработка теоретической и методической основы проектирования эффективных, с точки зрения структурной, функциональной надежности и стоимости (самокупаемости), автономных распределенных гибридных энергокомплексов (АРГЭК);
- разработка эффективных систем управления энергетическим балансом в АРГЭК;
- разработка систем автоматизированного проектирования АРГЭК.

В настоящей работе делается начальная попытка формализации вышеуказанных проблем с целью дальнейшей углубленной детализации и создания универсальной системы автоматизированного проектирования АРГЭК (САПР АРГЭК). Основным математический аппарат при разработке САПР АРГЭК – теория вычислительных сетей Петри (ВСП) [7, 8], которая является дальнейшим развитием классической теории сетей Петри [9, 10].

1. Обобщенная схема АРГЭК, и об управлении энергетическим балансом в ней.

Схема АРГЭК представлена на рис. 1 в виде ориентированного графа. Состоит он из следующих элементов:

- *ВГ* – распределенная система ветряных генераторов, вырабатывающая мощность $W_{ВГ}(t) + \Delta W_{ВГ}(t)$, где $\Delta W_{ВГ}(t)$ – мощность, расходуемая на собственные нужды, а $W_{ВГ}(t)$ – мощность, подаваемая в систему АРГЭК.
- *ГГ* – распределенная система гидрогенераторов, вырабатывающая мощность $W_{ГГ}(t) + \Delta W_{ГГ}(t)$, где $\Delta W_{ГГ}(t)$ – мощность, расходуемая на собственные нужды, а $W_{ГГ}(t)$ – мощность, подаваемая в систему АРГЭК.
- *СБ* – распределенная система солнечных батарей, вырабатывающая мощность $W_{СБ}(t) + \Delta W_{СБ}(t)$, где $\Delta W_{СБ}(t)$ – мощность для собственных нужд, а $W_{СБ}(t)$ – мощность, подаваемая в систему АРГЭК.
- $\{ВГ, ГГ, СБ\}$ – распределенная гибридная система генерации (РГСГ), суммарная мощность которой

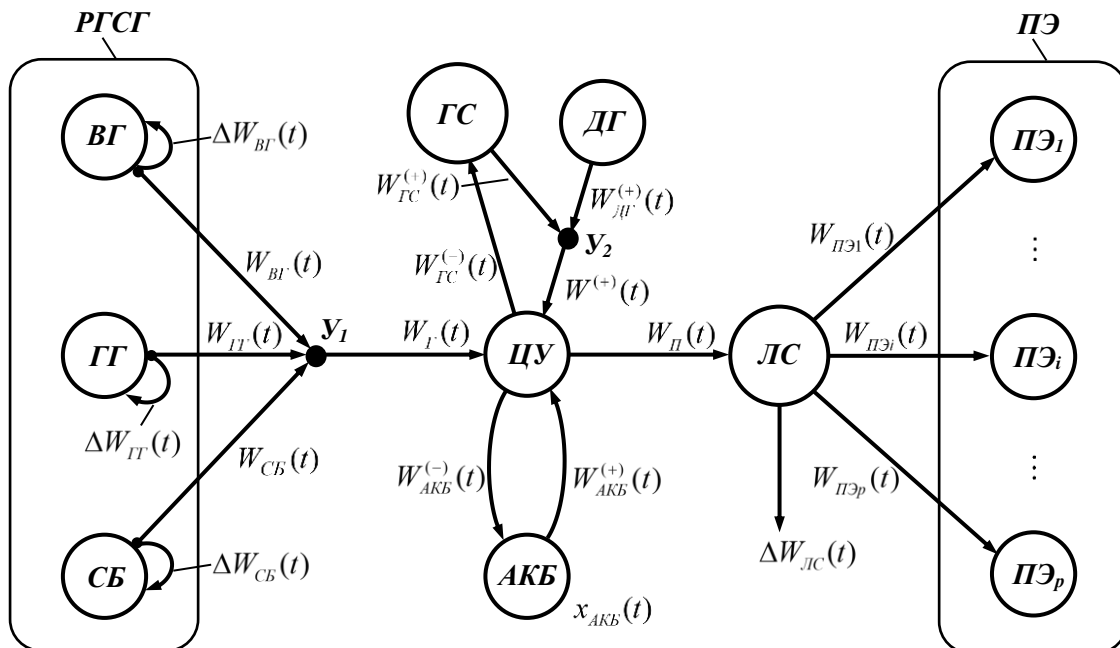


Рисунок 1 – Обобщенная схема автономных распределенных гибридных энергокомплексов (АРГЭК)

$$W_{\Gamma}(t) = W_{BG}(t) + W_{ГГ}(t) + W_{CB}(t). \quad (1)$$

- $ПЭ = \{ПЭ_i | i \in N_{ПЭ}\}$ – множество потребителей электрической энергии с потребляемыми мощностями, соответственно $\{W_{ПЭi}(t) | i \in N_{ПЭ}\}$; суммарная потребляемая мощность:

$$W_{ПЭ}(t) = \sum_{i \in N_{ПЭ}} W_{ПЭi}(t), \quad N_{ПЭ} = \{1, 2, \dots, p\}. \quad (2)$$

- $АКБ$ – система аккумуляторных батарей, состояние которой – накопившееся количество электрической энергии $x_{АКБ}(t)$, которое может изменяться в пределах

$$x_{АКБ}^{\min} \leq x_{АКБ}(t) \leq x_{АКБ}^{\max}. \quad (3)$$

$АКБ$ предназначена для сохранения избыточной мощности $W_{АКБ}^{(-)}(t)$, возникшей в системе АРГЭК, и для отдачи мощности $W_{АКБ}^{(+)}(t)$ в систему АРГЭК при ее дефиците.

- $ЛС$ – локальная электрическая сеть системы АРГЭК, предназначенная для транспортировки и распределения требуемой мощности $W_{Л}(t)$ по потребителям:

$$W_{Л}(t) = W_{ПЭ}(t) + \Delta W_{ЛС}(t), \quad (4)$$

где $\Delta W_{ЛС}(t)$ – потери мощности в сети $ЛС$.

- $ДГ$, $ГС$ – соответственно дизельный генератор и глобальная (общегосударственная) сеть, к которым АРГЭК подключается в исключительных ситуациях: а) дефицит мощности $W^{(+)}(t)$ в системе АРГЭК и система $АКБ$ разряжена, т.е. $x_{АКБ}(t) = x_{АКБ}^{\min}$; б) избыток мощности $W_{ГС}^{(-)}$ в системе АРГЭК и система $АКБ$ заряжена до максимума, т.е. $x_{АКБ}(t) = x_{АКБ}^{\max}$.

- $У_1, У_2$ – узлы соединения линий электропередач.

- $ЦУ$ – центр управления системой АРГЭК, предназначенный для управления энергетическим балансом в ней, т.е. потоками мощностей, циркулирующих в системе АРГЭК.

2. Обобщенная схема методики проектирования АРГЭК.

Схема проектирования АРГЭК включает в себя следующие этапы и шаги.

Этап 1. Исследование и создание базы статистических данных об электрических нагрузках потребителей $ПЭ = \{ПЭ_i | i \in N_{ПЭ}\}$.

Шаг 1. На основе наблюдений формировать временной ряд потребляемой мощности (2) $\{W_{ПЭ}(t) | t \in T\}$, где $T = \{t_0, t_1, \dots, t_{\tau}\}$; t – дискретное время; τ – число дискретного времени.

Шаг 2. Вычислить среднее значение $\langle W_{ПЭ} \rangle_{\tau}$ потребляемой мощности и ее стандартное отклонение $D_{ПЭ}$:

$$\langle W_{ПЭ} \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t \in T} W_{ПЭ}(t); \quad (5)$$

$$D_{ПЭ} = \left(\frac{1}{\tau} \sum_{t \in T} (W_{ПЭ}(t) - \langle W_{ПЭ} \rangle_{\tau})^2 \right)^{1/2}. \quad (6)$$

Этап 2. Исследование и создание базы статистических данных скорости ветра рассматриваемого региона (рис. 2).

Шаг 3. На основе наблюдений формировать временной ряд скорости ветра $\{v_{h_0}(t) | t \in T\}$ для заданной высоты (уровня) h_0 (для метеостанций принято $h_0 = 10$ м) [11].

Шаг 4. Вычислить среднее значение $\langle v_{h_0} \rangle_\tau$ скорости ветра для уровня h_0 и ее стандартное отклонение D_{h_0} :

$$\langle v_{h_0} \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t \in T} v_{h_0}(t); \tag{7}$$

$$D_{h_0} = \left(\frac{1}{\tau} \sum_{t \in T} (v_{h_0}(t) - \langle v_{h_0} \rangle_\tau)^2 \right)^{1/2}. \tag{8}$$

Шаг 5. Вычислить среднее значение скорости ветра $\langle v_{h_i} \rangle_\tau$ для каждого уровня h_i , $i \in N_{yp} = \{1, 2, \dots, n_{yp}\}$ на основе вычисленной средней скорости $\langle v_{h_0} \rangle_\tau$ (7) [11]:

$$\langle v_{h_i} \rangle_\tau = \langle v_{h_0} \rangle_\tau \cdot \left(\frac{h_i}{h_0} \right)^k, \tag{9}$$

где k – эмпирический показатель шероховатости подстилаемой поверхности земли.

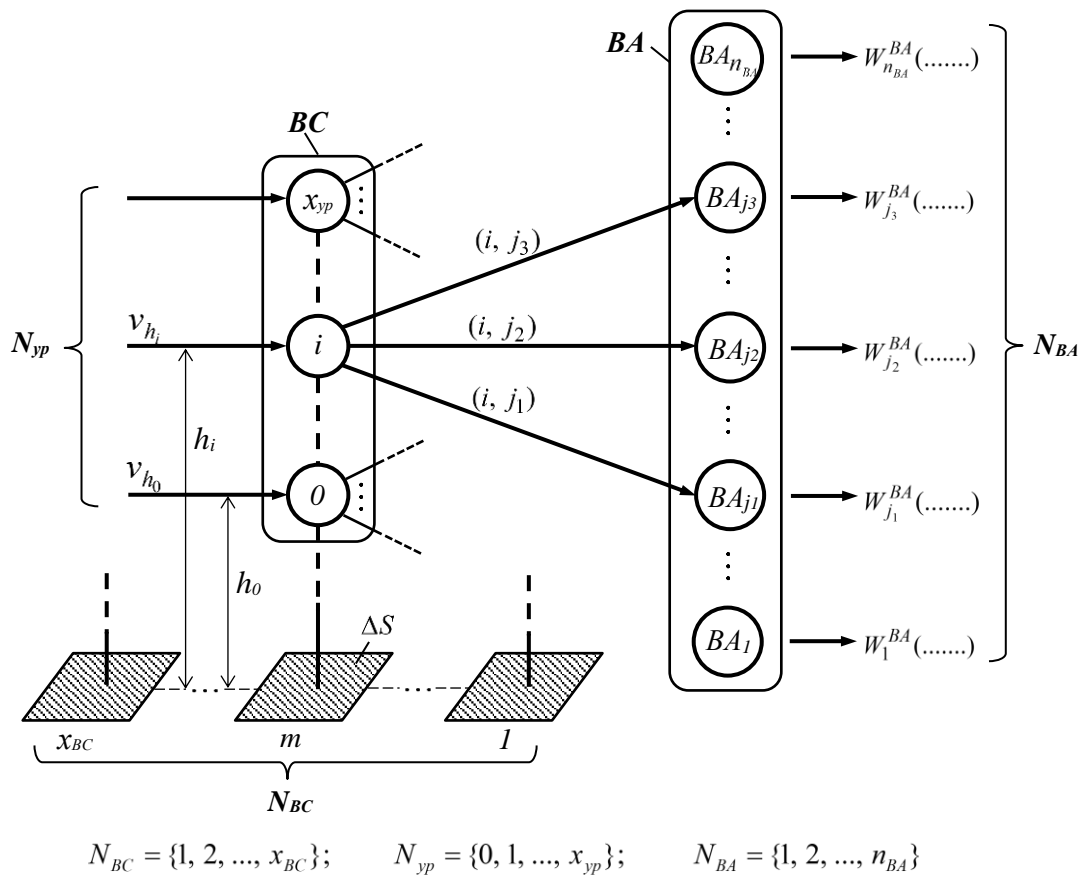


Рисунок 2 – К проектированию распределенных систем ветряных генераторов (ВГ)

Этап 3. Исследование и создание базы статистических данных о гидроэнергетических ресурсах горных и равнинных рек.

Граф горной реки имеет древовидную структуру, концевые узлы (стоки рек) которого рассредоточены в горах на разных высотах (уровнях), а корень графа соответствует равнинной части реки (рис. 3).

Шаг 6. На графе указать перспективные створы рек, где будут установлены гидроагрегаты (ГА). Для этих створов на основе наблюдений формировать временной ряд расхода воды $\{Q_i(t) | t \in T\}$, $\forall i \in N_{ГГ}$, температуры воздуха $\{T_i^\circ(t) | t \in T\}$, $\forall i \in N_{ГГ}$, а также базы данных об уклонах реки J_i , $\forall i \in N_{ГГ}$.

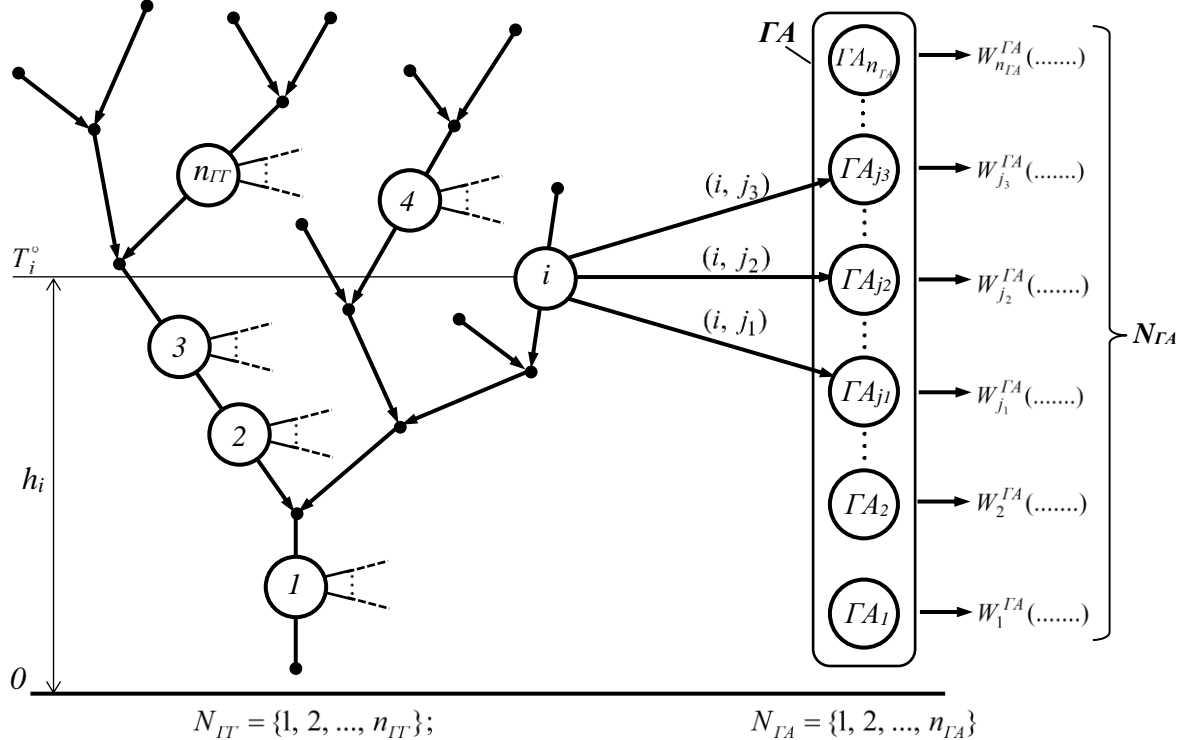


Рисунок 3 – К проектированию распределенных систем гидрогенераторов (ГГ)

Шаг 7. Для каждого i -го створа реки рассчитать среднее значение $\langle Q_i \rangle_\tau$. На основе множества (временного ряда) $\{T_i^\circ(t) | t \in T_{зим} \subset T\}$, где $T_{зим}$ соответствует зимнему периоду времени, рассчитать мощности $\{\Delta W_i^{ГА}(t) | t \in T_{зим}\}$ и распределить их на период времени τ :

$$\langle \Delta W_i^{ГА} \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t \in T_{зим}} \Delta W_i^{ГА}(t), \quad (10)$$

где $\{\Delta W_i^{ГА}(t) | t \in T_{зим}\}$ – мощности, используемые для обогрева легкого сооружения с целью защиты гидроагрегатов от замерзания и сохранности его работоспособности в зимний период времени $T_{зим} \subset T$.

Этап 4. Исследование и создание базы статистических данных о солнечной энергии.

Шаг 8. На основе наблюдений формировать временной ряд мощности $\{W_{CB}^1(t) \mid t \in T\}$, вырабатываемой одной панелью солнечной батареи.

Шаг 9. Вычислить среднее значение $\langle W_{CB}^1 \rangle_\tau$ вырабатываемой мощности и ее стандартное отклонение D_{CB}^1 :

$$\begin{aligned} \langle W_{CB}^1 \rangle_\tau &= \frac{1}{\tau} \sum_{t \in T} W_{CB}^1(t); \\ D_{CB}^1 &= \left(\frac{1}{\tau} \sum_{t \in T} (W_{CB}^1(t) - \langle W_{CB}^1 \rangle_\tau)^2 \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Этап 5. Исследование и создание базы знаний о преобразователях энергии ветра в электрическую энергию (рис. 2).

Шаг 10. Формировать множество ветряных агрегатов $BA = \{BA_j \mid j \in N_{BA}\}$, где каждый j -ый агрегат BA_j представляет собой комплект, составленный из конструктивно совместимых одиночных преобразователей энергии ветра в электрическую; $N_{BA} = \{1, 2, \dots, n_{BA}\}$ – множество номеров агрегатов; n_{BA} – число агрегатов. Отметим, что комплект может состоять из одного, или группы, одинаковых или разных по типу преобразователей.

Шаг 11. Формировать множество расчетных формул, каждая j -ая формула которого однозначно соответствует j -му элементу множества агрегатов BA:

$$\{W_j^{BA}(k_j, \eta, \langle v_{hi} \rangle_\tau, S_{BA_j}) \mid j \in N_{BA}\}, \quad (12)$$

где $W_j^{BA}(k_j, \eta, \langle v_{hi} \rangle_\tau, S_{BA_j})$ – мощность j -го агрегата BA_j ; k_j – КПД агрегата; η – плотность воздуха (при нормальных условиях $\eta = 1,225$ кг/м³); $\langle v_{hi} \rangle_\tau$ – среднее значение скорости ветра для уровня h_i , вычисленное с помощью формул (7)-(9); S_{BA_j} – площадь ветрового потока агрегата BA_j .

Согласно [12], формула из (12) имеет вид:

$$W_j^{BA}(k_j, \eta, \langle v_{hi} \rangle_\tau, S_{BA_j}) = k_j \cdot \eta \cdot \langle v_{hi} \rangle_\tau^3 \cdot S_{BA_j} / 2 \quad [\text{Вт}]. \quad (13)$$

Этап 6. Исследование и создание базы знаний о преобразователях энергии воды в электрическую энергию (рис. 3).

Шаг 12. Формировать множество гидроагрегатов $GA = \{GA_j \mid j \in N_{GA}\}$, где каждый j -ый агрегат GA_j представляет собой комплект, составленный из конструктивно совместимых одиночных преобразователей энергии воды в электрическую; $N_{GA} = \{1, 2, \dots, n_{GA}\}$ – множество номеров агрегатов; n_{GA} – число агрегатов. Здесь комплект может состоять из одного, или группы, одинаковых или разных по типу преобразователей.

Шаг 13. Формировать множество расчетных формул, каждая j -ая формула которого однозначно соответствует j -му элементу множества агрегатов GA:

$$\{W_j^{GA}(k_j, Q_j, H_j) \mid j \in N_{GA}\}, \quad (14)$$

где $W_j^{GA}(k_j, Q_j, H_j)$ – мощность j -го агрегата GA_j ; k_j – КПД агрегата; Q_j – расход воды, протекающей через турбину; H – напор турбины.

Согласно [12], формула из (14) имеет вид

$$W_j^{GA}(k_j, Q_j, H_j) = 9810 \cdot Q_j \cdot H_j \cdot k_j \quad [\text{Вт}]. \quad (15)$$

Этап 7. Разработка эффективных, с точки зрения структурной, функциональной надежности и стоимости (самоокупаемости), автономных распределенных гибридных энергокомплексов и систем управления энергетическим балансом в них.

На данном этапе решается ряд следующих задач:

- синтез оптимальной структуры РГСГ, обеспечивающей требуемый уровень генерируемой мощности (1) W_r и минимальную стоимость;

- определение суммарной емкости $C_{\text{АКБ}}$ системы АКБ с минимальной стоимостью, и обеспечивающей управляемость энергетического баланса в системе АРГЭК;

- синтез оптимальной структуры ЛС, обеспечивающей требуемый уровень структурной и функциональной надежности, минимум потери мощности (4) $\Delta W_{\text{ЛС}}$ при ее транспортировке и распределении по потребителям, и минимальную стоимость;

- разработка системы управления энергетическим балансом в системе АРГЭК.

Замечание. Первая задача из вышеприведенного списка, т.е. синтез оптимальной структуры РГСГ, рассматривается ниже, а остальные вынесены за рамки настоящей работы.

Формальная постановка задачи синтеза РГСГ.

Очевидно, что с увеличением высоты увеличивается скорость ветра, а значит, и энергия воздушного потока. Поэтому каждую ветряную станцию ВС следует выполнять в виде вышки, разбитую по высоте на уровни (УР) (рис. 2). При этом номера уровней образуют множество $N_{\text{ур}} = \{0, 1, \dots, x_{\text{ур}}\}$, где $x_{\text{ур}}$ – количество уровней; номеру 0 соответствует уровень h_0 измерения скорости ветра v_{h_0} на метеостанции (7)-(9).

Для каждого i -го уровня ВС выбирается один-единственный j -й агрегат BA_j из подмножества альтернативных $F_{BA}(i)$, или же ничего не выбирается (здесь: $i \in N_{\text{ур}}$; $j \in F_{BA}(i) \subseteq N_{BA}$). Для примера, приведенного на рис. 2, имеем:

$$\begin{aligned} i \in N_{\text{ур}} &= \{1, 2, \dots, x_{\text{BC}}\}; \\ j \in F_{BA}(i) &= \{j_1, j_2, j_3\} \subseteq N_{BA} = \{1, 2, \dots, n_{BA}\}. \end{aligned}$$

Для каждого i -го створа реки выбирается один-единственный j -й агрегат GA_j из подмножества альтернативных $F_{GA}(i)$, или же ничего не выбирается (здесь: $i \in N_{\text{ГГ}}$; $j \in F_{GA}(i) \subseteq N_{GA}$). Для примера, приведенного на рис. 3, имеем:

$$\begin{aligned} i \in N_{\text{ГГ}} &= \{1, 2, \dots, n_{\text{ГГ}}\}; \\ j \in F_{GA}(i) &= \{j_1, j_2, j_3\} \subseteq N_{GA} = \{1, 2, \dots, n_{GA}\}. \end{aligned}$$

На основе вышесказанных формул (1)-(15) и иллюстративных рисунков 1, 2, 3, запишем формальную постановку задачи синтеза РГСГ в следующей форме.

Целевая функция J :

$$J = J_{\text{вГ}} + J_{\text{ГГ}} + J_{\text{СБ}}, \quad (16)$$

где
$$J_{BG} = \left[\sum_{i=1}^{x_{yp}} \left(\sum_{j \in F_{BA}(i)} C_j^{BA} \cdot x_{ij}^{BA} \right) + C_{BC}(h_{x_{yp}}) + C_{\Delta S} \right] \cdot x_{BC}, \quad (17)$$

$$J_{IG} = \sum_{i \in N_{IG}} \sum_{j \in F_{GA}(i)} C_j^{GA} \cdot x_{ij}^{GA}, \quad (18)$$

$$J_{CB} = C_{CB} \cdot x_{CB}.$$

Система ограничений:

$$W_{BG} + W_{IG} + W_{CB} \geq \langle W_{I\Delta} \rangle_{\tau}, \quad (19)$$

$$W_{BG} = \left[\sum_{i=1}^{x_{yp}} \sum_{j \in F_{BA}(i)} (W_j^{BA}(k_j, \eta, \langle v_{hi} \rangle_{\tau}, S_j^{BA}) - \Delta W_j^{BA}) \cdot x_{ij}^{BA} \right] \cdot x_{BC}, \quad (20)$$

$$W_{IG} = \sum_{i \in N_{IG}} \left[\left(\sum_{j \in F_{GA}(i)} W_j^{GA}(k_j, Q_j, H_j) \cdot x_{ij}^{GA} \right) - \langle \Delta W_i^{GA} \rangle_{\tau} \right], \quad (21)$$

$$W_{CB} = \langle W_{CB}^1 \rangle_{\tau} \cdot x_{CB}, \quad (22)$$

$$\left(\sum_{j \in F_{BA}(i)} x_{ij}^{BA} \right) \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N_{yp} = \{1, 2, \dots, x_{yp}\}, \quad (23)$$

$$\left(\sum_{j \in F_{GA}(i)} x_{ij}^{GA} \right) \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N_{IG} = \{1, 2, \dots, n_{IG}\}. \quad (24)$$

$$\begin{cases} x_{yp} \in N = \{1, 2, \dots\}, \\ x_{BC} \in N = \{1, 2, \dots\}, \\ x_{CB} \in N = \{1, 2, \dots\}, \\ x_{ij}^{BA} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in F_{BA}(i), \quad \forall i \in N_{yp} = \{1, 2, \dots, x_{yp}\}, \\ x_{ij}^{GA} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in F_{GA}(i), \quad \forall i \in N_{IG} = \{1, 2, \dots, n_{IG}\}. \end{cases} \quad (25)$$

Неизвестные величины:

$$x_{yp}, x_{BC}, x_{CB}, \{x_{ij}^{BA} \mid j \in \Gamma_{BA}(i), i \in N_{yp}\}, \{x_{ij}^{GA} \mid j \in F_{GA}(i), i \in N_{IG}\} \quad (26)$$

Задача синтеза РГСГ. Найти такие значения неизвестных величин из (26), которые удовлетворяли бы систему ограничений (19)-(25), и обеспечили бы минимальное значение целевой функции (16), т.е. необходимо решить следующую задачу оптимизации:

$$\min_{\substack{\text{по переменным} \\ \text{из (26)}}} \{J \mid \text{при ограничениях (19)–(25)}\}. \quad (27)$$

Здесь: J – целевая функция – стоимость синтезируемой РГСГ;

$J_{ВГ}, J_{ГГ}, J_{СБ}$ – стоимость распределенной системы, соответственно, ветряных генераторов ВГ, гидрогенераторов ГГ, солнечных батарей СБ (16)-(18);

C_j^{BA} – стоимость $j \in F_{BA}(i)$ -го агрегата BA_j с номером j из подмножества альтернативных номеров $F_{BA}(i)$, соответствующее $i \in N_{yp}$ -му модулю (уровню) ВС (см. рис. 2);

$x_{ij}^{BA} \in \{0, 1\}$ – моделирует: если $x_{ij}^{BA} = 1$, то выбрать для i -го модуля агрегат BA_j , в противном случае (т.е. при $x_{ij}^{BA} = 0$) – отменить (x_{ij}^{BA} – неизвестная величина);

$C_{BC}(h_{x_{yp}})$ – стоимость вышки станции ВС, зависящая от высоты $h_{x_{yp}}$ $i = x_{yp}$ -го уровня (см. рис. 2);

$C_{\Delta S}$ – стоимость площадки ΔS , занимаемой станцией ВС (см. рис. 2);

x_{BC} – количество станций ВС (неизвестная величина);

C_j^{GA} – стоимость $j \in F_{GA}(i)$ -го агрегата GA_j с номером j из подмножества альтернативных номеров $F_{GA}(i)$, соответствующее $i \in N_{ГГ}$ -му створу реки (см. рис. 3);

$x_{ij}^{GA} \in \{0, 1\}$ – моделирует: если $x_{ij}^{GA} = 1$, то выбрать для i -го створа реки агрегат GA_j , в противном случае (т.е. при $x_{ij}^{GA} = 0$) – отменить (x_{ij}^{GA} – неизвестная величина);

$C_{СБ}$ – стоимость одной панели системы солнечных батарей СБ;

$x_{СБ}$ – количество панелей системы СБ (неизвестная величина);

выражение (19) – требование к суммарной генерируемой мощности распределенной гибридной системой РГСГ, состоящей из ВГ, ГГ, СБ (см. (1)-(15) и рисунки 1, 2, 3);

выражения (20)-(22) – мощности, вырабатываемые системами, соответственно, ВГ, ГГ, СБ; $\Delta W_j^{BA}, \Delta W_i^{GA}$ – мощности на собственные нужды агрегатов, соответственно, BA_j, GA_i (см. (1)-(15) и рисунки 1, 2, 3);

выражение $\left(\sum_{j \in F_{BA}(i)} x_{ij}^{BA} \right) \in \{0, 1\}$ из (23) – моделирует: установлен ли в i -ый модуль ВС хоть один агрегат BA_j с номером j из подмножества альтернативных номеров $F_{BA}(i)$;

выражение $\left(\sum_{j \in F_{GA}(i)} x_{ij}^{GA} \right) \in \{0, 1\}$ из (24) – моделирует: установлен ли в i -ый створ реки хоть один агрегат GA_j с номером j из подмножества альтернативных номеров $F_{GA}(i)$.

Заключение. Таким образом, в данной работе были рассмотрены следующие вопросы: исследование и создание базы статистических данных об электрических нагрузках потребителей, о скорости ветра рассматриваемого региона, о гидроэнергетических ресурсах горных и равнинных рек, о солнечной энергии, а также исследование и создание базы знаний о преобразователях энергии ветра и энергии воды в электрическую энергию. Была рассмотрена задача синтеза оптимальной структуры распределенной гибридной системы генерации, обеспечивающей требуемый уровень генерируемой мощности и минимальную стоимость.

Была предложена обобщенная схема методики проектирования автономных распределенных гибридных энергокомплексов и управление энергетическим балансом в них. То есть, в работе делается начальная попытка формализации вышеуказанных вопросов с целью дальнейшей углубленной детализации и создания универсальной системы автоматизированного проектирования (САПР) АРГЭК.

В дальнейшем, при разработке САПР АРГЭК, будет использован математический аппарат вычислительных сетей Петри [7, 8], который является дальнейшим развитием классической теории сетей Петри. [9],

Благодарность. Авторы выражают особую благодарность Асанову Мурату Сатаркуловичу, кандидату технических наук, доценту кафедры «ТОЭ и ОЭ» Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, за важнейшие советы и консультации в области технической кибернетики.

Литература:

1. Люкайтис В.Ю., Глушков С.Ю. Автономные энергокомплексы, гибридные конструкции с применением возобновляемых источников энергии // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. 2019. Т.2 Вып.2. С. 111-120.
2. Велькин В. И. Методология расчета комплексных систем ВИЭ для использования на автономных объектах. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 226 с.
3. Попель О.С. Возобновляемые источники энергии: роль и место в современной и перспективной энергетике // Рос. Хим.ж., Т. LII, No6. 2008.- С.95-105.
4. Баринаева В.А., Ланьшина Т.А. Особенности развития возобновляемых источников энергии в России и в мире // Российское предпринимательство. – 2016. – Т.17. – №2. – С. 259-270.
5. Бакасова А.Б., Ниязова Г.Н., Сатаркулов Т.К., Бузурманкулова Ч.М., Дюшеева Ч.К. Применение сред MatLab и Labview для демонстрации динамического поведения гидроагрегата нового типа // Проблемы автоматизации и управления: науч.-техн. журн. НАН КР. – Бишкек: ИАИТ, 2019. – №1(36). – С. 30-39.
6. Акчалов Ш.А., Рыскулов Р.Р., Толукбаев Ш.К. Динамическая характеристика ветротурбины, работающей при малых скоростях ветра // Проблемы автоматизации и управления: науч.-техн. журн. НАН КР. – Бишкек: ИАИТ, 2015. –№2(29). – С. 90-95.
7. Асанов М.С., Асанова С.М., Сатаркулов К.А. Структурная модель вычислительных сетей Петри // Известия КГТУ. – Бишкек, 2008. – №13. – С. 78-85.
8. Асанов М.С., Асанова С.М., Сатаркулов К.А. Вычислительные компоненты, язык описания и правила функционирования вычислительных сетей Петри // Известия КГТУ.–Бишкек, 2008.–№13.–С.85-95.
9. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 160 с.
10. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
11. <https://seiger.pp.ua/zavisimost-skorosti-vetra-ot-vysoty-i-mestnosti/> (дата обращения: 05.12.2019).
12. <http://vetrodvig.ru/moshhnost-vetrogeneratora-vetrovojj-turbiny-raschet-otnositelno-skorosti-vetra/> (дата обращения: 05.12.2019).