

Использование сегментированной статической характеристики по частоте для поддержания уровня заряда системы накопления электроэнергии

УДК 621.311:621.354

В России широкое применение, в том числе в изолированных энергорайонах, находят объекты распределенной генерации (РГ) на основе топливных генерирующих установок (ГУ), а также возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Резкие изменения нагрузки или выработки электроэнергии объектами ВИЭ могут вызывать недопустимые кратковременные отклонения частоты/напряжения, что приводит к отключениям устройствами защиты топливных ГУ. Применение систем накопления электроэнергии (СНЭЭ), учитывая высокое быстродействие их инверторов, позволяет компенсировать мгновенные небалансы активной и реактивной мощности, предотвращая отключения топливных ГУ и нарушения электроснабжения потребителей. Предложен модифицированный способ поддержания уровня заряда (SoC) СНЭЭ за счет изменения статической характеристики по частоте, который не требует наличия канала передачи данных между СНЭЭ и выделенной для его поддержания ГУ, а также представлены преимущества его применения. Данный способ заключается в разделении статической характеристики СНЭЭ на отдельные участки с разной крутизной (коэффициентом статизма) в зависимости от текущей нагрузки СНЭЭ и SoC, а также смещении статической характеристики по частоте по определенному закону. Приведены результаты имитационного моделирования предложенного способа поддержания SoC СНЭЭ в различных режимах электроснабжения нагрузки в изолированном энергорайоне, выполненные в программной среде MATLAB Simulink, подтвердившие его эффективность.

Илюшин П.В.,

д.т.н., главный научный сотрудник, руководитель Центра «Интеллектуальные электроэнергетические системы и распределенная энергетика» ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН»

Шавловский С.В.,

эксперт по развитию направления возобновляемой энергетики и интеллектуальных сетей АО «Электронмаш»

Ключевые слова:

система накопления электроэнергии, дизель-генераторная установка, изолированный энергорайон, статическая характеристика по частоте, коэффициент статизма, уровень заряда

Развитие РГ в России на протяжении последнего десятилетия происходит в основном за счет ввода объектов РГ на основе газотурбинных (ГТУ), газопоршневых (ГПУ) и дизельных (ДГУ) генерирующих установок. Объекты РГ сооружаются, как правило, крупными промышленными предприятиями нефтегазодобывающей, горнодобывающей, металлургической, целлюлозно-бумажной и химической отраслей промышленности, что позволяет получать более дешевые энергоресурсы для снижения себестоимости и повышения конкурентоспособности производимой продукции [1].

Объекты ВИЭ в России получают свое распространение в изолированных энергорайонах, системах электроснабжения ответственных потребителей (резервирование основных источников), а также в домохозяйствах в виде микрогенерации. В ряде

случаев строительство объектов ВИЭ эффективнее сооружения протяженных электрических сетей до отдельных населенных пунктов и предприятий на Крайнем Севере и Дальнем Востоке страны или дизельных электростанций из-за высокой стоимости доставки топлива [2].

От объектов РГ ожидается минимальная реакция на внешние возмущения (быстрое восстановление нормального режима работы), а также обеспечение надежного энергоснабжения инфраструктурных объектов в условиях нарастающего старения электросетевого оборудования, роста количества и последствий катаклизмов природного и техногенного характера.

Топливные ГУ, как правило, имеют малые значения механических постоянных инерции (T_j), что приводит в изолированных энергорайонах к недопустимым отклонениям частоты и напряжения при резких изменениях нагрузки или выработки электроэнергии объектами ВИЭ [3]. В этом случае топливные ГУ отключаются устройствами релейной защиты (РЗ) или технологическими защитами с нарушением электроснабжения потребителей.

Высокое быстродействие инверторов СНЭЭ, по сравнению с системами регулирования топливных ГУ, позволяет эффективно их использовать в составе изолированных энергорайонов для компенсации мгновенных небалансов мощности. Инвертор СНЭЭ, с учетом ограничений на скорость заряда/разряда аккумуляторной батареи (АБ), может задавать частоту/напряжение в изолированном энергорайоне. Наиболее эффективно использовать СНЭЭ в режиме имитации синхронного генератора, поддерживающего частоту/напряжение в соответствии со статической характеристикой. Независимо от выбранного режима работы СНЭЭ наиболее важным остается вопрос поддержания оптимального уровня заряда (State of Charge — SoC) АБ в заданном диапазоне, в зависимости от прогноза режима работы СНЭЭ [4].

Целью статьи является представление модифицированного способа поддержания SoC СНЭЭ, заключающегося в сегментировании статической характеристики по частоте на отдельные участки с разными коэффициентами статизма, в зависимости от текущей нагрузки СНЭЭ и SoC, а также смещении характеристики по определенному закону. Этот способ не требует наличия канала передачи данных между СНЭЭ и выделенной для поддержания SoC ГУ.

ОБЗОР РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИНВЕРТОРОВ И СПОСОБОВ ПОДДЕРЖАНИЯ УРОВНЯ ЗАРЯДА СНЭЭ

В изолированных энергорайонах для управления режимами применяются централизованные или децентрализованные системы автоматического регулирования (САР). Инверторы СНЭЭ, учитывая их быстродействие, играют важную роль в предотвращении отклонений режимных параметров за пределы области допустимых значений при возникновении различных возмущений.

Известны следующие режимы работы СНЭЭ, которые определяются типами применяемых инверторов: $U/f = \text{const}$, PQ -control, режим работы со статической характеристикой по частоте и/или напряжению.

В режиме $U/f = \text{const}$ СНЭЭ поддерживает частоту и напряжение в изолированном энергорайоне независимо от текущих значений выработки активной и реактивной мощности другими ГУ, выполняя функцию ведущего инвертора. Регулятор частоты и напряжения СНЭЭ задает величину выработки активной и реактивной мощности для поддержания частоты и напряжения в пределах заданных уставок, реализуя первичное регулирование.

В режиме PQ -control (источник тока) величина выработки активной и реактивной мощности СНЭЭ поддерживается постоянной, пока частота и напряжение находятся в допустимом диапазоне. Поэтому, в режиме PQ -control СНЭЭ не участвует в общем первичном регулировании. Уставки по P и Q для СНЭЭ при этом задаются либо контроллером СНЭЭ, либо САР изолированного энергорайона, что обеспечивает ее участие во вторичном регулировании [5, 6].

Если СНЭЭ работает со статической характеристикой по частоте и/или напряжению, то она облегчает условия по регулированию частоты/напряжения в изолированном энергорайоне для других ГУ, в том числе топливных, участвуя во вторичном регулировании режимных параметров [7].

В централизованной САР осуществляется оценка режимных параметров и формирование управляющих воздействий для контроллеров ГУ, объектов ВИЭ, СНЭЭ и нагрузки с целью обеспечения надежного и бесперебойного электроснабжения потребителей. Другие цели (например, снижение удельного расхода топлива, максимальное использование выработки объектов ВИЭ и др.) не рассматриваются в качестве приоритетных.

При децентрализованной САР каждый из объектов регулирования в изолированном энергорайоне управляется собственным контроллером, который задает необходимые уставки исходя из текущих режимных параметров. Ввиду простоты структуры анализируемого изолированного энергорайона в статье рассмотрено использование децентрализованной САР.

Независимо от выбранного режима работы СНЭЭ важным аспектом ее функционирования является поддержание уровня заряда АБ на оптимальном уровне. Без соответствующего управления СНЭЭ не может выполнять эту функцию для обеспечения регулирования частоты в заданном диапазоне, так как энергоемкость АБ СНЭЭ выбирается сравнительно небольшой. В результате, при крайних значениях SoC АБ (0% или 100%) возможности участия СНЭЭ в регулировании частоты значительно уменьшаются, а регулировочный диапазон по мощности снижается не менее чем в два раза. В работах [8, 9] рассматриваются различные способы поддержания SoC СНЭЭ.

К первой группе относятся способы для СНЭЭ, реализующих функцию ведущего инвертора, при

этом выделенная ГУ поддерживает SoC СНЭЭ, получая информацию о его текущем значении. Эта информация должна передаваться от СНЭЭ по каналу передачи данных в контроллер ГУ, при этом мощность ГУ, будет пропорциональна отклонению SoC от заданной уставки (рисунок 1а). Возможен вариант ее определения по статической характеристике $P = f(dSoC / dt)$, тогда ГУ будет участвовать во вторичном регулировании.

Наличие канала связи для передачи значений SoC позволяет обеспечить высокую точность поддержания частоты и среднего значения SoC при относительной простоте реализации алгоритма в контроллере СНЭЭ в случае применения в изолированном энергорайоне с высокой долей ВИЭ. К недостаткам следует отнести то, что мощность ведущего инвертора СНЭЭ должна быть рассчитана на $\approx 100\%$ нагрузки энергорайона, необходимы дополнительные затраты на создание канала передачи данных, а его повреждение приводит к отказу САУ (выход значения SoC за допустимый диапазон), а кроме того, необходима переконфигурация САУ ГУ (требуется согласование с заводом-изготовителем ГУ).

Ко второй группе относятся способы, не использующие канал передачи данных между контроллером СНЭЭ и контроллером ГУ (рисунок 1б), основанные на применении статической характеристики по частоте.

В работах [10–17] предлагается изменять наклон статической характеристики по частоте СНЭЭ по определенному закону в зависимости от значения SoC. При этом в процессах разряда/заряда СНЭЭ будет выдавать/потреблять большую или меньшую активную мощность. Этот подход эффективно применять для выравнивания значений SoC СНЭЭ, работающих параллельно. В работах [18–21] предлагается смещать статическую характеристику по частоте СНЭЭ вдоль оси частоты в зависимости от значения SoC, при этом в процессах разряда/заряда СНЭЭ будет изменяться интенсивность отклика на изменения частоты в изолированном энергорайоне.

Этот подход обладает высокой надежностью поддержания заданной величины SoC, обеспечивает возможность параллельной работы нескольких СНЭЭ с одинаковыми значениями SoC и может быть реализован на действующих объектах РГ (не требуется переконфигурация САУ ГУ). К его недостаткам следует отнести то, что СНЭЭ не участвует в первичном регулировании частоты, а только во вторичном, значение SoC поддерживается в допустимом диапазоне, а не около заданного значения, при этом контроллер СНЭЭ преобразуется в САУ с более сложной структурой и алгоритмами.

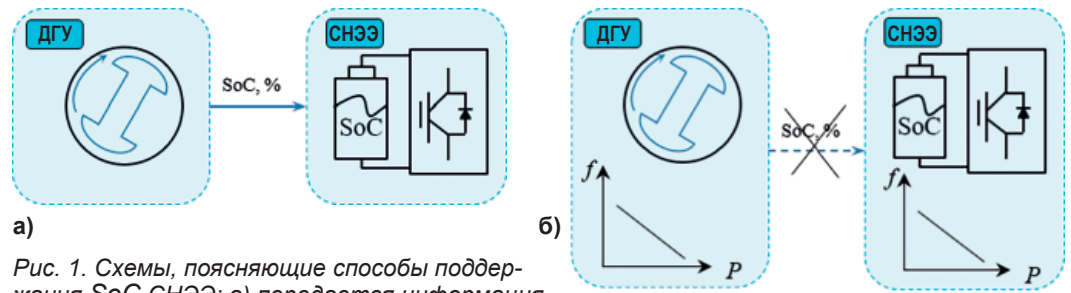


Рис. 1. Схемы, поясняющие способы поддержания SoC СНЭЭ: а) передается информация о текущем значении SoC; б) применяется статическая характеристика по частоте

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ СПОСОБ ПОДДЕРЖАНИЯ SoC СНЭЭ

В предлагаемом модифицированном способе на СНЭЭ, работающей в режиме PQ -control, поддерживается необходимое значение SoC за счет изменения наклона статической характеристики по частоте СНЭЭ и ее смещения по оси частоты в зависимости от значения SoC. В общем случае статическая характеристика мощности по частоте описывается выражением:

$$f - f_0 = -K_{\text{СНЭЭ}} (P_{\text{СНЭЭ}} - P_{\text{СНЭЭ}0}), \quad (1)$$

где f — текущая частоты в энергорайоне, Гц; f_0 — номинальная частота, Гц; $K_{\text{СНЭЭ}}$ — коэффициент статизма СНЭЭ, Гц/кВт; $P_{\text{СНЭЭ}}$ — текущая активная мощность СНЭЭ, кВт; $P_{\text{СНЭЭ}0}$ — активная мощность СНЭЭ при f_0 , кВт.

Коэффициент $K_{\text{СНЭЭ}}$ отражает взаимосвязь между изменением частоты в изолированном энергорайоне с изменением активной мощности СНЭЭ как реакции на ее изменение.

Первая из степеней свободы в выражении (1) — это $K_{\text{СНЭЭ}}$, определяющий угол наклона статической характеристики по частоте СНЭЭ. Добавив в выражение (1) коэффициент, учитывающий изменение SoC, возможно изменить $K_{\text{СНЭЭ}}$, а значит, и интенсивность отклика СНЭЭ, на изменение частоты при разных значениях SoC. В соответствии с [9, 20], принимая $P_{\text{СНЭЭ}0} = 0$, выражение (1) для режимов заряда и разряда соответственно принимает вид:

$$\begin{aligned} f - f_0 &= -K_{\text{СНЭЭ}} \cdot P_{\text{СНЭЭ}} = -K_{\text{СНЭЭ}0} \cdot P_{\text{СНЭЭ}} / \text{SoC}^n, P_{\text{СНЭЭ}} \geq 0, \\ f - f_0 &= -K_{\text{СНЭЭ}} \cdot P_{\text{СНЭЭ}} = -K_{\text{СНЭЭ}0} \cdot \text{SoC}^n \cdot P_{\text{СНЭЭ}}, P_{\text{СНЭЭ}} \leq 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $K_{\text{СНЭЭ}0}$ — коэффициент статизма СНЭЭ при $\text{SoC} = 1$, Гц/кВт; n — показатель степенной функции ($n > 0$).

Получим из выражений (2) текущую мощность СНЭЭ:

$$\begin{aligned} P_{\text{СНЭЭ}} &= - (f - f_0) \cdot \text{SoC}^n / K_{\text{СНЭЭ}0}, P_{\text{СНЭЭ}} \geq 0 \\ &\text{(разряд, если } f < f_0; \text{ SoC } \downarrow), \\ P_{\text{СНЭЭ}} &= - (f - f_0) / (K_{\text{СНЭЭ}0} \cdot \text{SoC}^n), P_{\text{СНЭЭ}} \leq 0 \\ &\text{(заряд, если } f > f_0; \text{ SoC } \uparrow). \end{aligned} \quad (3)$$

При отклонении частоты вниз от f_0 САУ СНЭЭ формирует задание по мощности $P_{\text{СНЭЭ}} \geq 0$, и СНЭЭ начинает разряжаться, выдавая мощность в изолированный энергорайон. Мощность СНЭЭ при этом уменьшается одновременно с SoC. При отклонении частоты вверх от f_0 САУ СНЭЭ формирует задание по мощности $P_{\text{СНЭЭ}} \leq 0$, и СНЭЭ начинает заряжаться, потребляя мощность из изолированного энергорайона. Мощность СНЭЭ при этом увеличивается одновременно с SoC.

рует задание по мощности $P_{\text{СНЭЭ}} \leq 0$, и СНЭЭ начинает заряжаться. Мощность СНЭЭ при этом растет одновременно с SoC, как показано на рисунке 2.

Показатель степени n в выражениях (3) оказывает существенное влияние на мощность СНЭЭ в зависимости от SoC. Такой способ регулирования СНЭЭ (минимальное время отклика) может привести к возникновению динамической неустойчивости при резких кратковременных изменениях частоты [14] в изолированном энергорайоне. Этот аспект должен быть рассмотрен при выполнении расчетов переходных процессов в процессе проектирования изолированного энергорайона. Малые значения показателя n приводят к незначительному изменению наклона статической характеристики по частоте, при этом $K_{\text{СНЭЭ}0} \approx K_{\text{СНЭЭ}}$, а при больших его значениях наклон статической характеристики существенно изменяется при изменении значения SoC.

На рисунке 3 приведены графики чувствительности $P_{\text{СНЭЭ}}$ к вариациям n в диапазоне от 0,1 до 2 при выбранном $K_{\text{СНЭЭ}0} = 10^{-6}$ Гц/Вт в зависимости от значений SoC. На рисунке 3а представлен режим заряда СНЭЭ с изменением частоты $f - f_0 = 0,5$ Гц, а на рисунке 3б режим разряда СНЭЭ с изменением частоты $f - f_0 = -0,5$ Гц. Мощность СНЭЭ ограничена САР на уровне 500 кВт.

Анализ рисунка 3 показывает, что с ростом значения n отклик СНЭЭ на изменение SoC существенно увеличивается, поэтому целесообразно ограничить диапазон изменения SoC (заданы уставки), в пределах которого будет действовать предложенный модифицированный способ.

Второй степенью свободы в выражении (1) является частота (f), следовательно, возможно смещать статическую характеристику по оси частоты на некоторую величину Δf в зависимости от значения SoC.

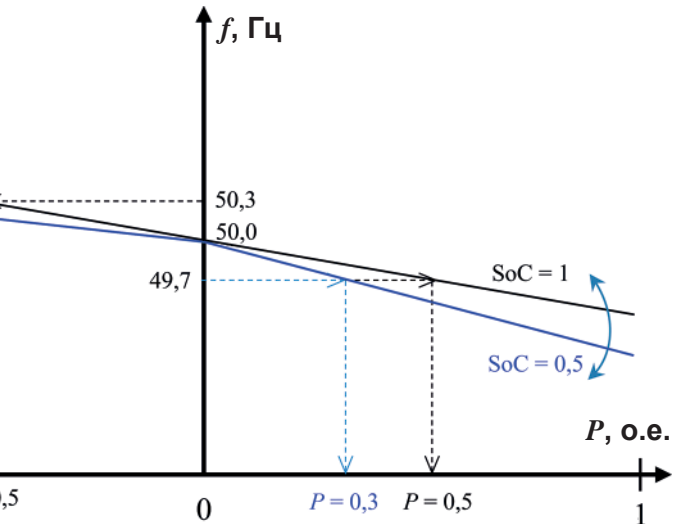
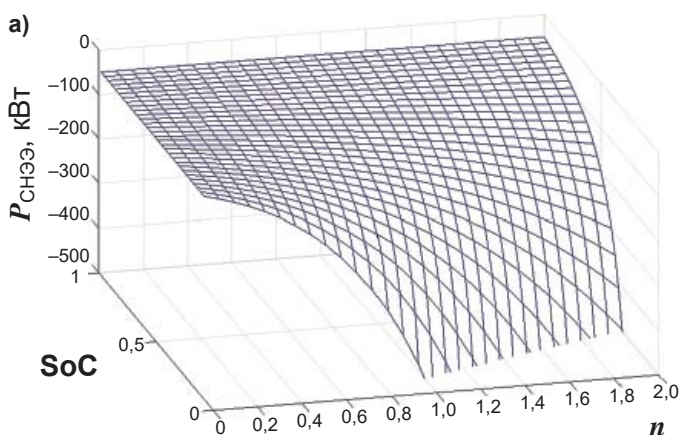


Рис. 2. Статическая характеристика $P(f)$ с коэффициентом статизма, зависящим от SoC

В этом случае выражения (3) для мощности СНЭЭ примет вид:

$$P_{\text{СНЭЭ}} = -((f - f_0) - \Delta f) / K_{\text{СНЭЭ}0}, P_{\text{СНЭЭ}} \geq 0 \quad (\text{разряд, если } f < f_0; \text{ SoC } \downarrow), \quad (4)$$

$$P_{\text{СНЭЭ}} = -((f - f_0) + \Delta f) / K_{\text{СНЭЭ}0}, P_{\text{СНЭЭ}} \leq 0 \quad (\text{заряд, если } f > f_0; \text{ SoC } \uparrow).$$

Значение Δf может линейно зависеть от SoC, как в выражении (5), и задаваться фиксированной величиной в зависимости от текущего значения SoC или же иметь вид кусочно-линейной функции.

$$\Delta f = m_{\text{SoC}} (\text{SoC} - \text{SoC}_{\text{уст}}), \quad (5)$$

где m_{SoC} — коэффициент пропорциональности; $\text{SoC}_{\text{уст}}$ — уставочное значение SoC.

При разряде СНЭЭ статическая характеристика по частоте должна постепенно смещаться вниз по оси частоты, в результате чего мощность разряда СНЭЭ будет уменьшаться по линейному закону, а при заряде — подниматься вверх, в результате чего мощность заряда будет увеличиваться, как показано на рисунке 4.

Анализ чувствительности $P_{\text{СНЭЭ}}$ к изменению m_{SoC} в статье не представлен, но следует отметить, что максимальное значение Δf не должно быть больше фактического отклонения частоты в изолированном энергорайоне. В противном случае может произой-

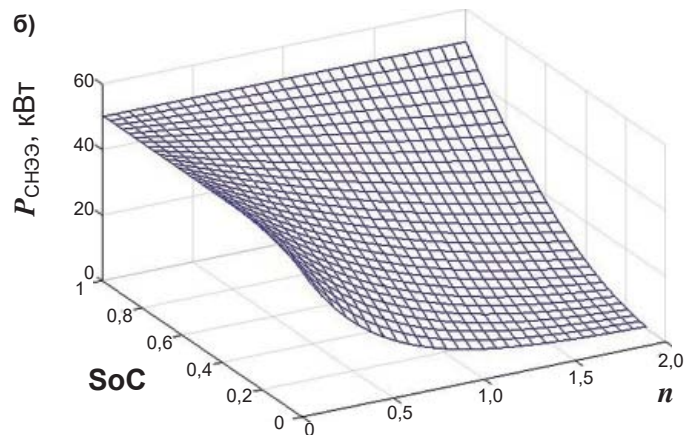


Рис. 3. Графики чувствительности $P_{\text{СНЭЭ}}$ к изменению n в зависимости от значений SoC: а) режим заряда СНЭЭ; б) режим разряда СНЭЭ

ти резкое смещение рабочей точки характеристики в область противоположного режима работы СНЭЭ. При этом САР СНЭЭ сформирует некорректную команду (например, команду на заряд вместо разряда) и режим выйдет за пределы области допустимых значений.

По результатам рассмотрения особенностей смещения статической характеристики в зависимости от значения SoC в статье принято регулирование мощности СНЭЭ в соответствии с выражением (6), направленное на стабилизацию частоты и поддержание SoC в заданном диапазоне. Оценим эффективность такого подхода.

$$P_{\text{СНЭЭ}} = -((f - f_0) - \Delta f) \cdot \text{SoC}^n / K_{\text{СНЭЭ}0}, P_{\text{СНЭЭ}} \geq 0$$

(разряд, если $f < f_0$; SoC ↓),

$$P_{\text{СНЭЭ}} = -((f - f_0) + \Delta f) / (K_{\text{СНЭЭ}0} \cdot \text{SoC}^n), P_{\text{СНЭЭ}} \leq 0$$

(заряд, если $f > f_0$; SoC ↑).

Для эффективного регулирования частоты диапазон изменения мощности СНЭЭ в обе стороны должен быть максимальным, что, как правило, возможно при SoC = 0,5 (50%). Независимо от того, участвует СНЭЭ в первичном или вторичном регулировании частоты в изолированном энергорайоне, существует оптимальный диапазон SoC для целей регулирования частоты, за пределы которой не рекомендуется выходить [22]. Глубокое циклирование

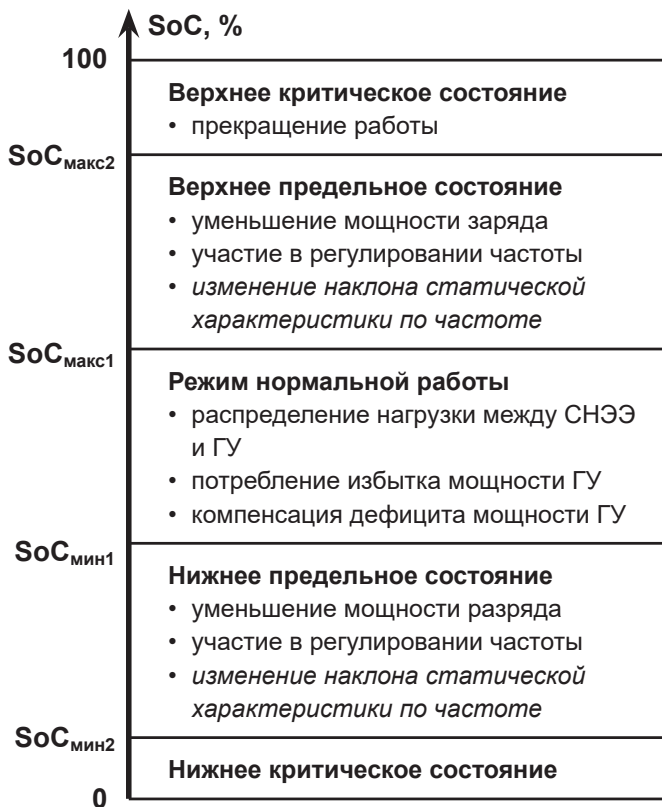


Рис. 5. График разделения диапазона значений SoC на области работы СНЭЭ

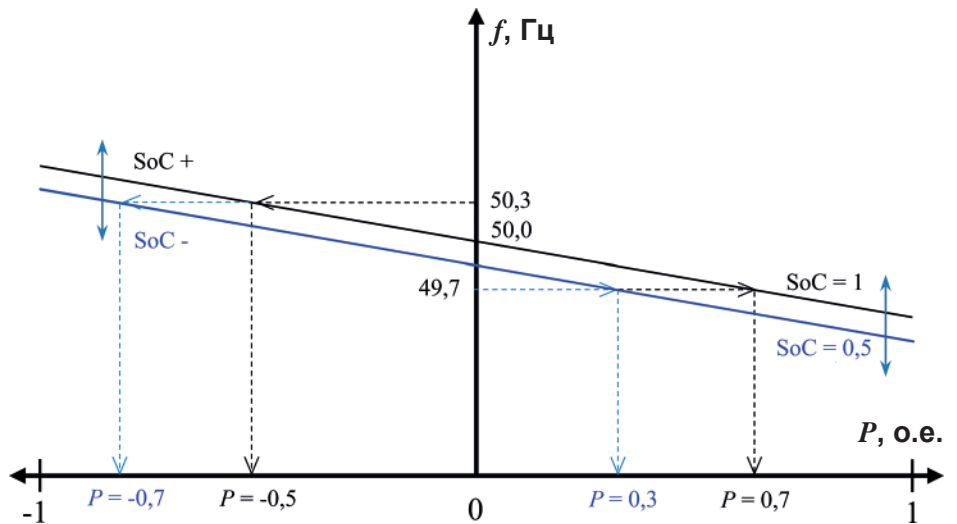


Рис. 4. Статическая характеристика $P(f)$, смещаемая по оси частоты в зависимости от значения SoC

АБ, также как и регулярный заряд до 100%, снижают календарный и циклический срок ее службы, что выражается в преждевременной потере энергоемкости [23]. Поэтому СНЭЭ должна работать в оптимальном диапазоне SoC со смещением статической характеристики по частоте в зависимости от значения SoC, как рекомендовано в [19], но дополнительно целесообразно изменять наклон статической характеристики в зависимости от SoC в областях верхнего и нижнего предельных состояний СНЭЭ по SoC, как показано на рисунке 5.

Величина Δf в выражении (6) определяется кусочно-линейной функцией:

$$\Delta f = \begin{cases} -P_{\text{СНЭЭ}} \cdot R, & \text{если } \text{SoC} \geq \text{SoC}_{\text{макс}2}, \\ f_{\text{макс}} - f_{\text{пред.макс}}, & \text{если } \text{SoC}_{\text{макс}1} \leq \text{SoC} \leq \text{SoC}_{\text{макс}2}, \\ 0, & \text{если } \text{SoC}_{\text{мин}1} \leq \text{SoC} \leq \text{SoC}_{\text{макс}1}, \\ f_{\text{мин}} - f_{\text{пред.мин}}, & \text{если } \text{SoC}_{\text{мин}2} \leq \text{SoC} \leq \text{SoC}_{\text{мин}1}, \\ -P_{\text{СНЭЭ}} \cdot R, & \text{если } \text{SoC} \leq \text{SoC}_{\text{мин}2}, \end{cases} \quad (7)$$

где R — коэффициент статизма по частоте генератора ДГУ; $f_{\text{макс}} / f_{\text{мин}}$ — критическое максимальное/минимальное значение частоты; $f_{\text{пред.макс}} / f_{\text{пред.мин}}$ — максимальный/минимальный предел смещения по частоте.

Изменение угла наклона статической характеристики в областях верхнего и нижнего предельных состояний SoC усиливает отклик СНЭЭ в нужном направлении при приближении SoC к ним.

На рисунке 6 представлен общий вид сегментированной статической характеристики СНЭЭ со смещением по оси частоты и изменением коэффициента статизма в зависимости от значения SoC (черная линия — статическая характеристика ДГУ; зеленая линия — разделенная на участки статическая характеристика СНЭЭ при SoC = 0,5; вертикальный участок на оси частоты — зона нечувствительности).

На наклонных участках характеристики происходит распределение мощности между ДГУ и СНЭЭ, а на горизонтальных мощность СНЭЭ поддерживается таким образом, чтобы обеспечить постоянство выдачи мощности ДГУ. При разряде СНЭЭ статическая характеристика смещается вверх, а при заряде — вниз на Δf . При достижении нижнего предельно-

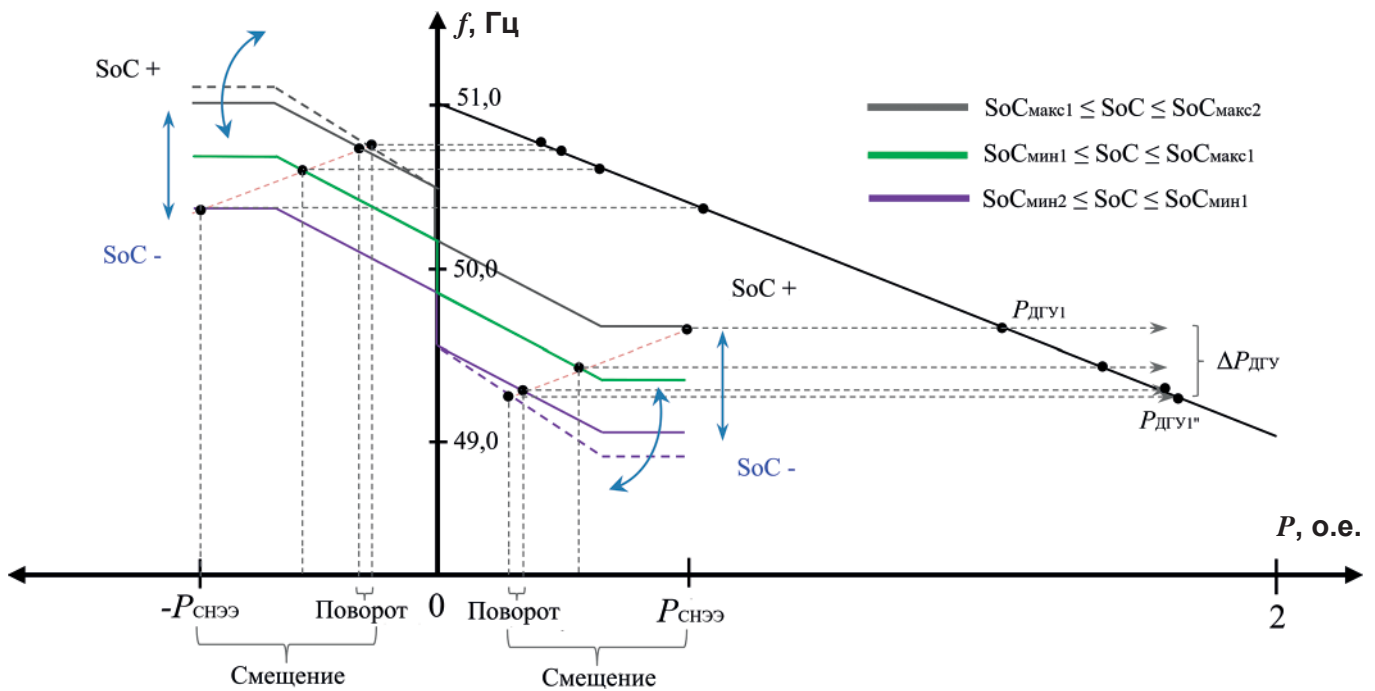


Рис. 6. Сегментированная статическая характеристика СНЭЭ

го или верхнего предельного состояния SoC наклон статической характеристики по частоте СНЭЭ изменяется, чтобы увеличить мощность разряда при высоких значениях SoC или уменьшить при низких. Перемещение рабочих точек СНЭЭ и ДГУ на рисунке 6 можно отследить по серым пунктирным линиям. Описание регулятора, реализующего данный закон регулирования, приведено в [19].

ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для исследования модифицированного способа поддержания SoC СНЭЭ, использующего не только смещение, но и изменение угла наклона статической характеристики по частоте в зависимости от значения SoC, в программной среде MATLAB Simulink была подготовлена имитационная математическая модель изолированного энергорайона. Модель включает в себя ДГУ, СНЭЭ и группу нагрузок, работающих на общие шины напряжением 0,4 кВ.

Модель ДГУ. Модель ДГУ представлена с автоматическим регулятором частоты вращения (АРЧВ), реализующим зависимость механического момента $M_{\text{мех}}$ приводного двигателя от текущего значения частоты. На вход АРЧВ ДГУ подается измеренное значение частоты и значение уставки по частоте, которое формируется с учетом коэффициента статизма по частоте [24]. Величина рассогласования по частоте приводит к увеличению подачи топлива в топливный тракт приводного двигателя и увеличению его частоты вращения. Постоянная времени τ учитывает динамические характеристики топливного тракта и системы зажигания ДГУ. Синхронный гене-

ратор представлен синхронной машиной с автоматическим регулятором возбуждения.

Модель СНЭЭ. Модель инвертора. Инвертор СНЭЭ представлен полной моделью, позволяющей реализовывать широтно-импульсную модуляцию для управления транзисторами в зависимости от уставок по току инвертора в dq координатах. Для синхронизации инвертора СНЭЭ с изолированным энергорайоном использовался контур фазовой автоподстройки частоты. Подробное описание структуры инвертора, аналогичной используемой, приведено в [6].

Модель АБ. В качестве модели АБ использовалась стандартная для MATLAB Simulink модель литий-ионной батареи, учитывающая внутреннее сопротивление, форму разрядной кривой и др. параметры. Расчет SoC является встроенной функцией модели.

Общая структура системы автоматического регулирования. На рисунке 7 приведена упрощенная

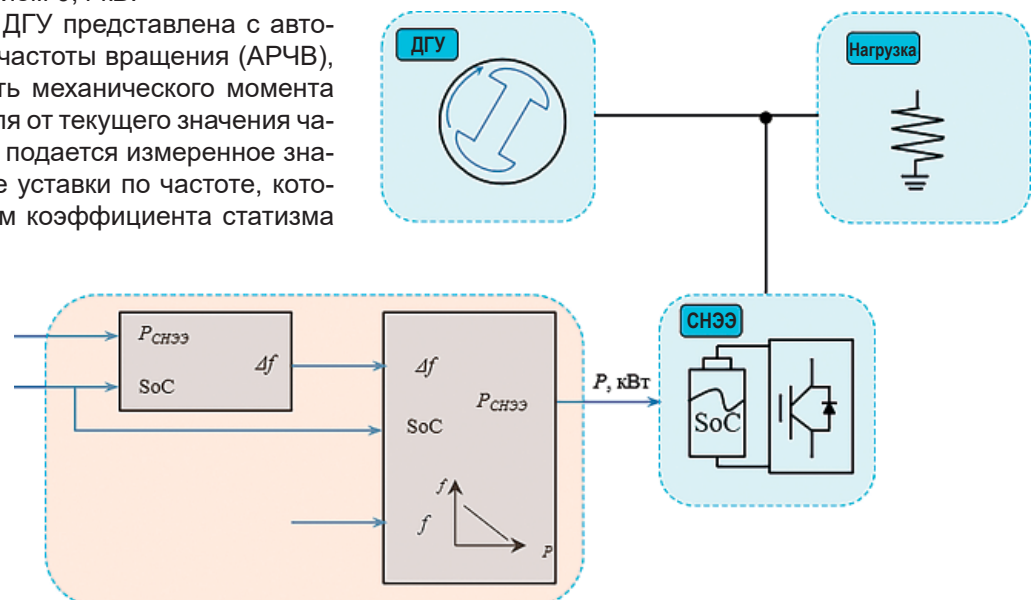


Рис. 7. Упрощенная схема изолированного энергорайона со структурой регулятора СНЭЭ

схема изолированного энергорайона со структурой САР СНЭЭ. В САР СНЭЭ на каждом расчетном шаге происходит сравнение текущего значения SoC с уставочными значениями для формирования величины смещения Δf статической характеристики. Изначально САР СНЭЭ реализует заданную форму статической характеристики, но при достижении SoC уставочных значений статическая характеристика либо смещается, либо изменяется ее наклон, либо выполняются оба действия одновременно, в соответствии с предложенным модифицированным способом.

Основные технические характеристики оборудования изолированного энергорайона, включая САР СНЭЭ, использованные в имитационной математической модели, приведены в таблице 1.

Мощность нагрузки распределяется между ДГУ и СНЭЭ пропорционально их коэффициентам статизма. Одинаковые величины коэффициентов статизма ДГУ и СНЭЭ обеспечивают одинаковое распределение нагрузки между ними, что при моделировании создает наиболее тяжелые условия работы для СНЭЭ.

Энергоемкость СНЭЭ в данном примере намеренно выбрана небольшой, хотя теоретически и достаточной для участия в регулировании частоты, так как в реальных условиях величина обменной энергии невелика. Это также обусловлено необходимостью ускорения расчетного процесса и изменения SoC, так как выбранная математическая модель подробно отражает не только электромеханические, но и электромагнитные переходные процессы и требует большой вычислительной мощности.

Для оценки эффективности предложенного модифицированного способа граничные значения диапазонов SoC (рисунок 5) были выбраны вблизи $SoC = 0,5$. Используемое в математической модели СНЭЭ соотношение номинальной мощности к энергоемкости составляет ≈ 45 , следовательно, выбранная АБ — высокотоковая. Такие АБ используются, как правило, в системах питания электротранспорта, в то время как для СНЭЭ это соотношение обычно ≤ 5 .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При использовании модифицированного способа поддержания SoC СНЭЭ с сегментированной статической характеристикой по частоте, СНЭЭ реагирует практически идентично на изменения частоты в изолированном энергорайоне выше и ниже f_0 . Рассмотрим подробнее реакцию САР СНЭЭ только на наброс нагрузки со снижением частоты [25].

Исходные условия в изолированном энергорайоне: нагрузка $P_{нагр,0} = 500$ кВт. Через 1 с включается дополнительная нагрузка $P_{нагр,1} = 1500$ кВт. Графики переходных процессов: f , $P_{ДГУ}$, $P_{СНЭЭ}$, SoC, U_{DC} , I_{DC} и $P_{нагр}$ в четырех различных режимах работы САР СНЭЭ приведены на рисунках 8–10.

Режим электроснабжения нагрузки от ДГУ. В этом режиме СНЭЭ работает на холостом ходу. САР СНЭЭ формирует команды на изменение $P_{СНЭЭ}$, но СНЭЭ отключена (рисунок 8).

Как видно из рисунка 8, ДГУ взяла на себя всю нагрузку, минимальное значение частоты в переходном процессе составило 46,7 Гц, а установившееся — 49 Гц, что соответствует 100% загрузке ДГУ. При этом $SoC = 0,5$ (50%).

Режим электроснабжения от ДГУ и СНЭЭ (SoC не поддерживается). В этом и следующих рассматриваемых режимах СНЭЭ подключена

Табл.1. Основные технические характеристики оборудования

Параметр	Условное обозначение	Значение
Номинальная мощность ДГУ	$P_{ДГУ}$	2000 кВт
Номинальная мощность СНЭЭ	$P_{СНЭЭ}$	500 кВт
Номинальное напряжение Li-Ion АБ (DC) СНЭЭ	$U_{АБ}$	1100 В
Номинальная емкость АБ СНЭЭ	$C_{НОМ}$	10 А·ч
Номинальная энергоемкость СНЭЭ	$W_{НОМ}$	11 кВт·ч
Коэффициент статизма генератора ДГУ	R	10^{-6} Гц/Вт
Коэффициент статизма СНЭЭ при $SoC = 1$	$K_{СНЭЭ0}$	10^{-6} Гц/Вт
Номинальная частота	f_0	50 Гц
Зона нечувствительности по частоте	$f_{нч}$	0,1 Гц
Показатель степенной функции при разряде/заряде СНЭЭ	n	4/1,8
Уровни заряда АБ СНЭЭ	$SoC_{макс2}$	50,4%
	$SoC_{макс1}$	50,3%
	SoC_0	50%
	$SoC_{мин1}$	49,7%
	$SoC_{мин2}$	49,6%

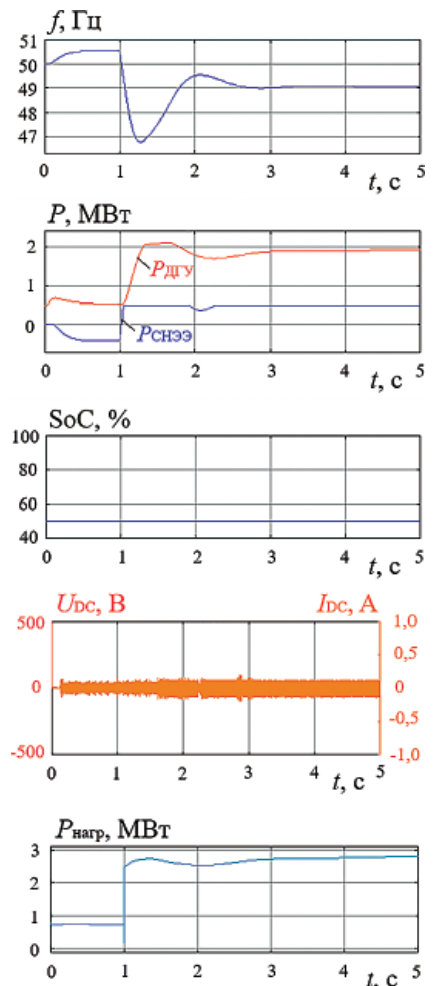


Рис. 8. Графики переходного процесса при электроснабжении нагрузки от ДГУ

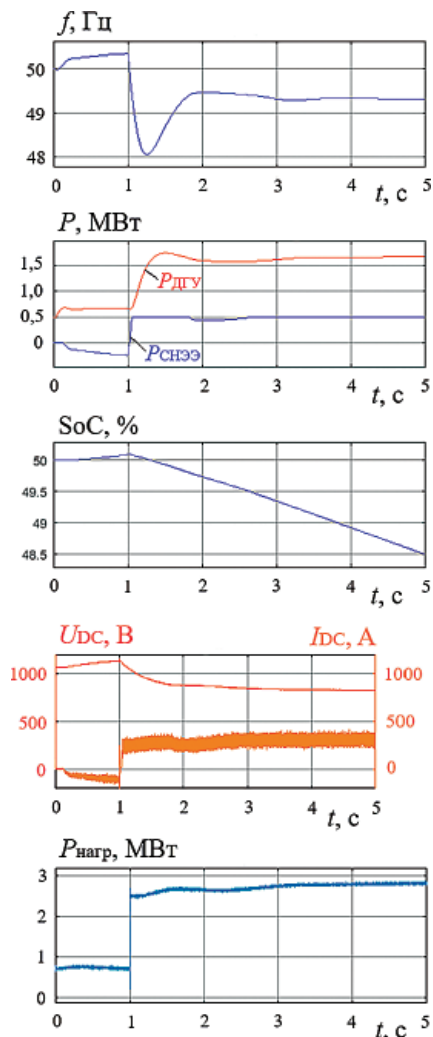


Рис. 9. Графики переходного процесса при электроснабжении нагрузки от ДГУ и СНЭЭ (SoC не поддерживается)

к сети изолированного энергорайона и работает в соответствии со своей статической характеристикой по частоте. Мощность нагрузки при этом распределяется между ДГУ и СНЭЭ пропорционально их коэффициентам статизма, но с учетом ограничения по мощности СНЭЭ на уровне 500 кВт. САР СНЭЭ формирует команды для регулирования активной мощности СНЭЭ, которые исполняются инвертором (рисунок 9). При этом нагрузка распределяется между ДГУ и СНЭЭ пропорционально коэффициентам статизма до того момента, пока мощность СНЭЭ не достигла максимально допустимой величины. При описании следующих режимов указываются только отличия от этого режима.

Минимальное значение частоты в переходном процессе (рисунок 9) составило 48 Гц, а установившееся — 49,3 Гц. Также на рисунке 9 можно наблюдать демпфирующий эффект СНЭЭ по частоте, а также более быструю реакцию СНЭЭ на наброс нагрузки, что положительно сказывается на работе ДГУ. В рассматриваемом режиме АБ СНЭЭ монотонно разряжается вплоть до отключения СНЭЭ защитой от переразряда.

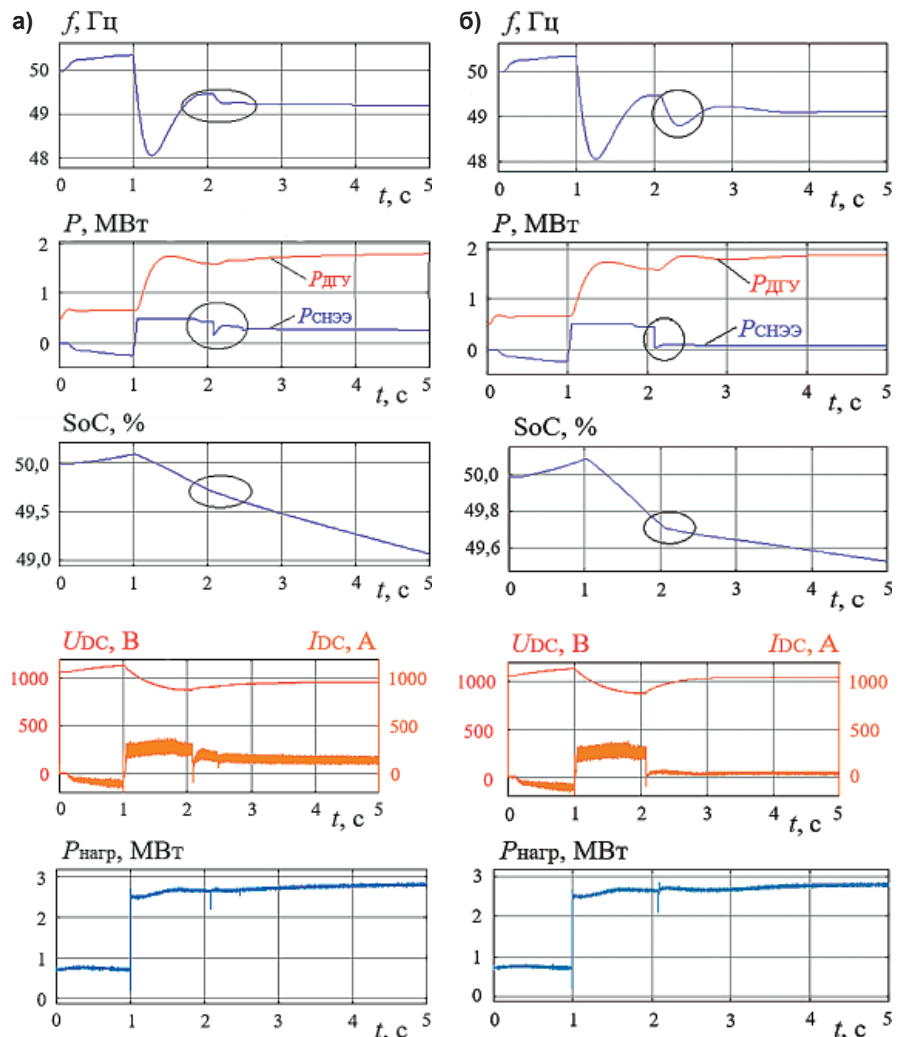


Рис. 10. Графики переходного процесса: а) электроснабжение от ДГУ и СНЭЭ (поддержание SoC за счет смещения статической характеристики вдоль оси частоты); б) электроснабжение от ДГУ и СНЭЭ (поддержание SoC за счет смещения статической характеристики вдоль оси частоты и изменения коэффициента статизма)

Электроснабжение от ДГУ и СНЭЭ (поддержание SoC за счет смещения статической характеристики вдоль оси частоты). В этом режиме при достижении граничных значений $SoC_{мин1}$ и $SoC_{мин2}$ производится смещение статической характеристики вниз вдоль оси частоты сначала на 0,3 Гц, а затем еще на 0,1 Гц, что приводит к снижению мощности, выдаваемой СНЭЭ и выходу СНЭЭ и ДГУ на новый установившийся режим (рисунок 10а). Величина смещения и количество граничных значений SoC могут быть выбраны другими, но они не должны приводить к неустойчивости или смене режима работы СНЭЭ. Смещение статической характеристики по частоте приводит к ограничению мощности разряда СНЭЭ, что содействует снижению падения напряжения на внутреннем сопротивлении АБ и предотвращает срабатывание защиты минимального напряжения. В противном случае после отключения АБ через некоторое время релаксации напряжение на ее выводах возрастет и произойдет включение СНЭЭ.

Режим электроснабжения от ДГУ и СНЭЭ (поддержание SoC за счет смещения статической характеристики вдоль оси частоты и изменения коэффи-

циента статизма). В рассматриваемом режиме при достижении граничных значений $SoC_{мин1}$ и $SoC_{мин2}$ происходит смещение статической характеристики вниз вдоль оси частоты сначала на 0,3 Гц, а затем еще на 0,1 Гц. Так же при их достижении активируется механизм изменения коэффициента статизма в зависимости от значения SoC , это приводит к еще большему снижению мощности СНЭЭ и выходу СНЭЭ и ДГУ на новый установившийся режим (рисунок 10б). Наклон статической характеристики в процессе разряда (заряда) изменяется, что постепенно уменьшает отклик СНЭЭ, продляя ее ресурс. Таким образом смещение и изменение угла наклона статической характеристики по частоте еще в большей степени ограничивают скорость разряда СНЭЭ, что способствует повышению стабильности работы СНЭЭ с повышенным внутренним сопротивлением ввиду деградации АБ.

Предложенный модифицированный способ поддержания SoC СНЭЭ, заключающегося в сегментировании статической характеристики по частоте на отдельные участки с разным коэффициентом статизма в зависимости от текущей нагрузки СНЭЭ и SoC , а также смещения характеристики по определенному закону, позволяет при работе в изолированных энергорайонах обеспечивать работоспособность СНЭЭ, сохраняя календарный и циклический срок службы, а также предотвращая преждевременную потерю энергоемкости.

В статье рассмотрен упрощенный вариант изолированного энергорайона с одной ДГУ и одной СНЭЭ, поэтому в ней не рассмотрены особенности распределения SoC между несколькими СНЭЭ, работающими параллельно. Так как это возможно в реальных условиях эксплуатации, то данный вопрос остается открытым и требует проведения дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

Резкие изменения нагрузки или выработки электроэнергии объектами ВИЭ в изолированных энергорайонах вызывают недопустимые кратко-


временные отклонения частоты/напряжения, что приводит к отключениям топливных ГУ.

Высокое быстродействие инверторов СНЭЭ позволяет их эффективно использовать в составе изолированных энергорайонов для компенсации мгновенных небалансов активной и реактивной мощности, предотвращая отключения топливных ГУ и нарушения электроснабжения потребителей.

Независимо от выбранного режима работы СНЭЭ наиболее важным является вопрос поддержания оптимального SoC АБ СНЭЭ в заданном диапазоне, в зависимости от прогноза режима работы СНЭЭ.

Предложен модифицированный способ поддержания SoC СНЭЭ за счет изменения статической характеристики по частоте, который не требует наличия канала передачи данных между СНЭЭ и выделенной для его поддержания ГУ. Данный способ заключается в сегментировании статической характеристики по частоте на отдельные участки с разными коэффициентами статизма, в зависимости от текущей нагрузки СНЭЭ и SoC , а также смещении характеристики по определенному закону, что позволяет при работе в изолированных энергорайонах обеспечивать работоспособность СНЭЭ, сохраняя календарный и циклический срок службы, а также предотвращая преждевременную потерю энергоемкости.

Учитывая, что изменение коэффициента статизма в рабочих областях, близких к предельным значениям SoC , определяется характером степенной функции, была выполнена оценка чувствительности активной мощности СНЭЭ к вариациям n от 0,1 до 2. Так как с ростом величины n отклик СНЭЭ на изменение SoC существенно увеличивается, то следует ограничить диапазон изменения SoC , в пределах которого действует предложенный способ.

Результаты имитационного моделирования в программной среде MATLAB Simulink подтвердили эффективность предложенного модифицированного способа поддержания SoC СНЭЭ в различных режимах электроснабжения нагрузки в изолированном энергорайоне. 

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Есяков С.Я., Лунин К.А., Стенников В.А., Воропай Н.И., Редько И.Я., Баринов В.А. Трансформация электроэнергетических систем // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2019, № 4(55). С. 134–141.
Yesyakov S.Ya., Lunin K.A., Stenikov V.A., Voropay N.I., Red'ko I.Ya., Barinov V.A. Transformation of electric power systems // *ELEKTROENERGIYA. Peredacha i raspredeleniye* [ELECTRIC POWER. Transmission & Distribution], 2019, no. 4(55), pp. 134–141. (In Russian)
2. Филиппов С.П., Дильман М.Д., Илюшин П.В. Распределенная генерация и устойчивое развитие регионов // Теплоэнергетика, 2019, № 12. С. 4–17.
Filippov S.P., Dil'man V.D., Ilyushin P.V. Distributed generation and sustainable development of regions // *Teploenergetika* [Heat power engineering], 2019, no. 12, pp. 4–17. (In Russian)
3. Hirsch A., Parag Y., Guerrero J.M. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 90, pp. 402–411.
4. Илюшин П.В., Музалев С.Г. Подходы к созданию систем управления микроэнергосистем // Релейная защита и автоматизация, 2016, № 3. С. 39–45.
Ilyushin P.V., Muzalev S.G. Approaches to creation of micro-energy system control systems // *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay Protection & Automation], 2016, no. 3, pp. 39–45. (In Russian)

5. Илюшин П.В. Перспективы применения и проблемные вопросы интеграции распределенных источников энергии в электрические сети: монография // Библиотечка электротехника, 2020, № 8 (260). С. 1–116.
Ilyushin P.V. Application opportunities and issues of concern of distributed energy source integration into electrical networks: monograph // *Bibliotekha elektrotehnika* [Electrical engineer library], 2020, no. 8 (260), pp. 1–116. (In Russian)
6. Rocabert J., Luna A., Blaabjerg F., Rodriguez P. Control of power converters in AC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, no. 27(11), pp. 4734–4749.
7. Unruh P., Nuschke M., Strauss P., Welck F. Overview on grid-forming inverter control methods. *Energies*, 2020, vol. 13, p. 2589.
8. Khodadoost A.A., Gharehpetian G. B., Abedi M. Review on energy storage systems control methods in microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, vol. 107, pp. 745–757.
9. Gao D.W. Energy Storage for Sustainable Microgrid. Chapter 1. Basic concepts and control architecture of microgrids. 2015. 152 p. URL: <https://www.researchgate.net/publication/306158655>.
10. Kim Y.S., Kim E.S., Moon S. Frequency and voltage control strategy of standalone microgrids with high penetration of intermittent renewable generation systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, vol. 31, pp. 1–11.
11. Kim Y.S., Hwang C.S., Kim, E.S., Cho C. State of charge-based active power sharing method in a stand-alone microgrid with high penetration level of renewable energy sources. *Energies*, 2016, vol. 9, 480 p.
12. Lu X., Sun K., Guerrero J.M., Huang L. SoC-based dynamic power sharing method with AC-bus voltage restoration for microgrid applications. *Proceedings 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 2012, pp. 5677–5682.
13. Gkavanoudis S.I. Oureilidis K., Demoulias C.S. An adaptive droop control method for balancing the SoC of distributed batteries in AC microgrids. *Proceedings IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2016, pp. 1–6.
14. Wang R., Sun Q., Hu W., Li Y., Ma D., Wang P. SoC-based droop coefficients stability region analysis of the battery for stand-alone supply systems with constant power loads. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, vol. 36, no. 7, pp. 7866–7879.
15. Илюшин П.В., Шавловский С.В. Механизмы окупаемости инвестиций в системы накопления электрической энергии при их использовании для снижения пиковых нагрузок и затрат на мощность // Релейная защита и автоматизация, 2021, № 1. С. 12–20.
Ilyushin P.V., Shavlovskiy S.V. Mechanisms of return on investment in energy storage systems when they are used for reducing peak loads and capacity costs // *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay Protection & Automation], 2021, no. 1, pp. 12–20. (In Russian)
16. Duc N.H. An innovative adaptive droop control based on available energy for DC micro distribution grids. *Energies*, 2020, vol. 13, p. 2983. URL: <https://www.researchgate.net/publication/342089886>.
17. Lu X., Sun K., Guerrero J.M., Vasquez J.C., Huang L., Teodorescu R. SoC-based droop method for distributed energy storage in DC microgrid applications. *Proceedings IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2012, pp. 1640–1645.
18. Yang H., Qiu Y., Li Q., Chen W. A self-convergence droop control of no communication based on double-quadrant state of charge in DC microgrid applications // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2017, vol. 9(3), p. 034102.
19. Sitompul S., Hanawa Y., Buphaves V., Fujita G. State of charge control integrated with load frequency control for BESS in islanded microgrid. *Energies*, 2020, vol. 13, p. 4657. URL: <https://doi.org/10.3390/en13184657>.
20. Urtasun A., Sanchis P., Marroyo L. State-of-charge-based droop control for stand-alone AC supply systems with distributed energy storage. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 106, pp.709–720. URL: <https://www.researchgate.net/publication/283831285>.
21. Shim J.W., Verbic G., Kim H., Hur K. On droop control of energy-constrained battery energy storage systems for grid frequency regulation. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 166353–166364. URL: <https://www.researchgate.net/publication/337263424>.
22. Zeh A., Müller M., Naumann M., Hesse H.C., Jossen A., Witzmann R. Fundamentals of using battery energy storage systems to provide primary control reserves in Germany. *Batteries*, 2016, no. 2(3), p. 29. URL: <https://www.mdpi.com/2313-0105/2/3/29>.
23. Swierczynski M., Stroe D.I., Stan A.I., Teodorescu R., Kær S.K. Lifetime estimation of the nanophosphate LiFePO₄/C battery chemistry used in fully electric vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, vol. 51, iss. 4, pp. 3453–3461.
24. Илюшин П.В. О свойствах энергоустановок с газопоршневыми двигателями // Электрические станции, 2009, № 11. С. 42–46.
Ilyushin P.V. On properties of electric installations with gas reciprocating engines // *Elektricheskiye stantsii* [Electric power stations], 2009, no. 11, pp. 42–46. (In Russian)
25. Илюшин П.В. Учет особенностей объектов распределенной генерации при выборе алгоритмов противоаварийного управления в распределительных сетях // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2011, № 4. С. 19–25.
Ilyushin P.V. Consideration of peculiarities of distributed generation facilities in the process of selecting emergency control algorithms in distribution networks // *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'* [Electro. Electric engineering, Electric power, Electric power industry], 2011, no. 4, pp. 19–25. (In Russian)