УДК: 621.311.1:502.172.3

С.М. Асанова[1], a_sm07@kstu.kg, Т.Ж. Жабудаев[1], Д.У. Асанова[2], М.С. Асанов[1], А.Б. Калмурзаев[2], К. Сатаркулов[2], satarkulov46k@mail.ru
[1]КГТУ им. И.Раззакова,
[2]Институт машиноведения и автоматики НАН КР

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ БАЛАНСОМ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСАХ

Принятая в настоящей работе структура системы накопления и распределения потоков мощностей НРПМ позволяет обеспечить простоту изменения ее конфигурации путем добавления/исключения в ее состав тех или иных компонентов (балластные источники БИ, балластные нагрузки БН, генерирующие установки с ВИЭ и нагрузи разного типа), а также добавление/исключение возможности взаимодействия НРПМ с глобальной сетью ГС. Для принятой структуры построена математическая модель с учетом ситуаций, возникающих в процессе циркуляции потоков в системе НРПМ, сформулирована задача синтеза алгоритма оптимального ситуационного управления АОСУ энергетическим балансом в ней и предложена схема ее решения, которая позволяет получить многоуровневый алгоритм $G_{АОСУ,\vartheta_m}$, $m = 0, 1, \ldots, M-1$, состоящий из последовательно функционирующих алгоритмов, т.е. $G_{АОСУ,\vartheta_m}$: $G_{ШСР,\vartheta_m} \xrightarrow{i_{зап}^{(1)}(\vartheta_m)} G_{АКБ1,\vartheta_m} \xrightarrow{i_{зап}^{(2)}(\vartheta_m)} G_{АКБ2,\vartheta_m} \xrightarrow{i_{зап}^{(3)}(\vartheta_m)} G_{БИ,БН,\vartheta_m} \xrightarrow{i_{ГС}^{(-,-)}(\vartheta_m)}$, выполняющих следующие функции: $G_{ШСР,\vartheta_m}$ – поддержание текущей величины напряжения конденсатора $u_{ШСР}(\theta_m)$ (узла – шины сборки и распределения ШСР) путем выдачи оптимального управляющего воздействия в виде балансирующего тока $i_{зап}^{(1)}(\theta_m)$; $G_{АКБ1,\vartheta_m}$, $G_{АКБ2,\vartheta_m}$, $G_{БИ,БН,\vartheta_m}$ – оптимальные ситуационные алгоритмы для последовательной реализации балансирующего тока $i_{зап}^{(1)}(\theta_m)$ с использованием элементов системы НРПМ, соответственно, (АКБ1(1), АКБ1(2)), (АКБ2(1), АКБ2(2)), (БИ, БН) с целью поддержания перетока $i_{ГС}^{(+,-)}(\theta_m)$ между ГС и НРПМ в окрестности номинального $i_{ГС}^{ном}(\theta_m)$. Алгоритм $G_{АОСУ,\vartheta_m}$ обладает, что при подборе и изменении конфигурации системы НРПМ на этапе проектирования систем АРГЭК для различных регионов с соответствующими им ВИЭ его структура легко модифицируется, что важно при создании системы автоматизированного проектирования автоматизированных распределенных гибридных энергокомплексов АРГЭК.

***Ключевые слова*:** автоматизированные распределенные гибридные энергокомплексы; возобновляемые источники энергии; интеллектуальные системы; надежность; энергетический баланс; аккумуляторная батарея; мощность; алгоритм; оптимизация; прогнозирование; ситуация; управление.

Введение

На современном этапе одной из важнейших задач развития экономики регионов тех или иных стран (в частности, Кыргызской Республики) является повышение эффективности работы их систем электроэнергетики. Этого можно достичь, решив множество задач, возникающих при проектировании и эксплуатации электроэнергетической системы.

Приоритетным и перспективным направлением развития и повышения эффективности современной энергетики является разработка и внедрение региональных автоматизированных распределенных гибридных энергокомплексов (АРГЭК) с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), функционирующих во взаимодействии с глобальной (общегосударственной) сетью (ГС) [1]. Частный случай, когда система АРГЭК не имеет доступа к ГС, рассмотрена, например, в работах [2-4].

В вышеуказанной работе [1] разработано и приведено содержательное описание методики проектирования интеллектуальных систем АРГЭК, включающее в себя следующие этапы:

- разработка структуры распределенной гибридной системы генерации (РГСГ), состоящая, в свою очередь, из распределенных систем ветряных генераторов (ВГ), гидрогенераторов (ГГ) и солнечных батарей (СБ), вырабатываемые мощности которых

передаются с помощью двухпроводной локальной сети ($ЛС_{РГСГ}$) с древовидной структурой, где корнем графа сети является шина сборки и распределения (ШСР) системы накопления и распределения потоков мощностей (НРПМ), а концевыми узлами – узлы присоединения генерирующих агрегатов с системы солнечных батарей. В работе [5] рассмотрена задача синтеза оптимальной структуры системы РГСГ, обеспечивающей требуемый уровень генерируемой мощности, минимальную стоимость и необходимую функциональную надежность. В работе [6] рассмотрена задача автоматического распознавания обрыва провода на участках локальной сети $ЛС_{РГСГ}$, построенной с использованием многофункционального провода, состоящего из силового провода и изолированной жилы информационного провода [7];

- разработка трехфазной сложнозамкнутой локальной сети $ЛС_{ПЭ}$ со следующими свойствами: с заданным уровнем надежности; распознающей обрывы проводов на ее участках [6]; с управляемой структурой, позволяющей изменять маршруты движения потоков мощностей от узла ШСР до распределенных потребителей энергии (ПЭ) при существенных изменениях нагрузок в тех или иных узлах нагрузки, а также при обрывах линий отдельных участков с целью минимизации потерь мощности в рассматриваемой сети $ЛС_{ПЭ}$ [8];

- разработка структуры управляемой системы накопления и распределения потоков мощностей (НРПМ) с целью обеспечения физической реализуемости и повышения надежности процесса управления энергетическим балансом в нем [9]. При этом обеспечение физической реализуемости процесса управления энергетическим балансом, т.е. поддержание текущей потребляемой мощности потребителями в окрестности требуемой номинальной мощности, достигается за счет поддержания напряжения конденсатора, подключенного к узлу ШСР, в окрестности номинального, а повышение надежности – за счет подключения к узлу ШСР накопителя АКБ с двухуровневой двухконтурной структурой АКБi(j), $i \in \{1,2\}$, $j \in \{1,2\}$, где i – номер уровня; j – номер контура; АКБ1(j), $j \in \{1,2\}$ – двухконтурный накопитель 1-го уровня для управления балансом мощностей в НРПМ при номинальном режиме АРГЭК, при изменении мощностей ВИЭ и потребления в пределах их доверительных интервалов, оцененных на этапе проектирования; АКБ2(j), $j \in \{1,2\}$ – двухконтурный накопитель 2-го уровня для согласования режимов работ НРПМ и ГС и для управления совместно с накопителем АКБ1(j), $j \in \{1,2\}$ 1-го уровня, ГС, ДГ, БН, балансом мощностей в НРПМ при аварийном режиме АРГЭК, а также при выходе мощностей ВИЭ и потребления за пределы их доверительных интервалов. При этом поочередная работа параллельных контуров в режиме зарядки/разрядки продлевает срок службы системы АКБ.

Настоящая работа основывается на работах [1,5,6,8,9,10,16], является дальнейшим их развитием и посвящена разработке алгоритма оптимального ситуационного управления энергетическим балансом в управляемой системе НРПМ с целью поддержания текущей потребляемой мощности региональными потребителями в окрестности требуемой номинальной, а также поддержания текущего перетока мощности между НРПМ и ГС в окрестности заданной величины для сохранения динамической устойчивости электроэнергетической системы (ЭЭС) в целом (при существенных отклонениях возможно обрушение энергосистемы вплоть до «блекаута») с использованием математического аппарата вычислительных сетей Петри (ВСП) [13-15].

1. Функциональная схема замкнутой цифровой системы управления энергетическим балансом в управляемой системе НРПМ

Как было сказано выше, в работе [9] произведен выбор и обоснование структуры системы НРПМ как объекта управления с позиции обеспечения физической реализуемости и повышения надежности процесса управления энергетическим балансом в ней, где предложенная структура обеспечивает простоту изменения ее конфигурации путем

добавления и исключения элементов в зависимости от мощности ВИЭ в рассматриваемых регионах. Такая структура является также удобной при разработке систем автоматизированного проектирования (САПР) замкнутых цифровых систем управления сложными электросетевыми комплексами как при нормальных, так и при аварийных режимах ее функционирования.

Построение алгоритма оптимального ситуационного управления (АОСУ) энергетическим балансом в управляемой системе НРПМ производится в рамках структуры замкнутой цифровой системы управления, функциональная схема которой показана на рисунке 1.

1.1. *Управляемая система НРПМ* (объект управления) на рисунке 1 представлена в виде графа ее структуры [1], где:

- $\theta_m,\ m = 0, 1, 2 \ldots$ – дискретные моменты времени с дискретой $\Delta\theta$;

- $i_{\text{Г}}(\theta_m)$ – неуправляемый ток, соответствующий неуправляемой суммарной мощности $W_{\text{Г}}(\theta_m)$:

$$W_{\text{Г}}(\theta_m) = W_{\text{ВГ}}(\theta_m) + W_{\text{СБ}}(\theta_m) + W_{\text{ГГ}}(\theta_m), \tag{1}$$

вырабатываемой системой РГСГ, состоящей из региональных распределенных систем ветряных генераторов ВГ, солнечных батарей СБ и гидрогенераторов ГГ. Ток $i_{\text{Г}}(\theta_m)$ имеет стохастический (непредсказуемый) характер ввиду стохастичности ВИЭ. Для снятия проблемы синхронизации мощностей переменного тока, вырабатываемых генерирующими агрегатами системы РГСГ, они преобразованы в мощности постоянного тока;

- $i_{\text{П}}(\theta_m)$ – неуправляемый ток, соответствующий неуправляемой суммарной потребляемой мощности переменного тока $W_{\text{П}}(\theta_m)$:

$$W_{\text{П}}(\theta_m) = \sum_{j \in N_{\text{ПЭ}}} W_{\text{ПЭ}j}(\theta_m) + \Delta W_{\text{ЛС}}(\theta_m), \tag{2}$$

потребляемой подмножеством электроприборов, случайным образом формирующимся из элементов некоторого универсального множества и подключающимся к узлам нагрузки трехфазной локальной сети $\text{ЛС}_{\text{ПЭ}}$, предназначенной для транспортировки мощности $W_{\text{П}}(\theta_m)$ до потребителей энергии (ПЭ), где $N_{\text{ПЭ}}$ – множество номеров узлов нагрузки $\text{ЛС}_{\text{ПЭ}}$; $W_{\text{ПЭ}i}(\theta_m)$ – мощность *j*-го узла нагрузки; $\Delta W_{\text{ЛС}}(\theta_m)$ – потеря мощности в $\text{ЛС}_{\text{ПЭ}}$. Потребляемый ток $i_{\text{П}}(\theta_m)$ имеет стохастический (непредсказуемый) характер ввиду стохастичности потребляемой мощности $W_{\text{П}}(\theta_m)$;

- $u_{\text{ШСР}}(\theta_m)$ – напряжение конденсатора с емкостью $\text{C}_{\text{ШСР}}$, подключенного к узлу ШСР и предназначенного для поддержания текущей потребляемой мощности $W_{\text{П}}(\theta_m)$ (тока $i_{\text{П}}(\theta_m)$) в окрестности номинального значения $W_{\text{П}}^{\text{ном}}(\theta_m)$ ($i_{\text{П}}^{\text{ном}}(\theta_m)$) путем поддержания текущего напряжения $u_{\text{ШСР}}(\theta_m)$ в окрестности номинального $u_{\text{ШСР}}^{\text{ном}}$;

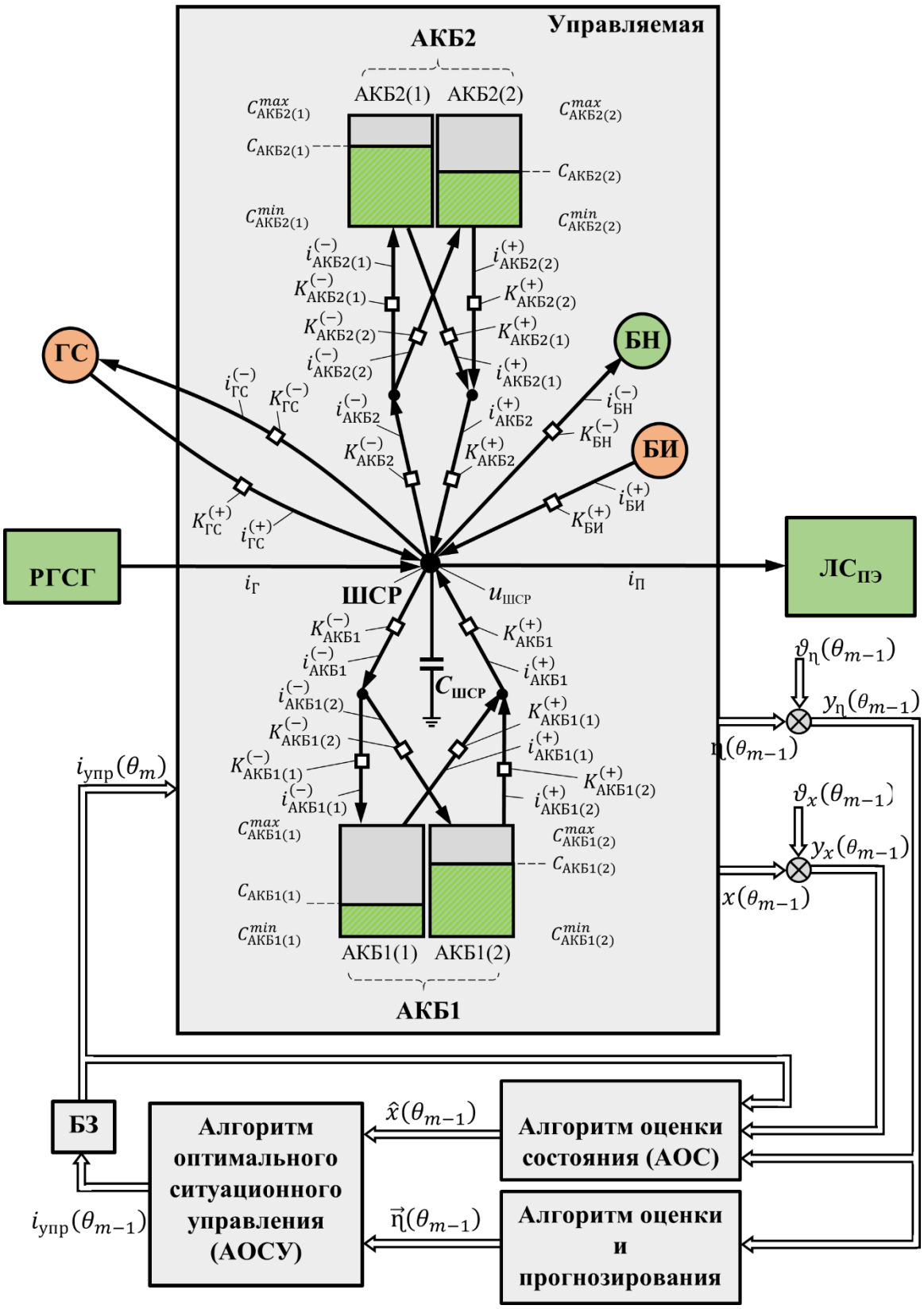


Рисунок 1 – Функциональная схема замкнутой цифровой системы управления энергетическим балансом в системе НРПМ

- $i^{(-)}_{\text{АКБ1}}(\theta_m)$, $i^{(-)}_{\text{АКБ1}}(\theta_m)$ – соответственно зарядный, разрядный управляемые токи системы аккумуляторных батарей 1-го уровня АКБ1, предназначенные для управления энергетическим балансом в управляемой системе НРПМ при нормальных режимах функционирования систем РГСГ, ЛС$_{ПЭ}$ и изменении потенциальных мощностей ВИЭ и

мощности потребления $W_{\text{П}}(\theta_m)$ в пределах их доверительных интервалов, оцененных на основе статических данных на этапе синтеза оптимальной структуры системы РГСГ [9]. Включение в режим зарядки/разрядки и отключение АКБ1 моделируется состоянием условных двухпозиционных ключей $K^{(-)}_{\text{АКБ1}}(\theta_m) \in \{0,1\}$, $K^{(-)}_{\text{АКБ1}}(\theta_m) \in \{0,1\}$ следующим образом: $K^{(-)}_{\text{АКБ1}}(\theta_m) = 1$, $K^{(-)}_{\text{АКБ1}}(\theta_m) = 0$ – режим зарядки; $K^{(-)}_{\text{АКБ1}}(\theta_m) = 0$, $K^{(-)}_{\text{АКБ1}}(\theta_m) = 1$ – режим разрядки; $K^{(-)}_{\text{АКБ1}}(\theta_m) = 0$, $K^{(-)}_{\text{АКБ1}}(\theta_m) = 0$ – отключение АКБ1 (0 – дуга графа отключена, 1 – включена);

- АКБ1(1), АКБ1(2) – две идентичные аккумуляторные батареи накопителя 1-го уровня АКБ1, поочередно работающие в режиме зарядки/разрядки;

- $i^{(-)}_{\text{АКБ1(1)}}(\theta_m)$, $i^{(-)}_{\text{АКБ1(2)}}(\theta_m)$ – соответственно зарядный управляемый ток 1-го контура АКБ1(1), разрядный управляемый ток 2-го контура АКБ1(2) накопителя 1-го уровня АКБ1, когда параллельные контуры АКБ1(1), АКБ1(2) работают в режиме соответственно зарядки, разрядки. Включение в данный режим моделируется состоянием условных двухпозиционных ключей $K^{(-)}_{\text{АКБ1(1)}}(\theta_m) \in \{0,1\}$, $K^{(-)}_{\text{АКБ1(1)}}(\theta_m) \in \{0,1\}$, $K^{(-)}_{\text{АКБ1(2)}}(\theta_m) \in \{0,1\}$, $K^{(-)}_{\text{АКБ1(2)}}(\theta_m) \in \{0,1\}$ следующим образом: $K^{(-)}_{\text{АКБ1(1)}}(\theta_m) = 1$, $K^{(-)}_{\text{АКБ1(1)}}(\theta_m) = 0$, $K^{(-)}_{\text{АКБ1(2)}}(\theta_m) = 0$, $K^{(-)}_{\text{АКБ1(2)}}(\theta_m) = 1$;

- $i^{(-)}_{\text{АКБ1(1)}}(\theta_m)$, $i^{(-)}_{\text{АКБ1(2)}}(\theta_m)$ – соответственно разрядный управляемый ток 1-го контура АКБ1(1), зарядный управляемый ток 2-го контура АКБ1(2) накопителя 1-го уровня АКБ1, когда параллельные контуры АКБ1(1), АКБ1(2) работают в режиме соответственно разрядки, зарядки. Включение в данный режим моделируется состоянием условных двухпозиционных ключей следующим образом: $K^{(-)}_{\text{АКБ1(1)}}(\theta_m) = 0$, $K^{(-)}_{\text{АКБ1(1)}}(\theta_m) = 1$, $K^{(-)}_{\text{АКБ1(2)}}(\theta_m) = 1$, $K^{(-)}_{\text{АКБ1(2)}}(\theta_m) = 0$;

- $C_{\text{АКБ1}(j)}(\theta_m)$, $C^{max}_{\text{АКБ1}(j)}$, $C^{min}_{\text{АКБ1}(j)}$, $j \in \{1,2\}$ – соответственно текущее состояние (остаточная емкость), полная емкость, минимальная емкость, характеризующая максимальную (допустимую) глубину разряда *j*-го контура АКБ1(*j*) накопителя 1-го уровня АКБ1.

- $i^{(-)}_{\text{АКБ2}}(\theta_m)$, $i^{(-)}_{\text{АКБ2}}(\theta_m)$ – соответственно зарядный, разрядный управляемые токи системы аккумуляторных батарей 2-го уровня АКБ2, предназначенные для управления энергетическим балансом в управляемой системе НРПМ совместно с управляемыми токами зарядки/разрядки системы АКБ1 1-го уровня, при аварийных режимах функционирования систем РГСГ, $\text{ЛС}_{\text{ПЭ}}$ и выходе потенциальных мощностей ВИЭ (1) и мощности потребления $W_{\text{П}}(\theta_m)$ (2) за пределы их доверительных интервалов, оцененных на основе статистических данных на этапе синтеза оптимальной структуры системы РГСГ [9]. Включение в режим зарядки/разрядки и отключение АКБ2 моделируется состоянием условных двухпозиционных ключей $K^{(-)}_{\text{АКБ2}}(\theta_m) \in \{0,1\}$, $K^{(-)}_{\text{АКБ2}}(\theta_m) \in \{0,1\}$ следующим образом: $K^{(-)}_{\text{АКБ2}}(\theta_m) = 1$, $K^{(-)}_{\text{АКБ2}}(\theta_m) = 0$ – режим зарядки; $K^{(-)}_{\text{АКБ2}}(\theta_m) = 0$, $K^{(-)}_{\text{АКБ2}}(\theta_m) = 1$ – режим разрядки; $K^{(-)}_{\text{АКБ2}}(\theta_m) = 0$, $K^{(-)}_{\text{АКБ2}}(\theta_m) = 0$ – отключение АКБ2 (0 – дуга графа отключена, 1 – включена);

- АКБ2(1), АКБ2(2) – две идентичные аккумуляторные батареи накопителя 2-го уровня АКБ2, поочередно работающие в режиме зарядки/разрядки;

- $i^{(-)}_{\text{АКБ2(1)}}(\theta_m)$, $i^{(-)}_{\text{АКБ2(2)}}(\theta_m)$ – соответственно зарядный управляемый ток 1-го контура АКБ2(1), разрядный управляемый ток 2-го контура АКБ2(2) накопителя 2-го уровня АКБ2, когда параллельные контуры АКБ2(1), АКБ2(2) работают в режиме соответственно зарядки, разрядки. Включение в данный режим моделируется состоянием условных двухпозиционных ключей $K^{(-)}_{\text{АКБ2(1)}}(\theta_m) \in \{0,1\}$, $K^{(-)}_{\text{АКБ2(1)}}(\theta_m) \in \{0,1\}$, $K^{(-)}_{\text{АКБ2(2)}}(\theta_m) \in \{0,1\}$,

$K^{(-)}_{\text{АКБ2(2)}}(\theta_m) \in \{0, 1\}$ следующим образом: $K^{(-)}_{\text{АКБ2(1)}}(\theta_m) = 1$, $K^{(-)}_{\text{АКБ2(1)}}(\theta_m) = 0$, $K^{(-)}_{\text{АКБ2(2)}}(\theta_m) = 0$, $K^{(-)}_{\text{АКБ2(2)}}(\theta_m) = 1$;

- $i^{(-)}_{\text{АКБ2(1)}}(\theta_m)$, $i^{(-)}_{\text{АКБ2(2)}}(\theta_m)$ – соответственно разрядный управляемый ток 1-го контура АКБ2(1), зарядный управляемый ток 2-го контура АКБ2(2) накопителя 2-го уровня АКБ2, когда параллельные контуры АКБ2(1), АКБ2(2) работают в режиме соответственно разрядки, зарядки. Включение в данный режим моделируется состоянием условных двухпозиционных ключей следующим образом: $K^{(-)}_{\text{АКБ2(1)}}(\theta_m) = 0$, $K^{(-)}_{\text{АКБ2(1)}}(\theta_m) = 1$, $K^{(-)}_{\text{АКБ2(2)}}(\theta_m) = 1$, $K^{(-)}_{\text{АКБ2(2)}}(\theta_m) = 0$;

- $C_{\text{АКБ2}(j)}(\theta_m)$, $C^{max}_{\text{АКБ2}(j)}$, $C^{min}_{\text{АКБ2}(j)}$, $j \in \{1, 2\}$ – соответственно текущее состояние (остаточная емкость), полная емкость, минимальная емкость, характеризующая максимальную (допустимую) глубину разряда *j*-го контура АКБ2(*j*) накопителя 2-го уровня АКБ2;

- $i^{(-)}_{\text{БИ}}(\theta_m)$, $i^{(-)}_{\text{БН}}(\theta_m)$ – соответственно управляемый ток, соответствующий управляемой резервной мощности $W^{(-)}_{\text{БИ}}(\theta_m)$, вырабатываемой балансирующим источником (БИ) энергии и управляемый ток, соответствующий управляемой мощности $W^{(-)}_{\text{БН}}(\theta_m)$, потребляемой резервной балансирующей нагрузкой БН. Здесь БИ и БН используются как резервные оборудования для управления энергетическим балансом в системе НРПМ совместно с АКБ1, АКБ2 при аварийных режимах функционирования систем РГСГ, ЛС$_{\text{ПЭ}}$ и при существенном выходе мощностей ВИЭ (1) и мощности потребления $W_{\text{П}}(\theta_m)$ (2) за пределы их доверительных интервалов, оцененных на основе статистических данных на этапе синтеза оптимальной структуры РГСГ [9]. Включение/отключение БН и БИ моделируется состоянием условных двухпозиционных ключей следующим образом: $K^{(-)}_{\text{БН}}(\theta_m) = 0$, $K^{(-)}_{\text{БИ}}(\theta_m) = 1$ – БН отключена, БИ включен; $K^{(-)}_{\text{БН}}(\theta_m) = 1$, $K^{(-)}_{\text{БИ}}(\theta_m) = 0$ – БН включена, БИ отключен; $K^{(-)}_{\text{БН}}(\theta_m) = 0$, $K^{(-)}_{\text{БИ}}(\theta_m) = 0$ – БН и БИ отключены.

- $i^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m)$, $i^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m)$ – соответственно управляемый ток, соответствующий управляемому перетоку мощности $W^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m)$ от ГС к НРПМ, управляемый ток, соответствующий управляемому перетоку мощности $W^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m)$ от НРПМ к ГС. При этом результирующий ток $i^{(-,-)}_{\text{ГС}}(\theta_m)$:

$$i^{(-,-)}_{\text{ГС}}(\theta_m) = K^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m) \cdot i^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m) - K^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m) \cdot i^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m) \quad (3)$$

должен соответствовать в каждый текущий момент времени θ_m заданному результирующему графику перетока мощности $W^{(-,-)}_{\text{ГС}}(\theta_m)$ между ГС и НРПМ для сохранения динамической устойчивости ЭЭС в целом. Включение в режимы перетока от ГС к НРПМ, от НРПМ к ГС и отключение НРПМ от ГС моделируется состоянием условных двухпозиционных ключей следующим образом: $K^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m) = 0$, $K^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m) = 1$ – переток от ГС к НРПМ; $K^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m) = 1$, $K^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m) = 0$ – переток от НРПМ к ГС; $K^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m) = 0$, $K^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m) = 0$ – отключение НРПМ от ГС;

- из вышесказанного следует, что приоритетность включения элементов системы НРПМ к процессу управления энергетическим балансом в ней отражает следующая последовательность:

$$\text{С}_{\text{ШСР}} \longrightarrow \text{АКБ1} \longrightarrow \text{АКБ2} \longrightarrow (\text{БИ}, \text{БН}) \longrightarrow \text{ГС}. \quad (4)$$

1.2. *Контур управления функциональной схемы замкнутой цифровой системы*, показанной на рисунке 1, в общем случае, включает:

- $x(\theta_m)$ – вектор состояния управляемой системы НРПМ:

$$x(\theta_m) = \left(u_{\text{ШСР}}(\theta_m),\ \ \mathrm{C}_{\text{АКБ1(1)}}(\theta_m), \mathrm{C}_{\text{АКБ1(2)}}(\theta_m), \mathrm{C}_{\text{АКБ2(1)}}(\theta_m), \mathrm{C}_{\text{АКБ2(2)}}(\theta_m)\right); \qquad (5)$$

- $\eta(\theta_m)$ – вектор возмущения, действующий на управляемую систему НРПМ:

$$\eta(\theta_m) = (i_{\Gamma}(\theta_m), i_{\Pi}(\theta_m)); \qquad (6)$$

- $y_x(\theta_m), y_\eta(\theta_m)$ – соответственно вектор наблюдения за состоянием $x(\theta_m)$ (5), вектор наблюдения за возмущением $\eta(\theta_m)$ (6):

$$y_x(\theta_m) = x(\theta_m) + \vartheta_x(\theta_m), \qquad (7)$$

$$y_\eta(\theta_m) = \eta(\theta_m) + \vartheta_\eta(\theta_m), \qquad (8)$$

где $\vartheta_x(\theta_m)$, $\vartheta_\eta(\theta_m)$ – векторы ошибок измерения с соответствующими размерностями;

- $i_{\text{упр}}(\theta_m)$ – вектор управления энергетическим балансом в управляемой системе НРПМ:

$$\begin{aligned} i_{\text{упр}}(\theta_m) = (&i^{(-)}_{\text{АКБ1(1)}}(\theta_m),\ i^{(-)}_{\text{АКБ1(1)}}(\theta_m),\ i^{(-)}_{\text{АКБ1(2)}}(\theta_m),\\ &i^{(-)}_{\text{АКБ1(2)}}(\theta_m),\ i^{(-)}_{\text{АКБ2(1)}}(\theta_m),\ i^{(-)}_{\text{АКБ2(1)}}(\theta_m),\ i^{(-)}_{\text{АКБ2(2)}}(\theta_m),\\ &i^{(-)}_{\text{АКБ2(2)}}(\theta_m),\ i^{(-)}_{\text{БН}}(\theta_m),\ i^{(-)}_{\text{БИ}}(\theta_m)); \end{aligned} \qquad (9)$$

- АОС – модуль в контуре управления, реализующий алгоритм $G_{\text{АОС},\theta_m}$ оценки состояния управляемой системы НРПМ. В каждый текущий момент времени θ_m на вход данного модуля поступают вектор наблюдения $y_x(\theta_m)$ (7) за вектором состояния $x(\theta_m)$ (5), вектор наблюдения $y_\eta(\theta_m)$ (8) за вектором возмущения $\eta(\theta_m)$ (6), вектор управления $i_{\text{упр}}(\theta_m)$ энергетическим балансом в управляемой системе НРПМ. Выходом является оптимальная оценка $\hat{x}(\theta_m)$ текущего вектора состояния $x(\theta_m)$ (5) системы НРПМ;

- АОП – модуль в контуре управления, реализующий алгоритм $G_{\text{АОП},\theta_m}$ оценки и прогнозирования вектора возмущения, действующего на управляемую систему НРПМ. В каждый текущий момент времени θ_m на вход данного модуля поступает вектор наблюдения $y_\eta(\theta_m)$ (8) за вектором возмущения $\eta(\theta_m)$ (6). Выходом является оценка текущего вектора возмущения (6) и его прогноз на определенный интервал времени:

$$\begin{aligned} \vec{\eta}(\theta_m) &= \{\hat{\eta}(\theta_l|\theta_m) \mid l \in \{m, m+1, \dots, m+M-1\}\} =\\ &= \{(\hat{\imath}_{\Gamma}(\theta_l|\theta_m), \hat{\imath}_{\Pi}(\theta_l|\theta_m)) \mid l \in \{m, m+1, \dots, m+M-1\}\}, \end{aligned} \qquad (10)$$

где θ_m, θ_{m-M-1} – соответственно начало, конец интервала времени оценки и прогнозирования; $\hat{\eta}(\theta_m) = \hat{\eta}(\theta_m|\theta_m)$ при $l = m$ – текущая оценка вектора возмущения (6); $\hat{\eta}(\theta_l|\theta_m)$, $l > m$ – прогноз вектора возмущения (6);

- АОСУ – модуль в контуре управления, реализующий структурно и логически самоорганизующегося многокомпонентного алгоритма оптимального ситуационного управления энергетическим балансом в управляемой системе НРПМ с целью поддержания тока $i_{\Pi}(\theta_m)$, соответствующего текущей потребляемой мощности $W_{\Pi}(\theta_m)$ (2) региональными потребителями, в окрестности номинального тока $i^{\text{ном}}_{\Pi}(\theta_m)$, соответствующего требуемой номинальной мощности $W^{\text{ном}}_{\Pi}(\theta_m)$, за счет поддержания текущего напряжения $u_{\text{ШСР}}(\theta_m)$ в окрестности номинального $u^{\text{ном}}_{\text{ШСР}}$, а также обеспечение равенства текущего результирующего тока $i^{(-,-)}_{\text{ГС}}(\theta_m)$ (3) заданному (желаемому) току $i^{(-,-)*}_{\text{ГС}}(\theta_m)$, соответствующему графику перетока мощности $W^{(-,-)*}_{\text{ГС}}(\theta_m)$ между ГС и НРПМ

для сохранения динамической устойчивости ЭЭС в целом. В каждый текущий момент времени θ_m на вход данного модуля поступают в общем случае вектор оптимальной оценки состояния $\hat{x}(\theta_m)$ из выхода модуля АОС, оценка и прогноз $\vec{\eta}(\theta_m)$ (10) вектора возмущения (6) из выхода АОП. Выходом является вектор управления $i_{\text{упр}}(\theta_m)$ (9). Тогда обобщенная структура алгоритма управления $G_{\text{АОСУ},\theta_m}$ примет следующий вид:

$$i_{\text{упр}}(\theta_m) = G_{\text{АОСУ},\theta_m}[\hat{x}(\theta_m),\ \vec{\eta}(\theta_m)]. \tag{11}$$

Такая структура соответствует многошаговой задаче оптимизации. При одношаговой задаче оптимизации необходимость в решении задачи прогнозирования вектора возмущения (6) отпадает. Тогда структура алгоритма примет следующий вид:

$$i_{\text{упр}}(\theta_m) = G_{\text{АОСУ},\theta_m}[\hat{x}(\theta_m),\ \hat{\eta}(\theta_m)], \tag{12}$$

где $\hat{\eta}(\theta_m) = (\hat{i}_{\Gamma}(\theta_m), \hat{i}_{\Pi}(\theta_m))$ – оценка текущего вектора возмущения (6). Если же ошибки измерения цифровых датчиков существенно малы, то:

$$i_{\text{упр}}(\theta_m) = G_{\text{АОСУ},\theta_m}[x(\theta_m),\ \eta(\theta_m)], \tag{13}$$

т.е. необходимость в решении задач оценки векторов состояния (5), возмущения (6) отпадает.

- БЗ – блок задержки, моделирующий время запаздывания $\tau_{\text{КУ}}$ в контуре управления (КУ), т.е. время $\tau_{\text{КУ}}$ от момента фиксации (измерения) $\theta_m - \tau_{\text{КУ}}$ вектора текущей информации:

$$y_{\text{КУ}}(\theta_m - \tau_{\text{КУ}}) = (y_x(\theta_m - \tau_{\text{КУ}}),\ y_{\eta}(\theta_m - \tau_{\text{КУ}})) \tag{14}$$

до момента θ_m реализации вектора управляющих воздействий $i_{\text{упр}}(\theta_m)$ (9), определенного, на основе информации $y_{\text{КУ}}(\theta_m - \tau_{\text{КУ}})$ (14), (5), (6), с помощью вычислительных алгоритмов:

$$G_{\text{КУ},\theta_m - \tau_{\text{КУ}}} : G_{\text{АОС},\theta_m - \tau_{\text{КУ}}} \longrightarrow G_{\text{АОП},\theta_m - \tau_{\text{КУ}}} \longrightarrow G_{\text{АОСУ},\theta_m - \tau_{\text{КУ}}} \tag{15}$$

реализованных на одной микропроцессорной системе. При этом величина запаздывания $\tau_{\text{КУ}}$ зависит от структуры организации процесса передачи информации $y_{\text{КУ}}(\theta_m - \tau_{\text{КУ}})$ (14) по цифровому каналу связи и вычислительного процесса при реализации алгоритма $G_{\text{КУ},\theta_m - \tau_{\text{КУ}}}$ (15), а также зависит от следующих параметров: от размерностей $r_{y_{\text{КУ}}} == r_{y_x} + r_{y_{\eta}} = |y_x| + |y_{\eta}|$, $r_{i_{\text{упр}}} = |i_{\text{упр}}|$, соответственно, векторов $y_{\text{КУ}}$ (14), $i_{\text{упр}}$ (9); от количества вычислительных операций $O_{G_{\text{КУ}}} = O_{G_{\text{АОС}}} + O_{\text{АОП}} + O_{\text{АОСУ}}$ алгоритма (15); от длины $n_{\text{код}}$ кодовой комбинации $(n_{\text{код}}, k_{\text{код}})$ кода контролирующих ошибки, используемого для передачи каждого элемента векторов y, $i_{\text{упр}}$ по цифровому каналу, где $k_{\text{код}}$ – число информационных символов первичного кода цифрового датчика, от которого зависит точность квантования по уровню измеряемой величины;

- условие физической реализуемости процесса, протекающего в контуре управления, на цифровых устройствах в дискретные моменты времени θ_m, $m = 0, 1, 2, \ldots$ с дискретой $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta \geq \tau_{\text{КУ}}. \tag{16}$$

- системное быстродействие цифрового контура управления определяется парой $(\Delta\theta,\ \tau_{\text{КУ}})$.

Далее примем $\Delta\theta = \tau_{\text{КУ}}$, что соответствует режиму запаздывания на один такт дискретного времени θ_m, $m = 0, 1, 2, \ldots$ с дискретой

$$\Delta\theta = \theta_{m-1} - \theta_m = \tau_{\text{КУ}}. \tag{17}$$

2. Формулировка задачи синтеза алгоритма оптимального ситуационного управления энергетическим балансом в управляемой системе НРПМ

Здесь рассматривается задача разработки (синтеза) модуля АОСУ в рамках структуры замкнутой цифровой системы управления (ЗЦСУ) энергетическим балансом в управляемой системе НРПМ, функциональная схема которой показана на рисунке 1. Формулируется исходная содержательная постановка задачи синтеза модуля АОСУ на основе вышеприведенного описания функциональной схемы ЗЦСУ при предположении, что текущая исходная информация об оценке и прогнозирования $\hat{x}(\theta_m)$, $\vec{\eta}(\theta_m)$ определена.

Задача 1 – исходная содержательная постановка задачи синтеза. Найти алгоритм цифрового управления $G_{\text{АОСУ},\varepsilon_m}$ в виде (11), вырабатывающий в каждый текущий момент времени θ_m, $m = 0, 1, 2, \ldots, \infty$ на основе текущей информации $\hat{x}(\theta_m)$, $\vec{\eta}(\theta_m)$, вектор управляющих воздействий $i_{\text{упр}}(\theta_m)$ (9) путем формирования текущей структуры управляемой системы НРПМ за счет выбора соответствующего состояния каждого ключа из множества $K_{\text{НРПМ}}$:

$$K_{\text{НРПМ}} = \Big\{K^{(-)}_{\text{АКБ1}}(\theta_m), K^{(-)}_{\text{АКБ1}}(\theta_m), K^{(-)}_{\text{АКБ1(1)}}(\theta_m), K^{(-)}_{\text{АКБ1(1)}}(\theta_m),\ K^{(-)}_{\text{АКБ1(2)}}(\theta_m),\ K^{(-)}_{\text{АКБ1(2)}}(\theta_m),$$

$$K^{(-)}_{\text{АКБ2}}(\theta_m),\ K^{(-)}_{\text{АКБ2}}(\theta_m),\ K^{(-)}_{\text{АКБ2(1)}}(\theta_m),\ K^{(-)}_{\text{АКБ2(1)}}(t_m),\ K^{(-)}_{\text{АКБ2(2)}}(\theta_m),\ K^{(-)}_{\text{АКБ2(2)}}(\theta_m),$$

$$K^{(-)}_{\text{БН}}(\theta_m),\ K^{(-)}_{\text{БИ}}(\theta_m),\ K^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m),\ K^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m)\Big\}, \tag{18}$$

и выбора величин токов вектора $i_{\text{упр}}(\theta_m)$ (9), соответствующих включенным дугам графа структуры НРПМ (отключенным дугам соответствуют токи с нулевым значением), *с целью* поддержания текущего потребляемого тока $i_{\text{П}}(\theta_m)$, соответствующего мощности потребления $W_{\text{П}}(\theta_m)$ (2), в окрестности номинального значения $i^{\text{ном}}_{\text{П}}(\theta_m)$, соответствующего номинальной мощности $W^{\text{ном}}_{\text{П}}(\theta_m)$, за счет поддержания текущего напряжения $u_{\text{ШСР}}(\theta_m)$ в окрестности номинального $u^{\text{ном}}_{\text{ШСР}} = const$, а также поддержания тока $i^{(-,-)}_{\text{ГС}}(\theta_m)$ в окрестности номинального $i^{\text{ном}}_{\text{ГС}}(\theta_m)$, характеризующего заданный график перетока мощности $W^{\text{ном}}_{\text{ГС}}(\theta_m)$ между ГС и НРПМ, для сохранения динамической устойчивости ЭЭС в целом, т.е. с целью обеспечения следующих соотношений ($\varepsilon_{\text{СШР}}, \varepsilon_{\text{ГС}}$ – допустимые величины отключения):

$$u^{\text{ном}}_{\text{ШСР}} - \varepsilon_{\text{ШСР}} \le u_{\text{ШСР}}(\theta_m) \le u^{\text{ном}}_{\text{ШСР}} + \varepsilon_{\text{ШСР}} \tag{19}$$

$$i^{\text{ном}}_{\text{ГС}}(\theta_m) - \varepsilon_{\text{ГС}} \le i^{(-,-)}_{\text{ГС}}(\theta_m) \le i^{\text{ном}}_{\text{ГС}}(\theta_m) + \varepsilon_{\text{ГС}}, \tag{20}$$

$$\forall m \in \{0, 1, 2, \ldots, \infty\},$$

с учетом следующих условий:

- модель состояния (напряжения) конденсатора, характеризующая баланс токов узла ШСР;
- модель процесса функционирования АКБ$i(j)$, $i \in \{1, 2\}$, $j \in \{1, 2\}$, ДГ, БН;
- условие физической реализуемости процесса, протекающего в контуре управления, на цифровых устройствах в дискретные моменты времени θ_m, $m = 0, 1, 2, \ldots$ с дискретой $\Delta\theta$.

Формальное описание этих условий приведено ниже, при разработке схемы решения данной задачи.

3. Схема решения задачи синтеза алгоритма оптимального ситуационного управления энергетическим балансом в управляемой системе НРПМ

Схема решения задачи синтеза модуля АОСУ, т.е. задачи 1, включает следующие этапы.

Этап 1 *– построение математической модели баланса токов в управляемой системе НРПМ.* Для синтеза модуля АОСУ строится математическая модель, описывающая состояние (напряжение) конденсатора в дискретные моменты времени, и характеризующая баланс токов узла ШСР:

$$u_{\text{ШСР}}(\theta_{m-1}) = u_{\text{ШСР}}(\theta_m) + \frac{\Delta\theta}{C_{\text{ШСР}}}\Big[\Big(K^{(-)}_{\text{АКБ1}}(\theta_m)\cdot i^{(-)}_{\text{АКБ1}}(\theta_m) - K^{(-)}_{\text{АКБ1}}(\theta_m)\cdot i^{(-)}_{\text{АКБ1}}(\theta_m)\Big) +$$
$$+\Big(K^{(-)}_{\text{АКБ2}}(\theta_m)\cdot i^{(-)}_{\text{АКБ2}}(\theta_m) - K^{(-)}_{\text{АКБ2}}(\theta_m)\cdot i^{(-)}_{\text{АКБ2}}(\theta_m)\Big) +$$
$$\Big(K^{(-)}_{\text{БИ}}(\theta_m)\cdot i^{(-)}_{\text{БИ}}(\theta_m) - K^{(-)}_{\text{БН}}(\theta_m)\cdot i^{(-)}_{\text{БН}}(\theta_m)\Big) +$$
$$+\Big(K^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m)\cdot i^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m) - K^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m)\cdot i^{(-)}_{\text{ГС}}(\theta_m)\Big)\Big] + \frac{\Delta\theta}{C_{\text{ШСР}}}\big(i_{\text{Г}}(\theta_m) - i_{\text{П}}(\theta_m)\big). \qquad (21)$$

Этап 2 *– учет информации в математической модели о приоритетности включения элементов НРПМ в процесс управления энергетическим балансом в ней.* Здесь, на основе исходного графа структуры управляемой системы НРПМ, показанного на рисунке 1, уравнения (21), характеризующего баланс токов относительно узла ШСР и понятия балансирующего тока, введенного в работе [9], строится структурированный эквивалентный граф с многоуровневой структурой в соответствии с информацией о приоритетности включения элементов НРПМ (4) в процесс управления энергетическим балансом в ней. Граф с таким свойством показан на рисунке 2, где произведена структуризация узла ШСР.

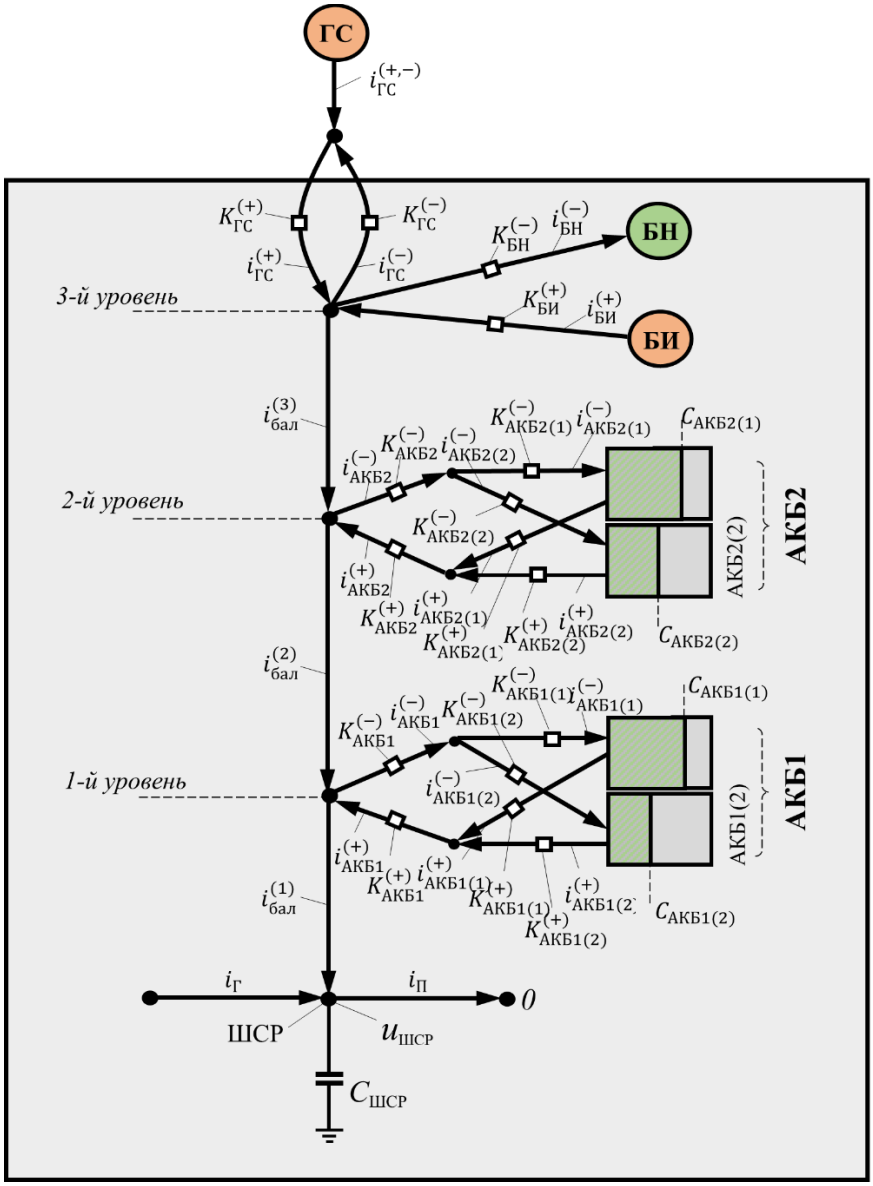


Рисунок 2 – Эквивалентный граф структуры управляемой системы НРПМ, содержащий информацию о приоритетности участия ее элементов в процессе управления энергетическим балансом в ней

В соответствии с многоуровневой структурой эквивалентного графа модель (21) представляется как модель с многоуровневой структурой:

- уравнение состояния (напряжения) узла ШСР – уравнение состояния (напряжения) конденсатора

$$u_{\text{ШСР}}(\theta_{m-1}) = u_{\text{ШСР}}(\theta_m) + \frac{\Delta\theta}{C_{\text{ШСР}}} \cdot i_{\text{бал}}^{(1)}(\theta_m) + \frac{\Delta\theta}{C_{\text{ШСР}}}\left(i_{\text{Г}}(\theta_m) - i_{\text{П}}(\theta_m)\right); \quad (22)$$

- уравнение баланса токов узла 1-го уровня

$$i_{\text{бал}}^{(1)}(\theta_m) = \left(K_{\text{АКБ1}}^{(-)}(\theta_m) \cdot i_{\text{АКБ1}}^{(-)}(\theta_m) - K_{\text{АКБ1}}^{(-)}(\theta_m) \cdot i_{\text{АКБ1}}^{(-)}(\theta_m)\right) + i_{\text{бал}}^{(2)}(\theta_m); \quad (23)$$

- уравнение баланса токов узла 2-го уровня

$$i_{\text{бал}}^{(2)}(\theta_m) = \left(K_{\text{АКБ2}}^{(-)}(\theta_m) \cdot i_{\text{АКБ2}}^{(-)}(\theta_m) - K_{\text{АКБ2}}^{(-)}(\theta_m) \cdot i_{\text{АКБ2}}^{(-)}(\theta_m)\right) + i_{\text{бал}}^{(3)}(\theta_m); \quad (24)$$

- уравнение баланса токов узла 3-го уровня

$$i_{бал}^{(3)}(\theta_m) = \left(K_{БИ}^{(-)}(\theta_m) \cdot i_{БИ}^{(-)}(\theta_m) - K_{БН}^{(-)}(\theta_m) \cdot i_{БН}^{(-)}(\theta_m)\right) + i_{ГС}^{(-,-)}(\theta_m); \quad (25)$$

- требование к перетоку (3) между ГС и управляемой системой НРПМ:

$$i_{ГС}^{ном}(\theta_m) = i_{ГС}^{(-,-)}(\theta_m), \quad (26)$$

где $i_{бал}^{(j)}(\theta_m)$, $j \in \{1,2,3\}$ – балансирующий ток *j*-го уровня иерархии.

Последовательная подстановка выражений (26) → (25) → (24) → (23) → (22) дает исходную модель (21), что свидетельствует об эквивалентности исходного графа (см. рис. 1) и структурированного многоуровневого графа (см. рис. 2) с позиции энергетического баланса, однако они не эквивалентны с позиции содержания в них информации о приоритетности включения элементов системы НРПМ (4) в процесс управления энергетическим балансом в ней.

Балансирующий ток 1-го уровня $i_{бал}^{(1)}(\theta_m)$ в уравнении (22) выступает как результирующее управляющее воздействие для поддержания напряжения $u_{ШСР}(\theta_m)$ узла ШСР в окрестности номинального $u_{ШСР}^{ном}$, а выражения (23) - (26) являются уравнениями реализации балансирующего тока $i_{бал}^{(1)}(\theta_m)$ путем формирования текущей структуры управляемой системы НРПМ за счет выбора соответствующих состояний условных ключей из (18) и выбора величин токов вектора управляющих воздействий $i_{упр}(\theta_m)$ (9), соответствующих включенным дугам (отключенным дугам соответствуют токи с нулевым значением).

Этап 3 *– учет запаздывания в контуре цифрового управления*. Уравнение напряжения конденсатора (узла ШСР) (22) записывается с учетом задержки на один такт (17) балансирующего тока $i_{бал}^{(1)}(\theta_m)$, за счет запаздывания вектора управляющих воздействий $i_{упр}(\theta_m)$ (9) в контуре управления КУ:

$$\begin{cases} u_{ШСР}(\theta_{m-1}) = u_{ШСР}(\theta_m) + \frac{\Delta\theta}{C_{ШСР}} \cdot i_{БЗ}(\theta_m) + \frac{\Delta\theta}{C_{ШСР}}\left(i_{Г}(\theta_m) - i_{П}(\theta_m)\right), \\ i_{БЗ}(\theta_{m-1}) = i_{бал}^{(1)}(\theta_m), \end{cases} \quad (27)$$

где $i_{БЗ}(\theta_m)$ – запоздавший на один такт дискретного времени балансирующий ток $i_{бал}(\theta_{m-1})$.

Этап 4 *– формирование уравнения состояния и требований к режимам зарядки/разрядки системы аккумуляторных батарей (см. рис. 2):*

- уравнение состояния аккумуляторных батарей АКБ*i*(*j*), $i \in \{1,2\}$, $j \in \{1,2\}$

$$C_{АКБi(j)}(\theta_{m-1}) = C_{АКБi(j)}(\theta_m) + \Delta\theta \cdot i_{АКБi(j)}^{(-)}(\theta_m) - \Delta\theta \cdot i_{АКБi(j)}^{(-)}(\theta_m), \quad (28)$$

где:

$$i_{АКБi(j)}^{(-)}(\theta_m) = K_{АКБi}^{(-)}(\theta_m) \cdot K_{АКБi(j)}^{(-)} \cdot i_{АКБi}^{(-)}(\theta_m), \quad (29)$$

$$i_{АКБi(j)}^{(-)}(\theta_m) = K_{АКБi}^{(-)}(\theta_m) \cdot K_{АКБi(j)}^{(-)} \cdot i_{АКБi}^{(-)}(\theta_m); \quad (30)$$

требования к режимам зарядки/разрядки аккумуляторных батарей АКБ*i*(*j*), $i \in \{1,2\}$, $j \in \{1,2\}$ [2]:

$$C_{АКБi(j)}^{min} \le C_{АКБi(j)}(\theta_m) \le C_{АКБi(j)}^{max}, \quad C_{АКБi(j)}^{min} = 0{,}3 \cdot C_{АКБi(j)}^{max}; \quad (31)$$

$$i^{(-)}_{\text{АКБ}i(j)}(\theta_m) \le 0{,}1 \cdot C^{max}_{\text{АКБ}i(j)}; \quad (32)$$

$$i^{(-)}_{\text{АКБ}i(j)}(\theta_m) \le 0{,}15 \cdot C^{max}_{\text{АКБ}i(j)}. \quad (33)$$

Этап 5 *– выявление и* анализ ситуаций *и построение графа переходов в двухконтурном накопителе (см. рис. 3)*. Здесь формируется набор ситуаций, возникающих в зависимости от состояний параллельных контуров (АКБ*i*(1), АКБ*i*(2)) двухконтурного накопителя АКБ*i*, $i \in \{1,2\}$, работающих поочередно в режиме зарядка/разрядка, даются их формальные определения, строится граф переходов из одной ситуации в другую и формулируются правила переключения параллельных контуров из одного режима работы в другой.

Ниже используется следующая конструкция системы обозначений:

$$\begin{cases} S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{R_{(a)}}/\frac{b}{R_{(b)}}\right), \\ a,b \in \{1,2\},\ (a,b) \in \{(1,2),(2,1)\}, \\ R_{(a)},R_{(b)} \in \left\{\uparrow,\downarrow,\overline{\uparrow},\underline{\downarrow}\right\}, \\ (R_{(a)}/R_{(b)}) \in \{(\uparrow/\downarrow),(\downarrow/\uparrow),(\overline{\uparrow}/\underline{\downarrow}),(\underline{\downarrow}/\overline{\uparrow}),(\overline{\uparrow}/\downarrow),(\uparrow/\underline{\downarrow}),(\underline{\downarrow}/\uparrow),(\downarrow/\overline{\uparrow})\}, \end{cases} \quad (34)$$

где $S(\cdot)$ – некоторая ситуация, возникающая в двухконтурном накопителе; *a*, *b* – номера контуров; $R_{(a)}, R_{(b)}$ – режимы функционирования контуров с номерами, соответственно, *a*, *b*; $\uparrow,\downarrow,\overline{\uparrow},\underline{\downarrow}$ – соответственно нормальный режим зарядки, нормальный режим разрядки, полная (предельная) зарядка, полная (предельная) разрядка соответствующего контура с номером *a* или *b*, т.е. контура АКБ*i*(*a*) или АКБ*i*(*b*); $*/*$ – некоторое обозначение (или предложение) $*$ в числителе косой черты соответствует контуру с номером *a*, т.е. контуру АКБ*i*(*a*), а некоторое обозначение (или предложение) $*$ в знаменателе косой черты – контуру с номером *b*, т.е. контуру АКБ*i*(*b*); $(\uparrow/\downarrow)$, $(\downarrow/\uparrow)$ – режимы соответственно полная зарядка/полная разрядка, (полная разрядка/полная зарядка); $(\overline{\uparrow}/\downarrow)$, $(\uparrow/\underline{\downarrow})$, $(\underline{\downarrow}/\uparrow)$, $(\downarrow/\overline{\uparrow})$ – режимы соответственно (полная зарядка/разрядка), (зарядка/полная разрядка), (полная разрядка/зарядка), (разрядка/полная зарядка).

Ниже, используя принятую конструкцию системы обозначения ситуаций (34), даются формальные определения всем возможным ситуациям, возникающим в процессе функционирования параллельных контуров (АКБ*i*(*a*), АКБ*i*(*b*)) двухконтурного накопителя АКБ*i*, $i \in \{1,2\}$.

Определение 1 – определение ситуаций, соответствующих нормальным режимам зарядки и разрядки параллельных контуров (АКБ*i*(*a*), АКБ*i*(*b*)):

- ситуация $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\uparrow}/\frac{b}{\downarrow}\right)$ называется нормальной при режиме $(\uparrow/\downarrow)$, если вектор состояния $(C_{\text{АКБ}i(a)}(\theta_m),\ C_{\text{АКБ}i(b)}(\theta_m))$ удовлетворяет следующему условию:

$$\left(C_{\text{АКБ}i(a)}(\theta_m) < C^{max}_{\text{АКБ}i(a)}/C_{\text{АКБ}i(b)}(\theta_m) > C^{min}_{\text{АКБ}i(b)}\right); \quad (35)$$

- ситуация $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\downarrow}/\frac{b}{\uparrow}\right)$ называется нормальной при режиме $(\downarrow/\uparrow)$, если

$$\left(C_{\text{АКБ}i(a)}(\theta_m) > C^{min}_{\text{АКБ}i(a)}/C_{\text{АКБ}i(b)}(\theta_m) < C^{max}_{\text{АКБ}i(b)}\right). \quad (36)$$

Определение 2 – определение ситуаций, соответствующих симметрично-предельным режимам зарядки и разрядки параллельных контуров (АКБ*i*(*a*), АКБ*i*(*b*)):

- ситуация $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\overline{\uparrow}}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right)$ называется симметрично-предельной при режиме $(\uparrow/\downarrow)$, если

$$\left(C_{\text{АКБ}i(a)}(\theta_m) = C^{max}_{\text{АКБ}i(a)}/C_{\text{АКБ}i(b)}(\theta_m) = C^{min}_{\text{АКБ}i(b)}\right); \quad (37)$$

- ситуация $S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\underline{\downarrow}}/\frac{b}{\overline{\uparrow}}\right)$ называется симметрично-предельной при режиме (↓/↑), если

$$\left(C_{\text{АКБ}i(a)}(\theta_m) = C_{\text{АКБ}i(a)}^{min}/C_{\text{АКБ}i(b)}(\theta_m) = C_{\text{АКБ}i(b)}^{max}\right). \quad (38)$$

Определение 3 – определение ситуаций, соответствующих асимметрично-предельным режимам зарядки и разрядки параллельных контуров (АКБ*i*(*a*), АКБ*i*(*b*)):

- ситуация $S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\overline{\uparrow}}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right)$ называется асимметрично-предельно/нормальной при режиме (↑/↓), если

$$\left(C_{\text{АКБ}i(a)}(\theta_m) = C_{\text{АКБ}i(a)}^{max}/C_{\text{АКБ}i(b)}(\theta_m) > C_{\text{АКБ}i(b)}^{min}\right); \quad (39)$$

- ситуация $S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\uparrow}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right)$ называется асимметрично-нормально/предельной при режиме (↑/↓), если

$$\left(C_{\text{АКБ}i(a)}(\theta_m) < C_{\text{АКБ}i(a)}^{max}/C_{\text{АКБ}i(b)}(\theta_m) = C_{\text{АКБ}i(b)}^{min}\right); \quad (40)$$

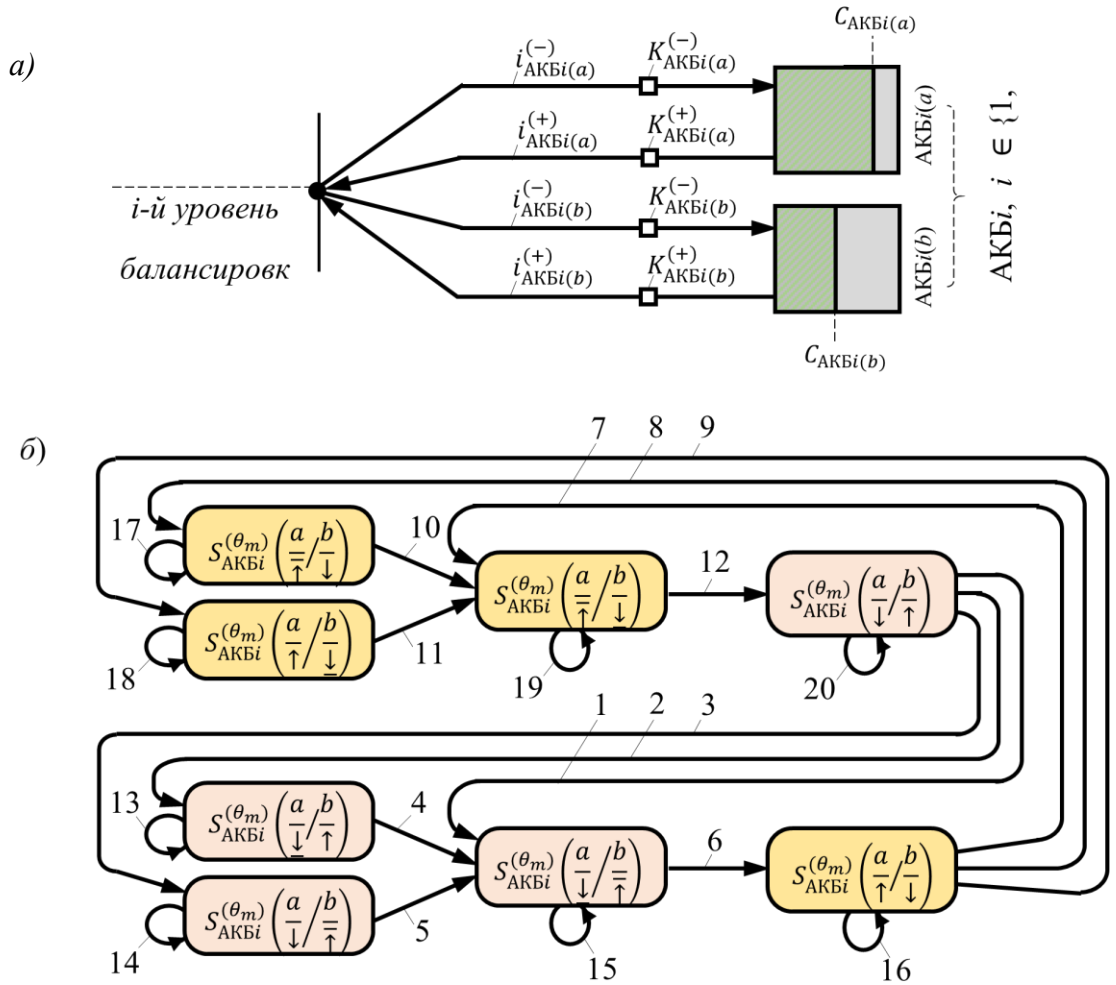
- ситуация $S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\underline{\downarrow}}/\frac{b}{\uparrow}\right)$ называется асимметрично-предельно/нормальной при режиме (↓/↑), если

$$\left(C_{\text{АКБ}i(a)}(\theta_m) = C_{\text{АКБ}i(a)}^{min}/C_{\text{АКБ}i(b)}(\theta_m) < C_{\text{АКБ}i(b)}^{max}\right); \quad (41)$$

- ситуация $S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\downarrow}/\frac{b}{\overline{\uparrow}}\right)$ называется асимметрично-нормально/предельной при режиме (↓/↑), если

$$\left(C_{\text{АКБ}i(a)}(\theta_m) > C_{\text{АКБ}i(a)}^{min}/C_{\text{АКБ}i(b)}(\theta_m) = C_{\text{АКБ}i(b)}^{max}\right). \quad (42)$$

Переход одной ситуации из набора ситуаций, удовлетворяющих условиям (35)-(42), в другую ситуацию того же набора отражает граф переходов, конкретная структура которого зависит от принятой структуры системы управления процессом функционирования параллельных контуров (АКБ*i*(*a*), АКБ*i*(*b*)), т.е. от количества устройств управления токами зарядки и управления токами разрядки, и от схемы соединения их с параллельными контурами (АКБ*i*(*a*), АКБ*i*(*b*)). Возможны два варианта такой структуры. Граф структуры одного из вариантов показан на рисунках 1, 2 в составе графа структуры управляемой системы НРПМ (подробное описание этой структуры приведено ниже, в рамках второго варианта).



в) $$S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\underline{\downarrow}}/\frac{b}{\overline{\overline{\uparrow}}}\right)\left\{\begin{array}{l}\frac{a}{\underline{\downarrow}}\left\{\begin{array}{l}K^{(-)}_{\text{АКБ}i(a)}=0\\K^{(+)}_{\text{АКБ}i(a)}=1\end{array}\right.\\ \frac{b}{\overline{\overline{\uparrow}}}\left\{\begin{array}{l}K^{(-)}_{\text{АКБ}i(b)}=1\\K^{(+)}_{\text{АКБ}i(b)}=0\end{array}\right.\end{array}\right\}\xrightarrow{\text{дуга 15}}\left\{\begin{array}{l}\left.\begin{array}{l}K^{(-)}_{\text{АКБ}i(a)}=1\\K^{(+)}_{\text{АКБ}i(a)}=0\end{array}\right\}\frac{a}{\overline{\overline{\uparrow}}}\\ \left.\begin{array}{l}K^{(-)}_{\text{АКБ}i(b)}=0\\K^{(+)}_{\text{АКБ}i(b)}=1\end{array}\right\}\frac{b}{\underline{\downarrow}}\end{array}\right\}S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\overline{\uparrow}}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right)$$

г) $$S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\overline{\overline{\uparrow}}}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right)\left\{\begin{array}{l}\frac{a}{\overline{\overline{\uparrow}}}\left\{\begin{array}{l}K^{(-)}_{\text{АКБ}i(a)}=1\\K^{(+)}_{\text{АКБ}i(a)}=0\end{array}\right.\\ \frac{b}{\underline{\downarrow}}\left\{\begin{array}{l}K^{(-)}_{\text{АКБ}i(b)}=0\\K^{(+)}_{\text{АКБ}i(b)}=1\end{array}\right.\end{array}\right\}\xrightarrow{\text{дуга 19}}\left\{\begin{array}{l}\left.\begin{array}{l}K^{(-)}_{\text{АКБ}i(a)}=0\\K^{(+)}_{\text{АКБ}i(a)}=1\end{array}\right\}\frac{a}{\underline{\downarrow}}\\ \left.\begin{array}{l}K^{(-)}_{\text{АКБ}i(b)}=1\\K^{(+)}_{\text{АКБ}i(b)}=0\end{array}\right\}\frac{b}{\overline{\uparrow}}\end{array}\right\}S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\underline{\downarrow}}/\frac{b}{\overline{\uparrow}}\right)$$

Рисунок 3 – Граф переходов, соответствующий варианту 1

Вариант 1. Граф структуры системы управления параллельными контурами (АКБi(a), АКБi(b)), поочередно работающими в режиме зарядки/разрядки, показан на рисунке 3, *а*, где нумерация контуров принята как a = 1, b = 2; ветвям с токами зарядки $i^{(-)}_{\text{АКБ}i(a)}(\theta_m)$, $i^{(-)}_{\text{АКБ}i(b)}(\theta_m)$ соответствуют устройства зарядки соответственно $\text{УЗ}^{(-)}_{\text{АКБ}i(a)}$, $\text{УЗ}^{(-)}_{\text{АКБ}i(b)}$, а ветвям с

токами разрядки $i^{(-)}_{\text{АКБ}i(a)}(\theta_m)$, $i^{(-)}_{\text{АКБ}i(b)}(\theta_m)$ соответствуют устройства разрядки соответственно $\text{УР}^{(-)}_{\text{АКБ}i(a)}$, $\text{УР}^{(-)}_{\text{АКБ}i(b)}$ (в данном варианте требуется четыре устройства для организации поочередной работы параллельных контуров в режиме зарядки/разрядки).

Состояние вектора условных управляемых ключей $(K^{(-)}_{\text{АКБ}i(a)}(\theta_m)$, $K^{(-)}_{\text{АКБ}i(a)}(\theta_m)$, $K^{(-)}_{\text{АКБ}i(b)}(\theta_m)$, $K^{(-)}_{\text{АКБ}i(b)}(\theta_m))$ несет информацию о текущем режиме работы параллельных контуров (АКБ*i*(*a*), АКБ*i*(*b*)). Эти ключи предназначены для переключения этих контуров из одного режима в другой путем изменения соответствующим образом их состояния.

На рисунке 3, *б* показан граф переходов из одной ситуации в другую, где:

- вершинам соответствуют ситуации из вышеопределенного набора (см. определения 1-3), а дуги 1-12 отражают переходы из одной ситуации в другую;

- если текущему состоянию параллельных контуров (АКБ*i*(*a*), АКБ*i*(*b*)) соответствует режим $(\overline{\uparrow}/\underline{\downarrow})$, то ситуация $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\downarrow}/\frac{b}{\uparrow}\right)$ является началом полного цикла, ситуация $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\underline{\downarrow}}/\frac{b}{\overline{\uparrow}}\right)$ - концом первого полуцикла, ситуация $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\uparrow}/\frac{b}{\downarrow}\right)$ – началом второго полуцикла, а ситуация $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\overline{\uparrow}}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right)$ – концом полного цикла поочередной работы этих контуров в режиме зарядка/разрядка;

- дуге 20 соответствует процесс разрядки/зарядки соответственно дефицитного/избыточного тока в узле *i*-го уровня балансировки, в результате чего в зависимости от закона изменения вектора возмущения $\eta(\theta_m)$ (6) ситуация $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\downarrow}/\frac{b}{\uparrow}\right)$ может перейти непредсказуемым образом в одну из следующих ситуаций: $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\underline{\downarrow}}/\frac{b}{\uparrow}\right)$, $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\downarrow}/\frac{b}{\overline{\uparrow}}\right)$, $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\underline{\downarrow}}/\frac{b}{\overline{\uparrow}}\right)$;

- дугам 13, 14 соответствуют процессы соответственно дозарядки контура *b*, дозарядки контура *a* с целью перевода ситуации $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\underline{\downarrow}}/\frac{b}{\uparrow}\right)$, $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\downarrow}/\frac{b}{\overline{\uparrow}}\right)$ в ситуацию $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\underline{\downarrow}}/\frac{b}{\overline{\uparrow}}\right)$;

- дуге 15 соответствует процесс переключения из режима $(\underline{\downarrow}/\overline{\uparrow})$ в режим $(\uparrow/\downarrow)$ с целью перевода ситуации $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\underline{\downarrow}}/\frac{b}{\overline{\uparrow}}\right)$ в ситуацию $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\uparrow}/\frac{b}{\downarrow}\right)$ (правило переключения показано на рисунке 3, *в*);

- дуге 16 соответствует процесс зарядки/разрядки соответственно избыточного/дефицитного тока в узле *i*-го уровня балансировки, в результате чего в зависимости от закона изменения вектора возмущения $\eta(\theta_m)$ (6) ситуация $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\uparrow}/\frac{b}{\downarrow}\right)$ может перейти непредсказуемым образом в одну из следующих ситуаций: $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\overline{\uparrow}}/\frac{b}{\downarrow}\right)$, $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\uparrow}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right)$, $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\overline{\uparrow}}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right)$;

- дугам 17, 18 соответствуют процессы соответственно доразрядки контура *b*, дозарядки контура *a* с целью перевода ситуации $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\overline{\uparrow}}/\frac{b}{\downarrow}\right)$, $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\uparrow}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right)$ в ситуацию $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\overline{\uparrow}}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right)$;

- дуге 19 соответствует процесс переключения из режима $(\overline{\uparrow}/\underline{\downarrow})$ в режим $(\downarrow/\uparrow)$ с целью перевода ситуации $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\overline{\uparrow}}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right)$ в ситуацию $S^{(\theta_m)}_{\text{АКБ}i}\left(\frac{a}{\downarrow}/\frac{b}{\uparrow}\right)$ (правило переключения показано на рисунке 3, *г*);

- правила переключения режимов функционирования параллельных контуров *(АКБi(a), АКБi(b))*, показанных на рисунке 3, *в*, *г* (вариант 1), интерпретируются следующим образом: если параллельные контуры в процессе их функционирования оказались в симметрично-

предельной ситуации $S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\underline{\downarrow}}/\frac{b}{\overline{\uparrow}}\right)$ при режиме (↓/↑) или $S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\overline{\uparrow}}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right)$ при режиме (↑/↓), то путем задания состояния вектора ключей $(K_{\text{АКБ}i(a)}^{(-)}(\theta_m),\ K_{\text{АКБ}i(a)}^{(-)}(\theta_m),\ K_{\text{АКБ}i(b)}^{(-)}(\theta_m),\ K_{\text{АКБ}i(b)}^{(-)}(\theta_m))$ следует перевести их в нормальную ситуацию, соответственно, $S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\overline{\uparrow}}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right)$ или $S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\underline{\downarrow}}/\frac{b}{\overline{\uparrow}}\right)$, по следующему правилу:

$$(K_{\text{АКБ}i(a)}^{(-)}(\theta_m), K_{\text{АКБ}i(a)}^{(-)}(\theta_m), K_{\text{АКБ}i(b)}^{(-)}(\theta_m), K_{\text{АКБ}i(b)}^{(-)}(\theta_m)) = \\ = \begin{cases} (1,0,0,1), \text{если параллельные контуры оказались в ситуации } S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\underline{\downarrow}}/\frac{b}{\overline{\uparrow}}\right), \\ \quad \text{т. е. выполнено условие (38), и необходимо перевести} \\ \quad \text{в ситуацию } S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\overline{\uparrow}}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right); \\ (0,1,1,0), \text{если параллельные контуры оказались в ситуации } S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\overline{\uparrow}}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right), \\ \quad \text{т. е. выполнено условие (37), и необходимо перевести} \\ \quad \text{в ситуацию } S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\underline{\downarrow}}/\frac{b}{\overline{\uparrow}}\right), \end{cases} \quad (43)$$

при этом $a = 1$, $b = 2$.

Вариант 2. Граф структуры системы управления параллельными контурами (АКБ*i*(*1*), АКБ*i*(*2*)), поочередно работающими в режиме зарядки/разрядки, показан на рисунке 4, *а*, где ветвям с токами $i_{\text{АКБ}i}^{(-)}(\theta_m)$, $i_{\text{АКБ}i}^{(-)}(\theta_m)$ соответствуют устройства, соответственно, зарядки $\text{УЗ}_{\text{АКБ}i}^{(-)}$, разрядки $\text{УР}_{\text{АКБ}i}^{(-)}$, реализующие эти токи; $\text{УЗ}_{\text{АКБ}i}^{(-)}$ выполняет функции двух устройств $\text{УЗ}_{\text{АКБ}i(a)}^{(-)}$, $\text{УЗ}_{\text{АКБ}i(b)}^{(-)}$ из варианта 1, производя поочередно зарядку параллельных контуров, а $\text{УР}_{\text{АКБ}i}^{(-)}$ выполняет функции устройств $\text{УР}_{\text{АКБ}i(a)}^{(-)}$, $\text{УР}_{\text{АКБ}i(b)}^{(-)}$ из варианта 1, производя поочередно разрядку параллельных контуров накопителя АКБ*i* *i*-го уровня путем формирования текущей структуры за счет выбора соответствующего состояния вектора условных управляемых ключей $(K_{\text{АКБ}i(1)}^{(-)}(\theta_m),\ K_{\text{АКБ}i(1)}^{(-)}(\theta_m),\ K_{\text{АКБ}i(2)}^{(-)}(\theta_m),\ K_{\text{АКБ}i(2)}^{(-)}(\theta_m))$. Такая структура использована в рамках структуры управляемой системы НРПМ (см. рис. 1 и 2)

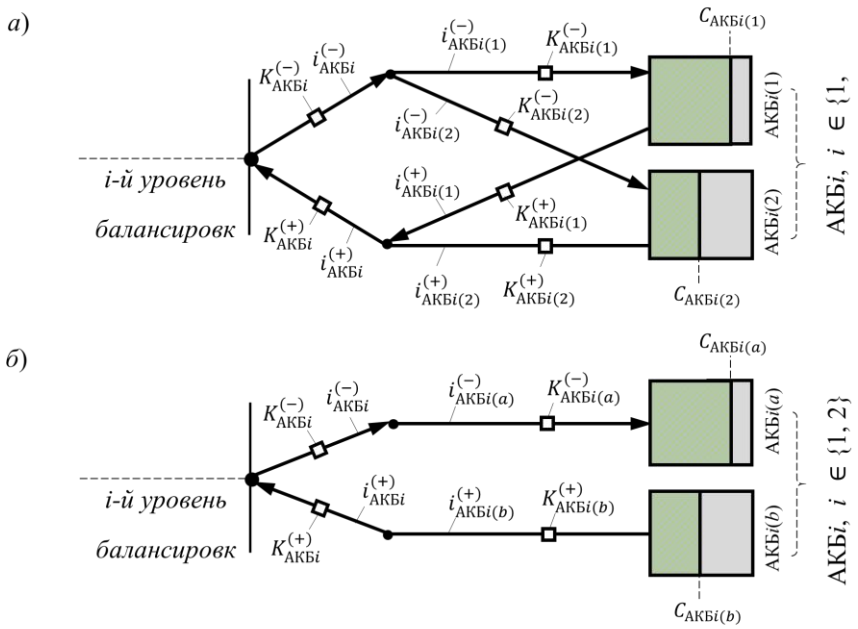


Рисунок 4 – Граф переходов, соответствующий варианту 2 (а, б)

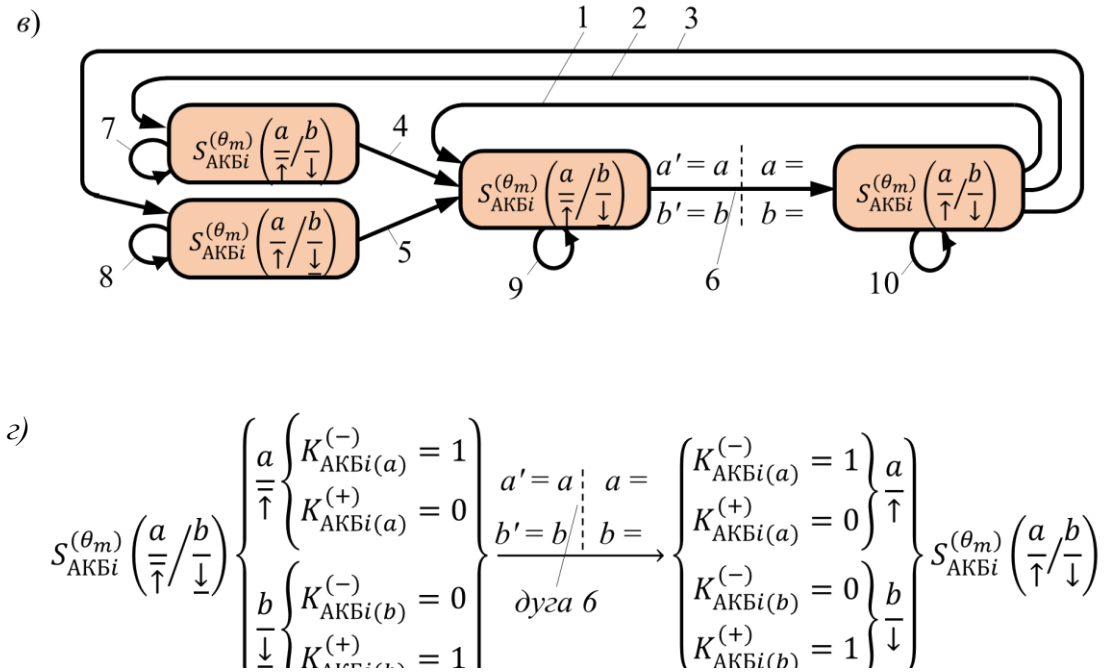


Рисунок 4 – Граф переходов, соответствующий варианту 2 (в, г)

Для идентификации текущих режимов функционирования параллельных контуров введем новое понятие, как указатель, формальное определение которого дано ниже.

Определение 4 – пара $(a, b) \in \{(1,2),(2,1)\}$ называется вектором указателей, идентифицирующий текущий режим функционирования параллельных контуров (АКБi(*1*), АКБi(*2*)) накопителя АКБi, если состояние элемента a данного вектора указывает на номер контура, работающего в текущий момент времени в режиме зарядки, а состояние элемента b указывает на номер контура, работающего в режиме разрядки.

Введенный вектор указателей (a, b) позволяет упростить структуру исходного графа (рис. 4, *а*) и представить в виде структуры, показанной на рис. 4, *б*. На рисунке 4, в показан граф переходов из одной ситуации в другую, соответствующий вновь полученной структуре (рис. 4, *б*). Вершины и дуги данного графа интерпретируются, как и в первом варианте (см. рис. 3, *б*), и отражает этот граф полуцикл процесса зарядки/разрядки параллельных контуров

(АКБ*i*(*1*), АКБ*i*(*2*)), т.е. полную зарядку контура, на номер которого указывает текущее состояние указателя *a*, и полную разрядку контура, на номер которого указывает текущее состояние указателя *b*. Смена режимов зарядки/разрядки параллельных контуров производится при этом за счет переключения состояния вектора указателей $(a, b) \in \{(1,2),(2,1)\}$ (см. рис. 4, *г*).

Правила переключения режимов функционирования параллельных контуров (АКБi(a), *АКБi(b))*, показанных на рисунке 4, *г* (вариант 2), интерпретируются следующим образом: если параллельные контуры, при их функционировании в текущем полупериоде процесса зарядки/разрядки, оказались в симметрично-предельной ситуации $S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\overline{\uparrow}}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right)$, то для переключения в очередной полупериод режима зарядки/разрядки следует перевести их в нормальную ситуацию $S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\uparrow}/\frac{b}{\downarrow}\right)$ по следующему правилу:

- переключение состояния вектора указателей (a, b):

$$(a,b) = \begin{cases} (2,1), \text{если при текущем значении вектора указателей } (a,b) = (1,2) \\ \quad \text{параллельные контуры оказались в ситуации } S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\overline{\uparrow}}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right), \\ \quad \text{т. е. выполнено условие } (37), \text{и необходимо перевести в ситуацию} \\ \quad S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\uparrow}/\frac{b}{\downarrow}\right) \text{ при } (a,b) = (2,1); \\ (1,2), \text{если при текущем значении вектора указателей } (a,b) = (2,1) \\ \quad \text{параллельные контуры оказались в ситуации } S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\overline{\uparrow}}/\frac{b}{\underline{\downarrow}}\right), \\ \quad \text{т. е. выполнено условие } (37), \text{и необходимо перевести в ситуацию} \\ \quad S_{\text{АКБ}i}^{(\theta_m)}\left(\frac{a}{\uparrow}/\frac{b}{\downarrow}\right) \text{ при } (a,b) = (2,1); \end{cases} \tag{44}$$

- переключение состояния вектора ключей:

$$(K_{\text{АКБ}i(1)}^{(-)}(\theta_m), K_{\text{АКБ}i(1)}^{(-)}(\theta_m), K_{\text{АКБ}i(2)}^{(-)}(\theta_m), K_{\text{АКБ}i(2)}^{(-)}(\theta_m)) =$$

$$= \begin{cases} (1,0,0,1), \text{если } (a,b) = (1,2); \\ (0,1,1,0), \text{если } (a,b) = (2,1). \end{cases} \tag{45}$$

Этап 6 – декомпозиция исходной задачи синтеза алгоритма оптимального ситуационного управления энергетическим балансом в управляемой системе *НРПМ*. Исходную задачу синтеза (задача 1 в разделе 2) с учетом приоритетности включения элементов системы НРПМ к процессу управления энергетическим балансом в ней (4), и сведений, приведенных в рамках данного раздела, можно разбить на ряд последовательно решаемых подзадач.

Примечание 1. Ниже рассматривается частный случай исходной задачи синтеза (задача 1), т.е. рассматривается одношаговая задача оптимизации, которой соответствует алгоритм управления со структурой (13).

Задача 1.1 – задача поддержания текущей величины напряжения конденсатора $u_{\text{ШСР}}(\theta_m)$ в окрестности номинального напряжения $u_{\text{ШСР}}^{\text{ном}}$. Данная задача формулируется следующим образом: требуется найти такой алгоритм $G_{\text{ШСР},\theta_m}$, вырабатывающий в каждый текущий момент времени θ_m, на основе текущей информации $u_{\text{ШСР}}(\theta_m)$, $i_{\text{Г}}(\theta_m)$, $i_{\text{П}}(\theta_m)$ (см. (5), (6)), управляющее воздействие в виде балансирующего тока 1-го уровня $i_{\text{бал}}^{(1)}(\theta_m)$ (см. рис. 2):

$$i_{\text{бал}}^{(1)}(\theta_m) = G_{\text{ШСР},\theta_m}[u_{\text{ШСР}}(\theta_m),\ i_{\text{Г}}(\theta_m),\ i_{\text{П}}(\theta_m),\ u_{\text{ШСР}}^{\text{ном}}], \tag{46}$$

минимизирующий отклонение $u_{\text{ШСР}}(\theta_m)$ от $u_{\text{ШСР}}^{\text{ном}}$ с учетом (27), т.е. в каждый текущий момент времени θ_m решается следующая задача оптимизации:

$$\min_{\substack{i_{\text{зал}}^{(1)}(\theta_m)= \\ =G_{\text{ШСР},\theta_m}[u_{\text{ШСР}}(\theta_m),\, i_{\text{Г}}(\theta_m),\, i_{\text{П}}(\theta_m),\, u_{\text{ШСР}}^{\text{ном}}]}} \left\{ J_{\text{ШСР},\theta_m}^{(1)} = (u_{\text{ШСР}}(\theta_{m-1}) - u_{\text{ШСР}}^{\text{ном}})^2 \,|\, \text{с учетом (27)} \right\}. \quad (47)$$

Примечание 2. Подзадача (47) является классической задачей теории оптимального управления, для решения которой можно использовать метод динамического программирования, основанный на принципе оптимальности Р. Беллмана [11,12].

Задача 1.2 – задача поддержания текущей величины балансирующего тока 2-го уровня $i_{\text{бал}}^{(2)}(\theta_m)$ в окрестности номинального $i_{\text{ГС}}^{\text{ном}}(\theta_m)$. Данная задача формулируется следующим образом: требуется найти такой алгоритм $G_{\text{АКБ1},\theta_m}$, вырабатывающий в каждый текущий момент времени θ_m, на основе текущей информации $C_{\text{АКБ1}(1)}(\theta_m)$, $C_{\text{АКБ1}(2)}(\theta_m)$ (см. (5)) и балансирующего тока 1-го уровня $i_{\text{бал}}^{(1)}(\theta_m)$, являющегося результатом решения задачи 1.1, определенные компоненты вектора управления $i_{\text{упр}}(\theta_m)$ (9), а именно:

$$i_{\text{АКБ1}}(\theta_m) = \left(i_{\text{АКБ1}(1)}^{(-)}(\theta_m),\quad i_{\text{АКБ1}(1)}^{(-)}(\theta_m),\, i_{\text{АКБ1}(2)}^{(-)}(\theta_m),\, i_{\text{АКБ1}(2)}^{(-)}(\theta_m)\right) =$$

$$= G_{\text{АКБ1},\theta_m}\left[C_{\text{АКБ1}(1)}(\theta_m),\, C_{\text{АКБ1}(2)}(\theta_m),\, i_{\text{бал}}^{(1)}(\theta_m),\, i_{\text{ГС}}^{\text{ном}}(\theta_m)\right], \quad (48)$$

минимизирующие отклонение балансирующего тока 2-го уровня $i_{\text{бал}}^{(2)}(\theta_m)$ от $i_{\text{ГС}}^{\text{ном}}(\theta_m)$ с учетом (23), (28)-(33) и с учетом набора ситуаций и правил переходов из одной ситуации в другую (34)-(45) при $i = 1, j \in \{1, 2\}$, т.е. в каждый текущий момент времени θ_m решается следующая задача оптимизации:

$$\min_{\substack{i_{\text{АКБ1}}(\theta_m)= \\ =G_{\text{АКБ1},\theta_m}[C_{\text{АКБ1}(1)}(\theta_m),\, C_{\text{АКБ1}(2)}(\theta_m), \\ i_{\text{бал}}^{(1)}(\theta_m),\, i_{\text{ГС}}^{\text{ном}}(\theta_m)]}} \left\{ J_{\text{бал},\theta_m}^{(2)} = (i_{\text{бал}}^{(2)}(\theta_m) - i_{\text{ГС}}^{\text{ном}}(\theta_m))^2 \,\middle|\, \begin{array}{l} \text{с учетом (23),} \\ (28)-(33), \text{и с учетом набора ситуаций и правил} \\ \text{переходов из одной ситуации в другую (34)} - (45) \\ \text{при } i = 1, j \in \{1, 2\} \end{array} \right\}. \quad (49)$$

Задача 1.3 – задача поддержания текущей величины балансирующего тока 3-го уровня $i_{\text{бал}}^{(3)}(\theta_m)$ в окрестности номинального $i_{\text{ГС}}^{\text{ном}}(\theta_m)$. Данная задача формулируется следующим образом: требуется найти такой алгоритм $G_{\text{АКБ2},\theta_m}$, вырабатывающий в каждый текущий момент времени θ_m, на основе текущей информации $C_{\text{АКБ2}(1)}(\theta_m)$, $C_{\text{АКБ2}(2)}(\theta_m)$ (см. (5)) и балансирующего тока 2-го уровня $i_{\text{бал}}^{(2)}(\theta_m)$, являющегося результатом решения задачи 1.2, определенные компоненты вектора управления $i_{\text{упр}}(\theta_m)$ (9), а именно:

$$i_{\text{АКБ2}}(\theta_m) = \left(i_{\text{АКБ2}(1)}^{(-)}(\theta_m),\quad i_{\text{АКБ2}(1)}^{(-)}(\theta_m),\, i_{\text{АКБ2}(2)}^{(-)}(\theta_m),\, i_{\text{АКБ2}(2)}^{(-)}(\theta_m)\right) =$$

$$= G_{\text{АКБ2},\theta_m}\left[C_{\text{АКБ2}(1)}(\theta_m),\, C_{\text{АКБ2}(2)}(\theta_m),\, i_{\text{бал}}^{(2)}(\theta_m),\, i_{\text{ГС}}^{\text{ном}}(\theta_m)\right], \quad (50)$$

минимизирующие отклонения балансирующего тока 3-го уровня $i_{\text{бал}}^{(3)}(\theta_m)$ от $i_{\text{ГС}}^{\text{ном}}(\theta_m)$ с учетом (24), (28)-(33) и с учетом набора ситуаций и правил переходов из одной ситуации в другую (34)-(45) при $i = 2, j \in \{1, 2\}$, т.е. в каждый текущий момент времени θ_m решается следующая задача оптимизации:

$$\min_{\substack{i_{\text{АКБ2}}(\theta_m)= \\ =G_{\text{АКБ2},\theta_m}[G_{\text{АКБ2}(1)}(\theta_m),\, G_{\text{АКБ2}(2)}(\theta_m),\, i^{(2)}_{\text{зал}}(\theta_m),\, i^{\text{ном}}_{\text{ГС}}(\theta_m)]}} \left\{ J^{(3)}_{\text{бал},\theta_m} = \left(i^{(3)}_{\text{бал}}(\theta_m) - i^{\text{ном}}_{\text{ГС}}(\theta_m)\right)^2 \middle| \text{ с учетом } (24),\ (28)-(33), \text{ и с учетом набора ситуаций и правил переходов из одной ситуации в другую } (34)-(45) \text{ при } i=2, j\in\{1,2\} \right\}. \quad (51)$$

Задача 1.4 – задача поддержания текущей величины перетока $i^{(-,-)}_{\text{ГС}}(\theta_m)$ в окрестности номинального $i^{\text{ном}}_{\text{ГС}}(\theta_m)$. Данная задача формулируется следующим образом: требуется найти такой алгоритм $G_{\text{ГС},\theta_m}$, вырабатывающий в каждый текущий момент времени θ_m, на основе балансирующего тока 3-го уровня $i^{(3)}_{\text{бал}}(\theta_m)$, являющегося результатом решения задачи 1.3, определенные компоненты вектора управления $i_{\text{упр}}(\theta_m)$ (9), а именно:

$$i_{\text{БИ,БН}}(\theta_m) = \left(i^{(-)}_{\text{БИ}}(\theta_m),\ i^{(-)}_{\text{БН}}(\theta_m)\right) = G_{\text{БИ,БН},\theta_m}\left[i^{(3)}_{\text{бал}}(\theta_m),\ i^{\text{ном}}_{\text{ГС}}(\theta_m)\right], \quad (52)$$

минимизирующие отклонение перетока $i^{(-,-)}_{\text{ГС}}(\theta_m)$ от номинального $i^{\text{ном}}_{\text{ГС}}(\theta_m)$ за счет минимальной частоты переключения устройств БН, БИ с учетом допуска (20), т.е. в каждый текущий момент времени θ_m решается следующая задача оптимизации:

$$\min_{\substack{i_{\text{БИ,БН}}(\theta_m)= \\ =G_{\text{БИ,БН},\theta_m}\left[i^{(2)}_{\text{зал}}(\theta_m),\, i^{\text{ном}}_{\text{ГС}}(\theta_m)\right]}} \left\{ J_{\text{ГС},\theta_m} = \left(i^{(-,-)}_{\text{ГС}}(\theta_m) - i^{\text{ном}}_{\text{ГС}}(\theta_m)\right)^2 \middle| \text{ с учетом } (20) \right\}. \quad (53)$$

Таким образом, алгоритм оптимального ситуационного управления $G_{\text{АОСУ},\theta_m}$ энергетическим балансом в управляемой системе НРПМ, получается в результате последовательного решения подзадач 1.1 - 1.4, т.е. (47), (49), (51), (53), укрупненная функциональная схема которого показана на рисунке 5.

Примечание 3. Для решения подзадач (49), (51), (53) используется аппарат вычислительных сетей Петри [13-15], в результате чего получаются самоорганизующиеся алгоритмы оптимального ситуационного управления $G_{\text{АОСУ},\theta_m}$.

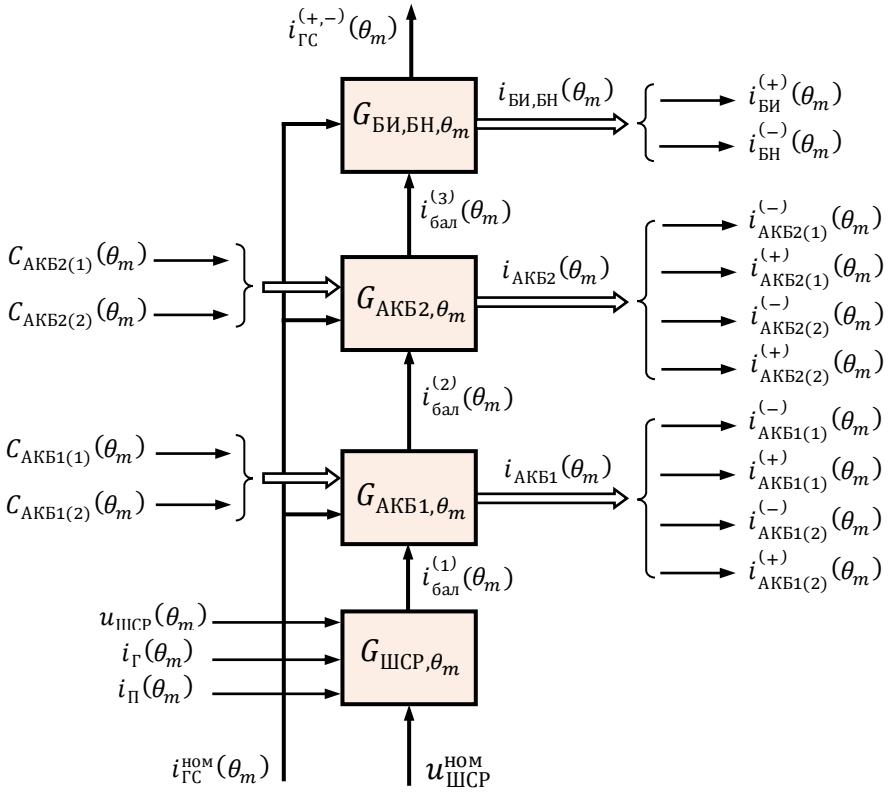


Рисунок 5 – Укрупненная функциональная схема алгоритма оптимального ситуационного управления $G_{АОСУ,\theta_m}$ энергетическим балансом в управляемой системе НРПМ

Заключение

В настоящей работе принятая структура системы накопления и распределения потоков мощностей НРПМ позволяет обеспечить простоту изменения ее конфигурации путем добавления/исключения в ее состав тех или иных компонентов (балластные источники БИ, балластные нагрузки БН, генерирующие установки с ВИЭ и нагрузи разного типа), а также добавление/исключение возможности взаимодействия НРПМ с глобальной сетью ГС.

Для принятой структуры построена математическая модель с учетом ситуаций, возникающих в процессе циркуляции потоков в системе НРПМ, сформулирована задача синтеза алгоритма оптимального ситуационного управления АОСУ энергетическим балансом в ней и предложена схема ее решения, которая позволяет получить многоуровневый алгоритм $G_{АОСУ,\theta_m}$, m = 0, 1, …, M – 1, состоящий из последовательно функционирующих алгоритмов, т.е. $G_{АОСУ,\theta_m}$: $G_{ШСР,\theta_m} \xrightarrow{i_{бал}^{(1)}(\theta_m)} G_{АКБ1,\theta_m} \xrightarrow{i_{бал}^{(2)}(\theta_m)} G_{АКБ2,\theta_m} \xrightarrow{i_{бал}^{(3)}(\theta_m)} G_{БИ,БН,\theta_m} \xrightarrow{i_{ГС}^{(+,-)}(\theta_m)}$, выполняющих следующие функции: $G_{ШСР,\theta_m}$ – поддержание текущей величины напряжения конденсатора $u_{ШСР}(\theta_m)$ (узла – шины сборки и распределения ШСР) путем выдачи оптимального управляющего воздействия в виде балансирующего тока $i_{бал}^{(1)}(\theta_m)$; $G_{АКБ1,\theta_m}$, $G_{АКБ2,\theta_m}$, $G_{БИ,БН,\theta_m}$ – оптимальные ситуационные алгоритмы для последовательной реализации балансирующего тока $i_{бал}^{(1)}(\theta_m)$ с использованием элементов системы НРПМ соответственно (АКБ1(1), АКБ1(2)), (АКБ2(1), АКБ2(2)), (БИ, БН) с целью поддержания перетока $i_{ГС}^{(-,-)}(\theta_m)$ между ГС и НРПМ в окрестности номинального $i_{ГС}^{ном}(\theta_m)$.

Алгоритм $G_{АОСУ,\theta_m}$ обладает тем , что при подборе и изменении конфигурации системы НРПМ на этапе проектирования систем АРГЭК для различных регионов с

соответствующими им ВИЭ, его структура легко модифицируется, что важно при создании системы автоматизированного проектирования автоматизированных распределенных гибридных энергокомплексов АРГЭК.

Литература:

1. M.Asanov, S.Asanova, M.Safaraliev, I. Zicmane, S. Beryozkina, S. Suerkulov. Design methodology of intelligent autonomous distributed hybrid power complexes with renewable energy sources. International Journal of Hydrogen Energy. Volume 48, Issue 81, 22 September 2023. Pages 31468-31478.
2. Лукутин Б.В. Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций / Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №2. – С. 139.
3. Обухов С.Г. Двухконтурный накопитель энергии для гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии / Обухов С.Г., Плотников И.А., Ибрагим А., Маслов В.Г. // Известия Томского университета. Инжиниринг георесурсов. –2020. – Т. 331. № 1. – С. 64–76.
4. Лукутин Б.В. Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций / Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. // Электричество. – 2012. – №6. – С. 24–29.
5. Asanova S.M. Optimization of the structure of autonomous distributed hybrid power complexes and energy balance management in them / Asanova S.M., Kokin S.E., Dmitriev S.A., Safaraliev M., Arfan Kh., Zhabudaev T., Satarkulov T.K. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. - Volume 46, Issue 70. – P. 34542-34549.
6. Asanova S.M., Ahyoev J.S, Askarbek N., Suerkulov S.M., Asanova D.U. Safaraliev M. Method for designing drop-of-wire recognition systems on sections of undistorted two-wire power transmission lines. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 15. Сер. "15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy" 2020. С. 012114.
7. Сатаркулов К.А., Асанова С.М. и др. Токопроводящая жила проводов и кабелей. – Патент KG № 1187. 2009 г.
8. Asanov M., Kokin S., Asanova S.M., Satarkulov K., Dmitriev S., Safaraliev M. The use of Petri computing networks for optimization of the structure of distribution networks to minimize power losses. Energy Reports. Vol. 6, Supplement 9, December 2020, 1337-1343
9. Asanova S., M.Safaraliev, I. Zicmane, S. Suerkulov, S. Kokin. Improving the reliability of the energy balance management process in hybrid power complexes with green hydrogen and energy storage. International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Т. 61. С. 1485-1494.
10. Asanov M., Asanova S., Semenenko S., Matrenin P., Safaraliev M., Rusina A. Optimal amount of information determination for power system steady state estimation. Energy Reports, Volume 8, Supplement 1, April 2022, Pages 1085-1092
11. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления/ Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.
12. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление. / Пер. с англ.// Под ред. А.С. Шаталова. – М.: «Энергия», 1973. – С. 440.
13. М.С. Асанов, С.М. Асанова, К.А. Сатаркулов. Структурная модель вычислительных сетей Петри. Известия КГТУ. – Бишкек, 2008. – №13. – С. 78–85.
14. М.С. Асанов, С.М. Асанова, К.А. Сатаркулов. Вычислительные компоненты, язык описания и правила функционирования вычислительных сетей Петри. Известия КГТУ. – Бишкек, 2008. – №13. – С. 85–95.

15. Асанова С.М. Развитие сетей Петри для разработки самоорганизующихся многокомпонентных вычислительных алгоритмов решения задач электроэнергетики / Проблемы автоматики и управления, НАН КР, июль 2022, No 2 (44). –С. 15–21.
16. Сафаралиев М.Х., Матренин П.В., Дмитриев С.А., Асанова С.М., Ахьеев Дж.С. Разработка моделей среднесрочного прогнозирования электропотребления в изолированно работающих энергосистемах на основе ансамблевых методов машинного обучения / Известия НТЦ ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ. – 2021. – №1 (84)). –С.32–39.