

УДК: 621.85-8:620.91

С.М. Асанова¹, e-mail: a_sm07@kstu.kg

С.М. Суеркулов², e-mail: s_suerkulov@list.ru

Д.У. Асанова¹,

Р.Ж. Самсалиева¹,

Р.В. Булатов³, e-mail: BulatovRV@mpei.ru

¹Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова, 720044, Кыргызстан, г. Бишкек, пр. Мира, 66,

²ТЭЦ города Бишкека, 720070, Кыргызстан, г. Бишкек, пр. Жибек Жолу, 326,

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", 111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14, стр. 1,

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗУЕМОСТИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ БАЛАНСОМ В ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСАХ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

В работе разрешены отдельные вопросы, предусмотренные в рамках методики проектирования интеллектуальных автономных распределенных гибридных энергокомплексов (АРГЭК) с ВИЭ и с накопителями энергии, функционирующих в сетевом режиме и в режиме взаимодействия с глобальной (общегосударственной) сетью (ГС), и которые в зависимости от дефицита или избытка энергии в них могут работать относительно ГС соответственно как нагрузка или источник энергии, а именно:

– сформулирована содержательная постановка задачи управления энергетическим балансом в системе АРГЭК как задача поддержания текущей потребляемой мощности потребителями в окрестности, требуемой номинальной мощности в каждый момент времени t ;

– на основе анализа процесса управления энергетическим балансом в АРГЭК произведен выбор и обоснование структуры системы накопления и распределения потоков мощностей (НРПМ) с позиции обеспечения физической реализуемости процесса управления энергетическим балансом в ней, а также процесса согласования режимов взаимодействия АРГЭК и ГС. Это достигается за счет включения в систему НРПМ конденсатора, подключенного к ее шине сборки и распределения, и накопителя АКБ с двухуровневой (АКБ1, АКБ2) структурой, при этом: АКБ1 1-го уровня – для управления балансом мощностей в НРПМ при нормальном режиме АРГЭК и изменении мощностей ВИЭ и потребления в пределах их доверительных интервалов, оцененных на этапе проектирования; АКБ2 2-го уровня – для согласования режимов работ АРГЭК и ГС и для управления совместно с АКБ1 1-го уровня, ГС, дизельным генератором, балансом мощностей в НРПМ при аварийном режиме АРГЭК, а также при выходе мощностей ВИЭ и потребления за пределы их доверительных интервалов.

Ключевые слова: автономный распределенный гибридный энергокомплекс; возобновляемые источники энергии; надежность; энергетический баланс; аккумуляторная батарея; мощность; физическая реализуемость процесса управления.

Введение

Одним из важных факторов сдерживания социально-экономического развития регионов, тех или иных стран является возникновение при их развитии дефицита мощности электрической энергии в существующих общегосударственных энергетических системах. Для разрешения данной проблемы существуют следующие альтернативные пути:

– ввод новых мощностей в существующую энергосистему за счет строительства и пуска крупных электрических станций, функционирующих на традиционных энергоносителях. Для реализации данного варианта необходимы вложения крупных финансовых средств и больших временных затрат, что приведет к значительной задержке начала развития рассматриваемых регионов и к большим издержкам;

– ввод новых мощностей с целью разгрузки существующей энергосистемы за счет строительства и пуска региональных гибридных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии рассматриваемых регионов (повсеместно доступная энергия солнца и ветрового потока, энергия водных потоков рек горных регионов). Реализация данного варианта поможет развитию каждого региона с минимальной издержкой за счет поэтапного строительства и наращивания генерируемых мощностей.

В настоящее время приоритетным и перспективным направлением развития современной энергетики является разработка и внедрение гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), область практического применения которых можно разбить на два направления:

– автономные гибридные энергетические системы с ВИЭ и накопителями энергии, областью практического применения которых являются децентрализованные системы электроснабжения потребителей, территориально расположенные в отдаленных, труднодоступных регионах и не имеющие доступа к глобальной (общегосударственной) сети (ГС). В таких системах в качестве источников энергии используются дизельные генераторы и ВИЭ рассматриваемых регионов. В работе [1] разработано новое техническое решение, обеспечивающее максимально эффективное использование потенциала ВИЭ и оптимизацию режимов заряда/разряда аккумуляторных систем накопления энергии. Идея предлагаемого решения состоит в применении пассивной системы стабилизации напряжения на шине сборки и распределения (ШСР) потоков мощностей за счет подключения к ней суперконденсатора и управления энергетическим балансом в системе с помощью двухконтурного накопителя энергии, состоящего из двух идентичных аккумуляторных батарей, поочередно работающих в режиме заряда/разряда, а также с помощью регулируемой балластной нагрузки и дизельного генератора (ДГ). *Однако в этой работе не дано теоретическое обоснование принятого технического решения. Разработанный алгоритм управления является эвристическим алгоритмом, т.е. не являющимся гарантированно точным или оптимальным, и допускает режим неполного заряда/разряда.*

– автономные распределенные гибридные энергокомплексы (АРГЭК) с ВИЭ и накопителями энергии, работающие в сетевом режиме и в режиме взаимодействия с ГС [2,3]. При этом системы АРГЭК в зависимости от дефицита или избытка энергии в них могут работать относительно ГС соответственно как нагрузки или источники энергии. В работе [2] предложена методика создания универсальной системы автоматизированного проектирования оптимальной структуры автономных распределенных гибридных энергокомплексов (АРГЭК) и способ управления энергетическим балансом в ней, т.е. потоками мощностей, циркулирующими в этой системе. Обобщенная схема методики проектирования оптимальной структуры АРГЭК включает следующие этапы (подзадачи): 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. Рассмотрена задача синтеза оптимальной структуры распределенной гибридной системы генерации, обеспечивающей требуемый уровень генерируемой мощности, минимальную стоимость и необходимую функциональную надежность. В работах[3-8] предложена методика проектирования интеллектуальных автономных распределенных гибридных энергокомплексов (АРГЭК) с ВИЭ, обеспечивающих минимум потребляемой энергии от глобальной (общегосударственной) сети, и дизельных электростанций для электроснабжения региональных бытовых и/или промышленных потребителей за счет максимального полезного использования энергии, генерируемых на основе возобновляемых источников энергии в самих системах АРГЭК, как в нормальных, так и в аварийных режимах их функционирования, т.е. за счет: аккумулялирования излишков

энергии в период ее избытка и отдачи потребителям в период дефицита; минимизации потерь электрической энергии путем эффективного управления потоками мощностей, циркулируемых в системах АРГЭК. Методика включает следующие этапы (подзадачи): разработка структуры распределенной гибридной системы генерации и транспортировки электроэнергии от источников до потребителей; разработка системы диагностики отказов генерирующих агрегатов и обрывов проводов на участках локальных сетей транспортировки электроэнергии и управления потоками мощностей, циркулируемых в системах АРГЭК как в нормальных, так и в аварийных режимах.

Настоящая работа является дальнейшим развитием работ [1-3] и посвящена:

– содержательной постановке задачи управления энергетическим балансом в системе АРГЭК, т.е. поддержания текущей потребляемой мощности потребителями в окрестности, требуемой номинальной мощности в каждый текущий момент времени t ;

– выбору и обоснованию структуры системы накопления и распределения потоков мощностей (НРПМ) с целью обеспечения физической реализуемости процесса управления энергетическим балансом в АРГЭК.

Обеспечение физической реализуемости процесса управления энергетическим балансом в АРГЭК

Структура управляемой системы НРПМ

Одной из основных компонент системы АРГЭК с позиции управления энергетическим балансом в ней является управляемая подсистема НРПМ с двухуровневой системой накопления энергии [3], граф структуры которой показан на рис. 1.

Вершинам графа структуры подсистемы НРПМ соответствуют: шина сборки и распределение потоков мощности ШСР; сумматор мощностей Σ ; устройство преобразования мощности постоянного тока в мощность переменного тока УП; дизельный генератор ДГ; глобальная (общегосударственная) сеть ГС; система аккумуляторных батарей первого уровня АКБ1, предназначенная для управления балансом мощностей, циркулируемых в НРПМ, при нормальном режиме функционирования системы АРГЭК и изменении потенциальных мощностей ВИЭ и мощности потребления в пределах их доверительных интервалов, оцененных на основе статистических данных на этапе синтеза оптимальной структуры распределенной гибридной системы генерации РГСГ, состоящей в свою очередь из распределенных систем ветряных генераторов ВГ, гидрогенераторов ГГ и солнечных батарей СБ [2]; система аккумуляторных батарей второго уровня АКБ2, предназначенная для согласования режимов функционирования систем АРГЭК и ГС и для управления совместно с АКБ1, ГС, ДГ, балансом мощностей в НРПМ при аварийном режиме АРГЭК, а также при выходе потенциальных мощностей ВИЭ и мощности потребления за пределы их доверительных интервалов.

Дугам графа структуры НРПМ соответствуют:

- текущая суммарная мощность $W_{\Gamma}(t)$, генерируемая в каждый момент времени t системой генерации первого уровня РГСГ, состоящей из распределенных систем ветряных генераторов ВГ, гидрогенераторов ГГ и солнечных батарей СБ, вырабатываемых мощностей, соответственно, $W_{ВГ}(t)$, $W_{ГГ}(t)$, $W_{СБ}(t)$:

$$W_{\Gamma}(t) = W_{ВГ}(t) + W_{ГГ}(t) + W_{СБ}(t), \quad (1)$$

здесь $W_{\Gamma}(t)$ – мощность постоянного тока, поскольку $W_{ВГ}(t)$, $W_{ГГ}(t)$ преобразованы из мощностей переменного тока в мощности постоянного тока на выходах генерирующих агрегатов систем ВГ, ГГ;

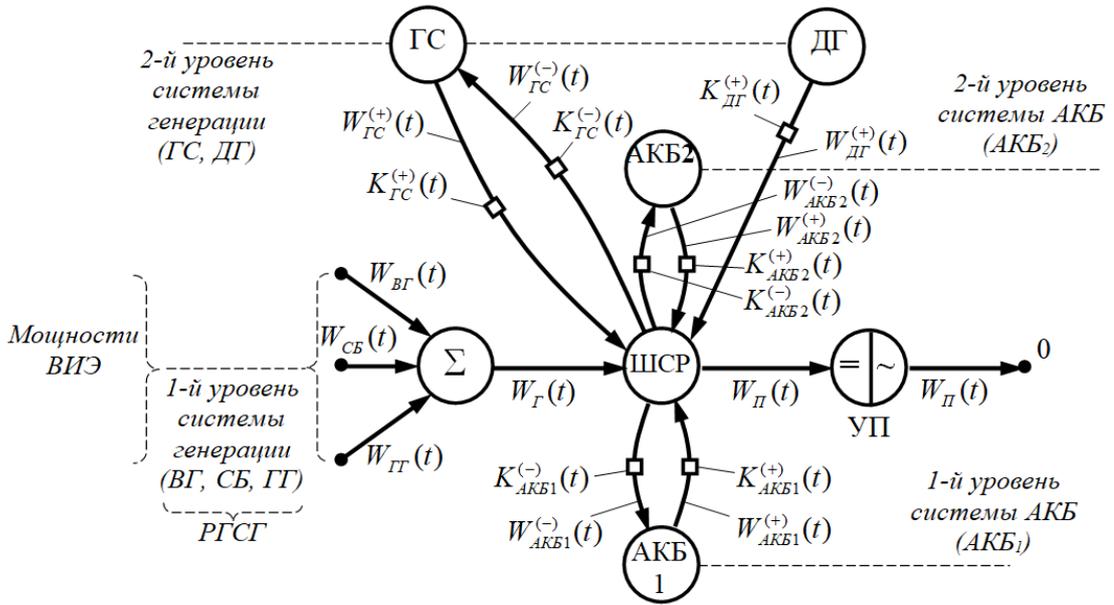


Рисунок 1 – Граф структуры управляемой системы накопления и распределения потоков мощностей

- мощность потребления $W_{\Pi}(t)$, преобразованная устройством УП из мощности постоянного тока в мощность переменного тока;
- мощность $W_{ДГ}^{(+)}(t)$ дизельного генератора ДГ, преобразованная из мощности переменного тока в мощность постоянного тока (ДГ принадлежит системе генерации второго уровня);
- зарядные мощности $W_{АКБ1}^{(-)}(t)$, $W_{АКБ2}^{(-)}(t)$ и разрядные мощности $W_{АКБ1}^{(+)}(t)$, $W_{АКБ2}^{(+)}(t)$ систем аккумуляторных батарей первого уровня АКБ1 и второго уровня АКБ2;
- мощность $W_{ГС}^{(-)}(t)$, поступающая в ГС при ее избытке в АРГЭК, в этом случае АРГЭК выполняет функцию источника энергии относительно ГС; мощность $W_{ГС}^{(+)}(t)$, поступающая в АРГЭК при ее дефиците, в этом случае АРГЭК выполняет функцию нагрузки относительно ГС;
- управляемые ключи, образующие множество $K_{НРПМ}$:

$$K_{НРПМ}(t) = \{K_{ГС}^{(+)}(t), K_{ГС}^{(-)}(t), K_{ДГ}^{(+)}(t), K_{АКБ1}^{(+)}(t), K_{АКБ1}^{(-)}(t), K_{АКБ2}^{(+)}(t), K_{АКБ2}^{(-)}(t)\}, \quad (2)$$

$$|K_{НРПМ}(t)| = 7,$$

где состояние каждого ключа $K(t)$ из множества $K_{НРПМ}(t)$ подчиняется следующему условию:

$$K(t) \in \{0, 1\}, \quad \forall K(t) \in K_{НРПМ}(t), \quad (3)$$

при этом если $K(t) = 0$, то соответствующая дуга отключена, в противном случае, т.е. при $K(t) = 1$ – включена. Состояние каждой пары ключей $(K^{(+)}(t), K^{(-)}(t))$ из множества пар

$$K_{НРПМ}^{(+,-)}(t) = \{(K_{ГС}^{(+)}(t), K_{ГС}^{(-)}(t)), (K_{АКБ1}^{(+)}(t), K_{АКБ1}^{(-)}(t)), (K_{АКБ2}^{(+)}(t), K_{АКБ2}^{(-)}(t))\}, \quad (4)$$

$$|K_{НРПМ}^{(+,-)}(t)| = 3$$

подчиняется следующему условию:

$$(K^{(+)}(t), K^{(-)}(t)) \in \{(0, 0), (0, 1), (1, 0)\}, \quad \forall (K^{(+)}(t), K^{(-)}(t)) \in K_{НРПМ}^{(+,-)}(t). \quad (5)$$

Управляемые ключи на дугах графа структуры системы НРПМ являются условными, т.е. использование их в реальных схемах реализации управления потоками

мощностей в НРПМ не является обязательным, так как процессы включения/отключения преобразователей могут быть легко обеспечены за счет управления транзисторами их силовой части. Они используются здесь для большей наглядности и удобства описания логики алгоритма управления и процесса циркуляции потоков мощностей в системе НРПМ.

Модификация структуры управляемой системы НРПМ с целью обеспечения физической реализуемости процесса управления энергетическим балансом в АРГЭК.

Из закона сохранения энергии следует, что в любой электрической системе соблюдается баланс электрической энергии. Уравнение баланса мощности для ШСР (рис. 1) имеет вид:

$$0 = W_{\Gamma}(t) - W_{\Pi}(t) + \left[\left(K_{\text{АКБ1}}^{(+)}(t) \cdot W_{\text{АКБ1}}^{(+)}(t) - K_{\text{АКБ1}}^{(-)}(t) \cdot W_{\text{АКБ1}}^{(-)}(t) \right) + \right. \\ \left. + \left(K_{\text{АКБ2}}^{(+)}(t) \cdot W_{\text{АКБ2}}^{(+)}(t) - K_{\text{АКБ2}}^{(-)}(t) \cdot W_{\text{АКБ2}}^{(-)}(t) \right) + \right. \\ \left. + \left(K_{\text{ГС}}^{(+)}(t) \cdot W_{\text{ГС}}^{(+)}(t) - K_{\text{ГС}}^{(-)}(t) \cdot W_{\text{ГС}}^{(-)}(t) \right) + K_{\text{ДГ}}^{(+)}(t) \cdot W_{\text{ДГ}}^{(+)}(t) \right]. \quad (6)$$

Для обеспечения надежного функционирования потребителей электрической энергии (электроприборов и оборудования) необходимо обеспечить их в каждый текущий момент времени t требуемой номинальной мощностью $W_{\Pi}^{\text{НОМ}}(t)$.

Одним из основных показателей качества систем электроснабжения является ее способность поставлять потребителям электрические мощности с минимальными отклонениями от требуемых номинальных.

С целью однозначности понимания введем на основе уравнения баланса мощности (6) формальные определения следующих понятий: *балансирующая мощность, дисбаланс генерируемой мощности, дисбаланс потребляемой мощности, избыток и дефицит мощности в системе АРГЭК.*

Определение 1. Балансирующей мощностью 1-го уровня называется мощность $W_{\text{бал}}^{(1)}(t)$:

$$W_{\text{бал}}^{(1)}(t) = W_{\text{АКБ}}^{(+,-)}(t) + W_{\text{бал}}^{(2)}(t), \quad (7)$$

управляющая величиной потребляемой мощности $W_{\Pi}(t)$ в каждый текущий момент времени t :

$$W_{\Pi}(t) = W_{\Gamma}(t) + W_{\text{бал}}^{(1)}(t), \quad (8)$$

где мощность $W_{\text{АКБ}}^{(+,-)}(t)$ называется суммарной мощностью зарядных/разрядных мощностей систем АКБ1, АКБ2 в текущий момент времени t :

$$W_{\text{АКБ}}^{(+,-)}(t) = \left(K_{\text{АКБ1}}^{(+)}(t) \cdot W_{\text{АКБ1}}^{(+)}(t) - K_{\text{АКБ1}}^{(-)}(t) \cdot W_{\text{АКБ1}}^{(-)}(t) \right) + \\ + \left(K_{\text{АКБ2}}^{(+)}(t) \cdot W_{\text{АКБ2}}^{(+)}(t) - K_{\text{АКБ2}}^{(-)}(t) \cdot W_{\text{АКБ2}}^{(-)}(t) \right), \quad (9)$$

а мощность $W_{\text{бал}}^{(2)}(t)$ – балансирующей мощностью 2-го уровня, предназначенной для компенсации рассогласования между суммарной мощностью зарядных/разрядных мощностей $W_{\text{АКБ}}^{(+,-)}(t)$ и требуемой балансирующей мощностью $W_{\text{бал}}^{(1)*}(t)$ 1-го уровня:

$$W_{\text{бал}}^{(2)}(t) = \left(K_{\text{ГС}}^{(+)}(t) \cdot W_{\text{ГС}}^{(+)}(t) - K_{\text{ГС}}^{(-)}(t) \cdot W_{\text{ГС}}^{(-)}(t) \right) + K_{\text{ДГ}}^{(+)}(t) \cdot W_{\text{ДГ}}^{(+)}(t). \quad (10)$$

В формуле (8) мощности $W_{\Pi}(t)$ и $W_{\Gamma}(t)$ – контролируемые (измеряемые) величины.

Функциональная схема управляемой системы НРПМ, поясняющая определение 1, показана на рис. 2.

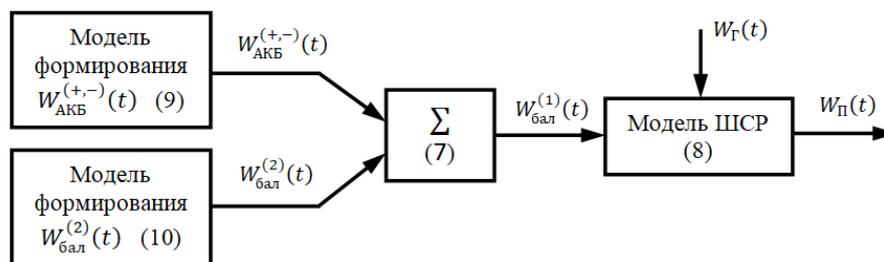


Рисунок 2 – Функциональная схема управляемой системы НРПМ, поясняющая определение 1

О п р е д е л е н и е 2. Отклонение $\varepsilon_{Г}(t)$ текущей генерируемой мощности $W_{Г}(t)$ от текущей номинальной мощности потребления $W_{П}^{НОМ}(t)$, т.е.

$$\varepsilon_{Г}(t) = W_{П}^{НОМ}(t) - W_{Г}(t), \quad (11)$$

называется дисбалансом текущей генерируемой мощности, при этом если $W_{Г}(t) > W_{П}^{НОМ}(t)$, то $\varepsilon_{Г}(t)$ называется избытком, в противном случае, т.е. при $W_{Г}(t) < W_{П}^{НОМ}(t)$, называется дефицитом текущей генерируемой мощности.

О п р е д е л е н и е 3. Отклонение $\varepsilon_{П}(t)$ текущей потребляемой мощности $W_{П}(t)$ от текущей номинальной мощности потребления $W_{П}^{НОМ}(t)$, т.е.

$$\varepsilon_{П}(t) = W_{П}^{НОМ}(t) - W_{П}(t), \quad (12)$$

называется дисбалансом текущей потребляемой мощности, при этом если $W_{П}(t) > W_{П}^{НОМ}(t)$, то $\varepsilon_{П}(t)$ называется избытком, в противном случае, т.е. при $W_{П}(t) < W_{П}^{НОМ}(t)$, называется дефицитом текущей потребляемой мощности.

Постановка задачи управления. На основе вышесказанного содержательную постановку задачи управления энергетическим балансом в системе АРГЭК можно сформулировать следующим образом: для каждого текущего момента времени t найти управляющее воздействие в виде балансирующей мощности $W_{бал}^{(1)}(t)$ (7) для управления величиной потребляемой мощности $W_{П}(t)$ из уравнения баланса (8) путем формирования текущей структуры системы НРПМ за счет выбора соответствующего состояния каждого ключа из множества $K_{НРПМ}(t)$ (2), подчиняющегося условиям (3)-(5), и выбора величин потоков мощностей, соответствующих включенным дугам графа структуры НРПМ с целью поддержания потребляемой мощности $W_{П}(t)$ потребителями в окрестности требуемой номинальной мощности $W_{П}^{НОМ}(t)$ с соблюдением требований к режимам зарядки/разрядки систем АКБ1, АКБ2.

Очевидна справедливость нижеприведенного утверждения.

Утверждение 1. При стремлении величины балансирующей мощности $W_{бал}^{(1)}(t)$ к величине дисбаланса генерируемой мощности $\varepsilon_{Г}(t)$ величина дисбаланса потребляемой мощности $\varepsilon_{П}(t)$ стремится к нулю, т.е.:

$$\lim_{W_{бал}^{(1)}(t) \rightarrow \varepsilon_{Г}(t)} \{ \varepsilon_{П}(t) = (W_{П}^{НОМ}(t) - W_{П}(t)) \} = 0. \quad (13)$$

Данное утверждение позволяет получить достаточно простую схему решения вышеприведенной задачи, однако полученный алгоритм управления энергетическим балансом будет *физически нереализуемым из-за информационной неопределенности* в нем: во-первых, текущая номинальная мощность потребления $W_{П}^{НОМ}(t)$ – величина, которую невозможно измерить, во-вторых, в формуле расчета текущей номинальной мощности потребления

$$W_{\Pi}^{\text{НОМ}}(t) = \sum_{i \in N_{\text{ПЭ}}} W_{\text{ПЭ}_i}^{\text{НОМ}}(t) + \Delta W_{\text{ЛС}}(t), \quad (14)$$

$$W_{\text{ПЭ}_i}^{\text{НОМ}}(t) = \sum_{j \in N_{\text{ЭП}_i}(t)} W_{\text{ЭП}_j}^{\text{НОМ}}(t), \forall i \in N_{\text{ПЭ}} = \{1, 2, \dots, p\}, \quad (15)$$

$$N_{\text{ЭП}_i}(t) \subseteq N_{\text{ЭП}}, \forall i \in N_{\text{ПЭ}}, \forall t \in [t_0, t_k], \quad (16)$$

имеются неопределенности следующего характера: каждое i -е текущее множество $N_{\text{ЭП}_i}(t)$, $\forall i \in N_{\text{ПЭ}}$ из (15), (16), характеризующее состав подключающихся в каждый текущий момент времени t электроприборов (ЭП) к i -му узлу нагрузки локальной сети (ЛС), неконтролируемо,

где:

– $W_{\text{ПЭ}_i}^{\text{НОМ}}(t), \forall i \in N_{\text{ПЭ}}$ – номинальная потребляемая мощность i -го узла нагрузки ЛС; $N_{\text{ПЭ}} = \{1, 2, \dots, p\}$ – множество номеров узлов нагрузки; p – количество узлов; $\Delta W_{\text{ЛС}}(t)$ – потеря мощности в сети ЛС;

– $W_{\text{ЭП}_j}^{\text{НОМ}}(t), \forall j \in N_{\text{ЭП}_i}(t)$ – номинальная потребляемая мощность j -го ЭП, подключенного в момент времени t к i -му узлу нагрузки ЛС; $N_{\text{ЭП}_i}(t)$ – множество номеров ЭП, подключенных к i -му узлу нагрузки ЛС в текущий момент времени t , являющееся подмножеством некоторого универсального множества ЭП – $N_{\text{ЭП}}$.

Существует множество вариантов преодоления данной информационной неопределенности (см. (14)–(16)). Ниже рассматривается один из вариантов, справедливость которого дает следующее очевидное утверждение.

Утверждение 2. При стремлении величины текущего напряжения $u_{\text{ШСР}}(t)$ узла ШСР к номинальной величине $u_{\text{ШСР}}^{\text{НОМ}}$, величина дисбаланса потребляемой мощности $\varepsilon_{\Pi}(t)$ (12) стремится к нулю, т.е.:

$$\lim_{u_{\text{ШСР}}(t) \rightarrow u_{\text{ШСР}}^{\text{НОМ}}} \{\varepsilon_{\Pi}(t) = \{[W_{\Pi}^{\text{НОМ}}(t) = u_{\text{ШСР}}^{\text{НОМ}} \cdot i_{\Pi}^{\text{НОМ}}(t)] - [W_{\Pi}(t) = u_{\text{ШСР}}(t) \cdot i_{\Pi}(t)]\} = 0. \quad (17)$$

Режим функционирования любой управляемой динамической системы характеризуется соответствующим ей состоянием. Как известно из теории электрических цепей [9], состояние переходного процесса, протекающего в любой электрической цепи, характеризуется величинами токов, протекающих через индуктивные элементы цепи и уровнями напряжений на конденсаторах цепи, задающих в свою очередь уровни напряжений в узлах их присоединения.

В данном случае для задания текущего напряжения $u_{\text{ШСР}}(t)$ узла ШСР достаточно подключить к данному узлу, аналогично [1], конденсатор с соответствующей емкостью $C_{\text{ШСР}}$, как показано на рис. 3.

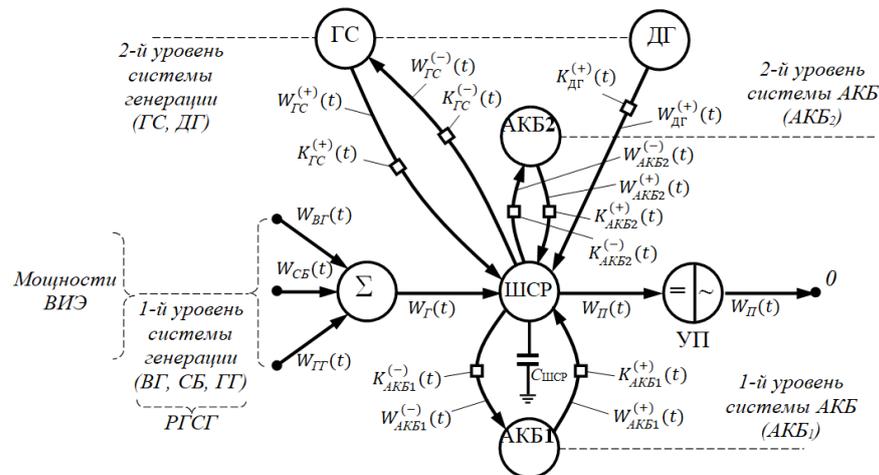


Рисунок 3 – Граф структуры управляемой системы НРПМ, обеспечивающей физическую реализуемость процесса управления энергетическим балансом

Заключение

Таким образом, в данной работе разрешены отдельные вопросы, предусмотренные в рамках методики проектирования [2, 3] интеллектуальных автономных распределенных гибридных энергокомплексов (АРГЭК) с ВИЭ и с накопителями энергии, функционирующих в сетевом режиме и в режиме взаимодействия с глобальной (общегосударственной) сетью (ГС), и которые в зависимости от дефицита или избытка энергии в них могут работать относительно ГС соответственно как нагрузка или источник энергии, а именно:

– сформулирована содержательная постановка задачи управления энергетическим балансом в системе АРГЭК как задача поддержания текущей потребляемой мощности потребителями в окрестности, требуемой номинальной мощности в каждый момент времени t ;

– на основе анализа процесса управления энергетическим балансом в АРГЭК произведен выбор и обоснование структуры системы накопления и распределения потоков мощностей (НРПМ) с позиции обеспечения физической реализуемости процесса управления энергетическим балансом в ней, а также процесса согласования режимов взаимодействия АРГЭК и ГС. Это достигается за счет включения в систему НРПМ конденсатора, подключенного к ее шине сборки и распределения, и накопителя АКБ с двухуровневой (АКБ1, АКБ2) структурой, при этом: АКБ1 1-го уровня – для управления балансом мощностей в НРПМ при нормальном режиме АРГЭК и изменении мощностей ВИЭ и потребления в пределах их доверительных интервалов, оцененных на этапе проектирования; АКБ2 2-го уровня – для согласования режимов работ АРГЭК и ГС и для управления совместно с АКБ1 1-го уровня, ГС, дизельным генератором, балансом мощностей в НРПМ при аварийном режиме АРГЭК, а также при выходе мощностей ВИЭ и потребления за пределы их доверительных интервалов.

Литература:

1. 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.
2. 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., ArfanKh., Zhabudaev T., Satarkulov T.K. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – Volume 46, Issue 70. – P. 34542–34549.
3. Асанова С.М. Методика проектирования интеллектуальных автономных распределенных гибридных энергокомплексов с возобновляемыми источниками энергии / Асанова С.М., Суеркулов С., Бакасова А.Б., Сатаркулов К., Асанов М.С. // Проблемы автоматики и управления, НАН КР. – Март 2022. №1 (43). – С. 21–32.
4. Лукутин Б.В. Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций / Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. // Электричество. – 2012. – №6. – С. 24–29.
5. Asanov M.S. Algorithm for calculation and selection of micro hydropower plant taking into account hydrological parameters of small watercourses mountain rivers of Central Asia / Asanov M.S., Safaraliev M., Zhabudaev T., Kokin S.E., Asanova S.M., Dmitriev S.A., Obozov A.J., Ghulomzoda A.H. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – Volume 46, Issue 75. – P. 37109–37119.
6. Asanova S.M. Method for designing drop-of-wire recognition systems on sections of undistorted two-wire power transmission lines / Asanova S.M., Askarbek N., Suerkulov S.M., Ahyoev J.S., Asanova D.U., Safaraliev M.K. // IOP Conference Series: Materials

- Science and Engineering. 2020 - 15. Сеп. "15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy". – P. 012114.
7. Asanov M. The use of Petri computing networks for optimization of the structure of distribution networks to minimize power losses. / Asanov M., Asanova S.M., Kokin S., Satarkulov K., Dmitriev S., Safaraliev M. // Energy Reports. –2020. – Т. 6. № Suppl. 9. – P. 1337–1343.
 8. Asanova S.M. Mathematical modelling of mutual electromagnetic influences of related power transmission lines in a transition process MODE. /Asanova S.M., Suerkulov S.M., Safaraliev M.K., Asanova D.U., Milutin R.S. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 15. Сеп. "15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy". - P. 012113.
 9. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов / Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. – СПб.: Питер, 2004. – 576 с.