
УДК 621.311.001.57

ОБЗОР МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ. ЧАСТЬ I

© 2023 г. И. А. Разживин^{а, *}, А. А. Суворов^а, М. В. Андреев^а, Р. А. Уфа^а, А. Б. Аскарлов^а

^аФедеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский Томский политехнический университет”, Томск, Россия

*e-mail: lionrash@tpu.ru

Поступила в редакцию 18.08.2022 г.

После доработки 16.01.2023 г.

Принята к публикации 20.01.2023 г.

В настоящее время системы накопления энергии (СНЭ) становятся неотъемлемой частью современных электроэнергетических систем (ЭЭС) и используются для решения широкого спектра задач. С ростом мощности и объема их внедрения СНЭ начинают оказывать влияние на режимы и процессы в ЭЭС. В связи с этим возникает необходимость использования математических моделей СНЭ, учитывающих специфику, различные отличительные свойства каждого вида и типа СНЭ в составе моделей реальных ЭЭС. Однако в зарубежной и отечественной литературе отсутствуют обзорные работы о детальных математических моделях распространенных видов СНЭ и применяемых для них упрощений, которые можно использовать для адекватного моделирования ЭЭС реальной размерности в зависимости от решаемых задач. Поэтому в первой части данной статьи рассмотрены наиболее перспективные типы СНЭ, применяемые в составе ЭЭС, а также области и задачи их использования. Для рассматриваемых СНЭ описаны принципы реализации детальных математических моделей, структуры систем автоматического управления. Во второй части статьи приведены современные подходы к упрощению математических моделей СНЭ, последствия таких упрощений и области их применения. Таким образом, обзорная статья может помочь в выборе математической модели СНЭ для решения конкретных задач анализа их функционирования в составе реальных ЭЭС.

Ключевые слова: системы накопления электрической энергии, накопитель, математические модели, электроэнергетические системы

DOI: 10.31857/S000233102302005X, EDN: JZIZSY

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время идет процесс развития и модернизации электроэнергетического комплекса путем внедрения новых технологий. Среди них все большее распространение получают системы накопления энергии (СНЭ). Широкие возможности СНЭ делают их одними из ключевых элементов будущих энергосистем [1, 2]. Согласно открытым данным по состоянию на 2020 год установленная мощность только электрохимических и электромагнитных СНЭ составила более 10 ГВт, на стадии реализации находится множество крупных проектов по установке различных СНЭ в электроэнергетические системы (ЭЭС) [3, 4]. При этом основной прирост мощности происходит за счет СНЭ, подключаемых к сети через устройства на

базе силовой полупроводниковой техники, преимущественно через статический преобразователь напряжения (СПН). Использование данных устройств позволяет применять СНЭ уже не только как источник бесперебойного питания, но и ввиду их быстродействия осуществлять практически безынерционное управление балансом активной мощности по любому заданному алгоритму [5–7]. Кроме этого, СНЭ могут использоваться для компенсации реактивной мощности, эффективного средства регулирования напряжения в нормальных и послеаварийных режимах. Учитывая многофункциональность и быстродействие таких систем, можно рассчитывать, что при продолжающимся их широком внедрении в современные ЭЭС многие задачи регулирования и управления, в том числе противоаварийного, будут решаться с учетом СНЭ [8–10]. Исходя из этого, внедрение СНЭ будет оказывать существенное влияние на динамические свойства ЭЭС, что обуславливает необходимость их учета при моделировании и исследовании режимов работы в ЭЭС.

Для успешного решения широкого спектра задач с помощью СНЭ в составе реальных ЭЭС необходима полная и достоверная информация о процессах как в самой СНЭ, так и ЭЭС в целом при нормальных и аномальных режимах их работы. Основным способом получения такой информации служит математическое моделирование. При моделировании традиционных ЭЭС для решения большинства задач достаточным являлось воспроизведение электромеханических переходных процессов с временной шкалой от нескольких миллисекунд до минут. Такой подход позволяет упростить модель ЭЭС и собственно процесс моделирования. Однако временная шкала работы СПН в составе СНЭ и их систем автоматического управления (САУ), определяющих в целом переходный процесс СНЭ, находится уже в диапазоне от нескольких микросекунд и охватывает высокочастотные коммутационные и электромагнитные переходные процессы, которые игнорировать нельзя. Немаловажным является учет особенностей каждого вида и типа СНЭ, которые необходимо учитывать при моделировании. В связи с этим вопрос моделирования и выбора соответствующих моделей СНЭ для исследования динамических свойств реальных ЭЭС является актуальным, требующим всестороннего анализа и исследования.

В литературе встречаются обзорные статьи, посвященные применяемым типам СНЭ и принципам их работы [11, 12]. Ряд работ посвящены обзору математических моделей отдельных типов СНЭ [13–15]. Также встречаются исследования по сравнению динамического отклика математических моделей различной детализации для некоторых типов СНЭ [16–20]. Однако в литературе отсутствует обзор детальных математических моделей распространенных видов СНЭ и применяемых для них упрощений, которые можно использовать для адекватного моделирования ЭЭС реальной размерности в зависимости от решаемых задач. Данная статья направлена на устранение данного пробела и в связи с существенным объемом разделена на две части. В первой части статьи рассматривается обобщенная структурная схема подключения СНЭ к ЭЭС и ее описание. В первой главе описаны принципы реализации детальных моделей СНЭ и математическое описание доминирующих технологий накопления энергии. Во втором разделе рассматриваются детальные математические модели СПН и интерфейса, связи между технологией накопления и сетью. Во второй части статьи рассматриваются современные подходы к возможным упрощениям моделей отдельных элементов и СНЭ в целом, а также обозначены последствия таких упрощений и задачи, в которых данные модели могут быть применены. Данная обзорная статья будет интересна специалистам, занимающимся моделированием реальных ЭЭС, так как включает описание применяемых моделей СНЭ и пути их упрощений. Также статья может поспособствовать в выборе необходимых моделей СНЭ для решения конкретных задач.

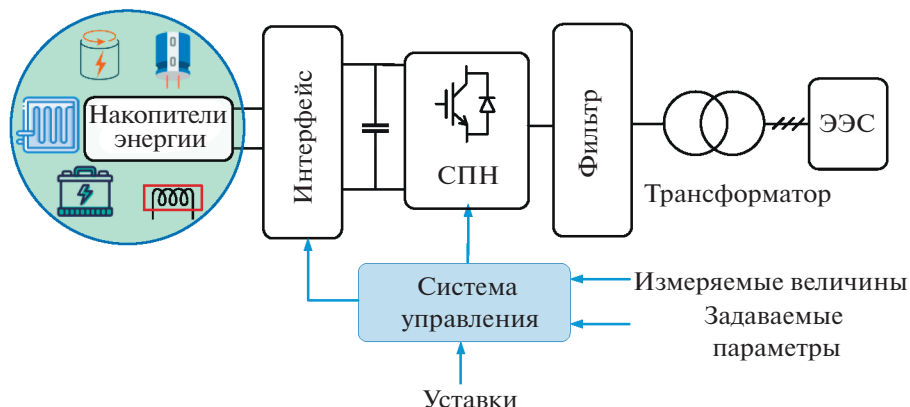


Рис. 1. Обобщенная структурная схема СНЭ в составе ЭЭС.

1. ДЕТАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СНЭ

Общий вид структурной схемы СНЭ, работающей в составе ЭЭС, представлен на рис. 1 [21, 22].

Основными элементами данной структуры являются: трехфазный двунаправленный СПН; конденсатор цепи постоянного тока (ЦПТ); интерфейс связи между накопителем энергии и цепью постоянного тока, топология которого зависит от типа накопителя энергии; фильтр и трансформатор связи для подключения к ЭЭС. Согласно обозначенной структуре, в ЭЭС могут интегрироваться технологически несложные СНЭ, преимуществом которых является быстрый ввод в эксплуатацию. Такими СНЭ являются электрохимические (аккумуляторные и проточные батареи), химические (преимущественно водородные топливные элементы), механические (только маховиковые) и электромагнитные (сверхпроводниковые индуктивные накопители и суперконденсаторы), подключаемые через СПН. Обозначенные СНЭ способствуют решению широкого спектра задач в ЭЭС. Применение СПН в составе СНЭ позволяет добиться двух важных аспектов: 1) преобразование постоянного тока или переменного тока произвольной частоты в переменный ток промышленной частоты; 2) гибкий контроль выдачи мощности. За счет этого обеспечивается соблюдение требований по качеству, гибкости, надежности и устойчивости функционирования СНЭ в составе ЭЭС, а также наиболее эффективное управление СНЭ, увеличивая их срок службы. Кроме этого, использование СПН позволяет реализовать высокое быстродействие, таким образом, учитывая перспективы применения СПН в составе СНЭ, в следующих разделах рассматриваются именно математические модели данных типов СНЭ: маховиковые (МН), суперконденсаторы (СК), аккумуляторные батареи (АБ), сверхпроводниковые индуктивные накопители (СПИН) и водородные топливные элементы (ТЭ). Математические модели ГАЭС и ПАЭС не рассматриваются, поскольку их описание полностью соответствует широко изученным традиционным синхронным машинам. Также не рассматриваются термохимические и тепловые СНЭ, ввиду не однозначных перспектив их применения.

1.1. Математические модели накопителей энергии

В зависимости от типа накопителя могут применяться электрохимические, модельные физические, математические и электрические модели. Все они различаются по

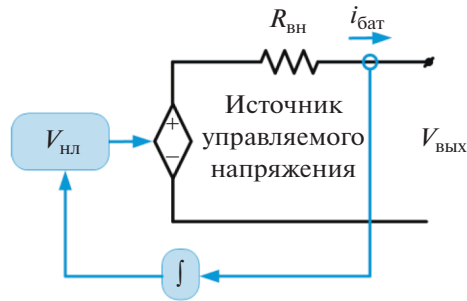


Рис. 2. Модель Шеферда.

сложности, вычислительным требованиям и достоверности получаемых результатов [23, 24]. Электрохимические и модельные физические модели включают сложные системы дифференциальных уравнений в частных производных и воспроизводят процессы в накопителе энергии (НЭ) с большей точностью [25, 26]. Однако такие модели требуют понимания электрохимических процессов, протекающих при накоплении энергии, и учета большого количества частных параметров. В связи с этим они не нашли широкого применения [18, 27]. Также одним из известных, но чрезвычайно сложным подходом является представление накопителей энергии в виде моделей дробного порядка [28]. Наибольшее распространение в электроэнергетике при моделировании различных режимов работы СНЭ в составе ЭЭС получили модели в виде эквивалентных электрических схем и универсальные обобщенные модели. С помощью них воспроизводятся широко применяемые АБ, СК, СПИН и ТЭ.

1.1.1. Математические модели АБ

Одна из первых обобщенных моделей для АБ с жидким электролитом была предложена Шефердом (рис. 2) [29]. Данная модель отражает электрохимические процессы и природу явления диффузии в АБ. Модель Шеферда является универсальной и с учетом параметрирования может использоваться для любых типов АБ [29]. В связи с этим она получила широкое распространение в промышленных средствах моделирования СНЭ в ЭЭС [30–32].

Математическая модель Шеферда описывается уравнением (1):

$$V_{\text{вых}} = V_{\text{нл}} - R_{\text{вн}}i_{\text{бат}} = V_0 - K \frac{Q}{Q - i(t)} \left(\int idt \right) + A \exp^{-B \int idt} - R_{\text{вн}}i_{\text{бат}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе модели; $V_{\text{нл}}$ – нелинейное напряжение АБ; $V_{\text{хх}}$ – напряжение холостого хода АБ; K – постоянная поляризации; $i(t)$ – фактический заряд батареи; $i_{\text{бат}}$ – ток батареи; Q – максимальная емкость АБ; A – экспоненциальное напряжение; B – экспоненциальная емкость; $R_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление.

Более поздними разработками являются эквивалентные электрические схемы, разработанные Ченом и Ринкон-Мора [19], и модель на основе схемы Тевенина, которая более точно учитывает изменение параметров модели от температуры окружающей среды [33] (рис. 5).

Данные модели разработаны для литий-полимерных (LiPo) АБ, но могут использоваться для других типов. В сравнении с моделью Шеферда обозначенные эквивалентные электрические модели являются более сложными, но считаются более точными и

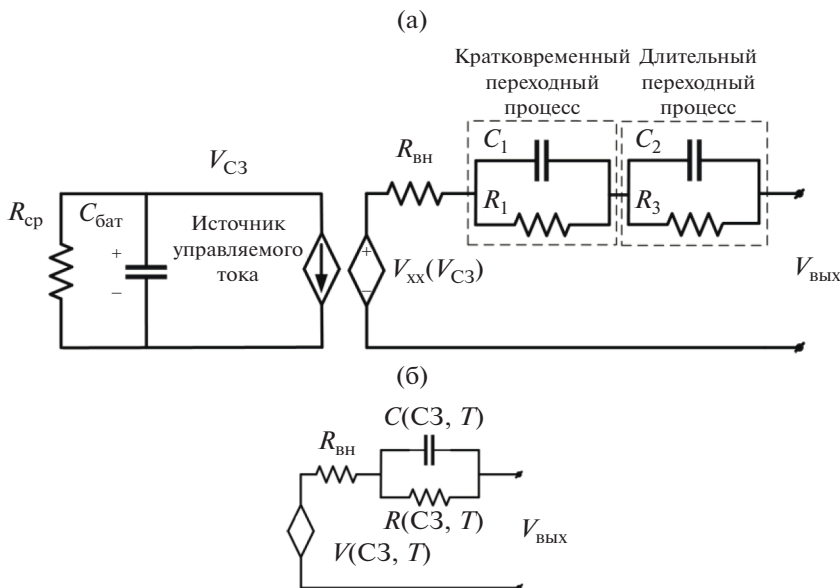


Рис. 3. Эквивалентные электрические модели АБ: (а) – модель Ринкон-Мора; (б) – модель на основе схемы Тевенина.

полными. В общем виде напряжение на выходе обозначенных моделей описывается уравнением (2) [34, 35]:

$$V_{\text{вых}} = V_{\text{xx}}(V_{\text{C3}}) - R_{\text{вн}} i(t) - V_{\text{перех}}(t), \quad (2)$$

где $V_{\text{xx}}(V_{\text{C3}})$ – напряжение холостого хода зависимое от уровня состояния заряда (СЗ) накопителя; $V_{\text{перех}}(t)$ – переходное напряжение на RC-цепях.

При необходимости в обозначенных моделях дополнительно эффект диффузии может быть учтен импедансом Варбурга [36]. В модели Ринкон–Мора температурный эффект учтен только в виде коэффициента поправки на полную емкость АБ. Для более точного учета влияния температуры в модели на основе схемы Тевенина реализовано уравнение теплопроводности для однородного тела [27]:

$$C_T = \frac{dT}{dt} = -\frac{T - T_a}{R_T} + P_s, \quad (3)$$

где R_T – коэффициент конвекционной теплопередачи между ячейкой и окружающей средой; C_T – теплоемкость ячейки; T – внутренняя температура ячейки; T_a – температура окружающей среды; P_s – мощность рассеиваемая внутри ячейки.

Основной многофакторной обобщенной моделью является модель Шеферда, в которой был выполнен ряд модификаций для учета температурных зависимостей и напряжения поляризации (рис. 4) [37, 38].

Напряжение на выходе определяется согласно выражению (4):

$$V_{\text{вых}} = V_{\text{нл}} - R_{\text{вн}} i_{\text{бат}} = V_{\text{xx}} - K \frac{Q}{Q - i(t)} it + A_b \exp^{-B \cdot it} - K \frac{Q}{Q - i(t)} i^* - C it - R_{\text{вн}} i_{\text{бат}}, \quad (4)$$

где i^* – отфильтрованный ток АБ; it – актуальный ток заряда АБ; C – коэффициент наклона поляризационного напряжения.

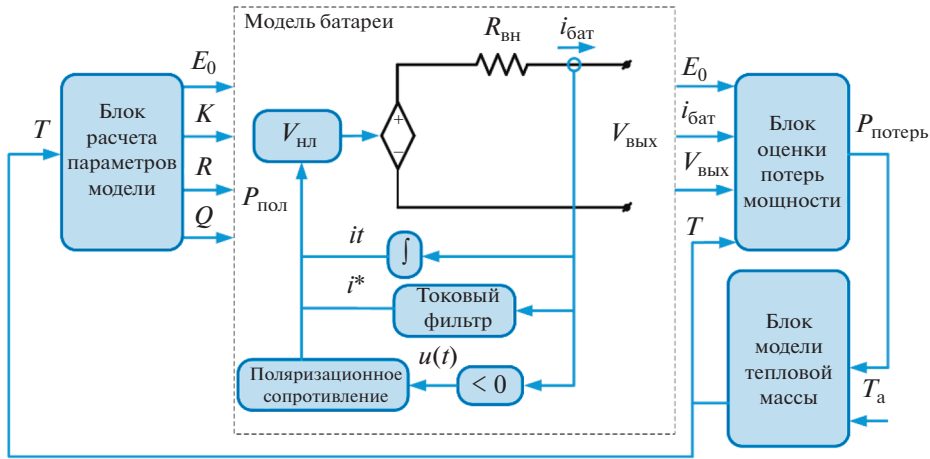


Рис. 4. Модифицированная обобщенная математическая модель Шеферда.

1.1.2. Математическая модель МН

Математическую модель МН условно можно разделить на механическую и электрическую части. В механической части (маховике) запасается кинетическая энергия вращения E , которая зависит от инерции и скорости, приложенных к маховику. Динамика маховика описывается известным уравнением движения ротора [39]:

$$M = J \frac{d\omega}{dt} + K_D \omega + K_C, \tag{5}$$

где J – суммарная инерция ротора генератора и маховика; K_D – коэффициент трения; K_C – кулоновское трение; M – результирующий момент.

Электрической частью математической модели МН является модель электрической машины [40, 41]. В МН находят применение различные типы электрических машин. Наиболее перспективными ввиду своих преимуществ являются электрические машины на базе синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ) [42–44]. Детальная математическая модель СГПМ в осях dq является хорошо изученной и представлена в [45].

1.1.3. Математическая модель СПИН

Параметры математической модели СПИН зависят от физических свойств сверхпроводника, его индуктивности и потерь. При понимании формы сечения проводника катушки и конструкции СПИН определение L не представляется сложной задачей, кроме того, паспортные характеристики СПИН содержат всю необходимую информацию [46–49]. Для детального анализа переходных процессов в СПИН катушку рассматривают как эквивалентную электрическую схему со сосредоточенными параметрами (рис. 5) [50–53].

Поскольку СПИН является источником тока, то напряжение на выходе определяется состоянием силовых ключей СПН и его параметрами в соответствии с напряжением конденсатора ЦПТ [54, 55]:

$$\begin{aligned} V_{\text{СПИН}} &= (1 - 2(1/A))V_{dc}, \\ I_{dc} &= (1 - 2(1/A))I_{\text{СПИН}}, \end{aligned} \tag{6}$$

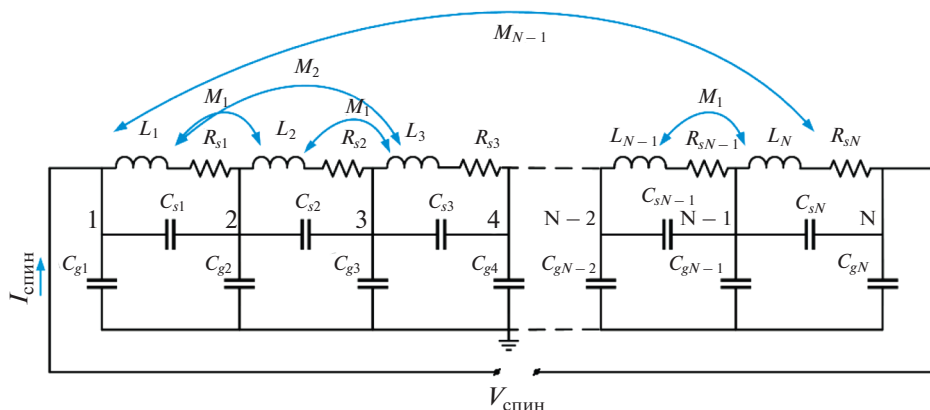


Рис. 5. Модель СПИН со сосредоточенными параметрами.

где $V_{\text{СПИН}}$ – среднее напряжение на катушке СПИН; $I_{\text{СПИН}}$ – ток катушки; V_{dc} – напряжение на конденсаторе ЦПТ; I_{dc} – среднее значение тока СПН; $1/A$ – рабочий цикл (время проводимости/период одного цикла переключения силовых ключей): при $1/A > 0.5$ катушка заряжается, $1/A < 0.5$ катушка разряжается, $1/A = 0.5$ катушка находится в режиме “ожидания”.

Ток СПИН может быть выражен через напряжение и индуктивность:

$$I_{\text{СПИН}} = \frac{1}{L_{\text{СПИН}}} \int_0^t V_{\text{СПИН}} dt + I_{\text{СПИН}0}, \quad (7)$$

где $I_{\text{СПИН}0}$ – начальный ток СПИН; $L_{\text{СПИН}}$ – индуктивность СПИН.

1.1.4. Математические модели СК

Среди эквивалентных электрических схем СК наиболее применяемой и сравнительно достоверной является модель, предложенная Зубиета и Бонертом. Модель разработана на основе физических принципов для двухслойных конденсаторов и воспроизводит электрохимические процессы, происходящие на границе раздела электрод-электролит с учетом саморазряда (рис. 6).

Элементы электрической схемы в ветвях имеют разную постоянную времени, тем самым воспроизводятся мгновенная динамика зависимости емкости от напряжения и более длительные процессы диффузии и саморазряда. Выражения для расчета и идентификации параметров модели приведены в [56].

Напряжение на выходе СК определяется в соответствии с выражениями (8)–(10):

$$V_{\text{вых}} = V_0 + \sum_{j=1}^n VR_j + R_{\text{гт}} I_C, \quad (8)$$

$$V_0 = \frac{1}{R_6(C_6 + C_{62}V_{C6})}, \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n VR_j = \frac{1}{R_M C_M} \int_0^t i_C dt + \frac{1}{R_d C_{л}} \int_0^t i_C dt, \quad (10)$$

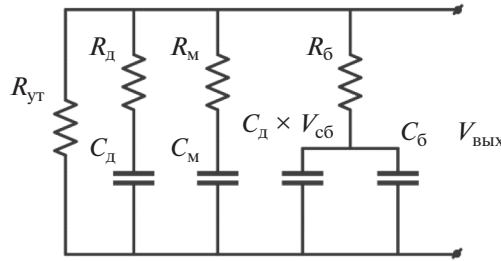


Рис. 6. Модель Зубиета и Бонерта.

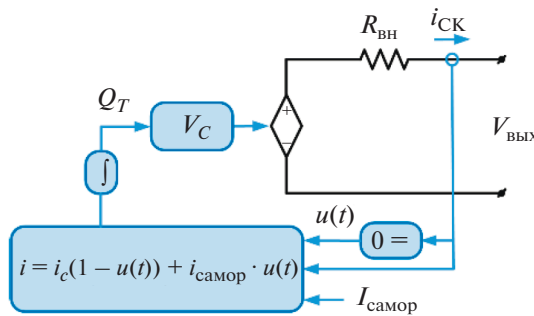


Рис. 7. Обобщенная модель СК.

где $C_б$ $C_{б2}$ – емкости, зависмые от приложенного напряжения, моделирующие мгновенные переходные процессы; I_c – внутренний ток СК; V_0 – максимальное напряжение СК; $V_{Cб}$ – напряжение, приложенное к конденсатору; $R_{ут}$ – сопротивление учетки, моделирующие саморазряд; $R_м$, $C_м$ – воспроизводят медленные процессы в СК (до 10 минут); $R_д$, $C_д$ – воспроизводят длительные переходные процессы диффузии зарядов (более 10 мин).

Для исследования динамики СК при изменении температуры предложена модифицированная модель Зубиета и Бонерта, которая учитывает рассеивание мощности на внутреннем сопротивлении при заряде/разряде. Аналитические функции зависимости изменения параметров модели от температуры представлены в [57].

Обобщенная модель СК построена на основе модели Штерна (доработанная модель Гельмгольца и Гуи-Чепмена) [58–60]. Данная модель повторяет идеологию обобщенной модели для АБ, имеет простую настройку и подходит для воспроизведения наиболее распространенных типов СК (рис. 7).

Напряжение на выходе формируется с учетом падения напряжения на сопротивлении и параметров СК:

$$V_{\text{ВЫХ}} = V_C - R_{\text{ВН}} i_C = \frac{N_S Q_T d}{N_{\Pi} N_e \epsilon \epsilon_0 A_i} + \frac{2 N_e N_{\text{ПОС}} R T}{F} \text{sh}^{-1} \left(\frac{Q_T}{N_{\Pi} N_e A_i \sqrt{8 R T \epsilon \epsilon_0 c}} \right) - R_{\text{ВН}} i_C, \quad (11)$$

где $V_{\text{СК}}$ – напряжение СК в соответствии с уравнением Штерна; A_i – площадь межфазной поверхности между электродами и электролитом; $c = 1/(8 N_A r^3)$ – молярная

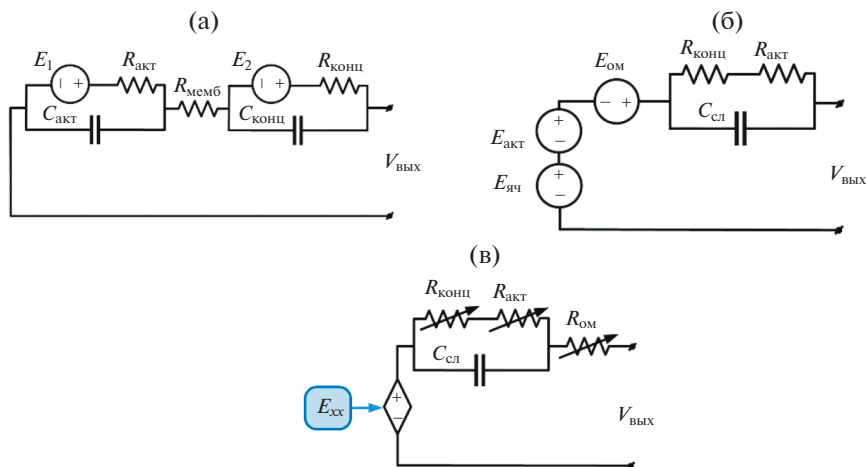


Рис. 8. Модель Лармина (а), модифицированная модель (б) и комплексная модель (в).

концентрация; F – постоянная Фарадея; $i_{СК}$ – ток СК; N_e – количество слоев электродов; N_A – постоянная Авогадро; N_{\parallel} – количество параллельных СК; $N_{\text{пос}}$ – количество последовательных СК; Q_T – электрический заряд; R – идеальная газовая постоянная; d – молекулярный радиус; T – рабочая температура; ε – диэлектрическая проницаемость; ε_0 – проницаемость вакуума.

1.1.5. Математическая модель ТЭ

На рис. 8 представлены наиболее распространенные эквивалентные электрические схемы для ТЭ, отражающие мультифизические фундаментальные процессы с учетом динамики химических реакций в ТЭ.

Одной из первых была предложена модель Лармина или “оригинальная модель” (рис. 8а) [61], также применяются ее модификация [62] и комплексная модель Лана и Кай Струнца [63]. Модель воспроизводит электроды ТЭ RC -цепями (фарадеевский импеданс) и потенциалом напряжения, а потери в электролите и на ионном сопротивлении мембраны сопротивлением $R_{\text{мемб}}$. Модель подходит для описания переходных процессов в диапазоне от миллисекунд до десятков минут с учетом электрических и тепловых переходных процессов. Однако параметры модели Лармина не всегда могут быть соотнесены с реальными данными, что существенно ограничивает ее область применения [64]. Ввиду этого распространение получила модель эквивалентной схемы ТЭ первого порядка (рис. 8б) [65], параметры которой могут быть согласованы с реальными данными с помощью простой методики измерения. Для учета пневматических переходных процессов модель была модифицирована (рис. 8в) [66].

Все обозначенные модели воспроизводят выходное напряжение ТЭ с учетом омических, активационных и концентрационных потерь и процессов, вызванных диффузией в электрохимической реакции водородного топлива и кислорода в присутствии катализатора [67–69]:

$$V_{\text{вых}} = E_{\text{хх}} - \Delta E_{\text{акт}} - \Delta E_{\text{конц}} - \Delta E_{\text{ом}} - \Delta E_{\text{сл}}, \quad (12)$$

где $E_{\text{хх}}$ – теоретическое значение напряжения холостого хода ТЭ; $\Delta E_{\text{акт}}$ – активационные потери; $\Delta E_{\text{ом}}$ – омические потери; $\Delta E_{\text{конц}}$ – концентрационные потери; $\Delta E_{\text{сл}}$ – падение напряжения, вызванное емкостью двойного слоя.

В общем виде E_{xx} определяются в соответствии с уравнением Нернста (13):

$$E_{xx} = E_0 + \frac{RT_{TЭ}}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2}^{ch} \sqrt{p_{O_2}^{ch}}}{p^0 \sqrt{p^0}} \right), \quad (13)$$

где R – постоянная идеального газа; p_0 – рабочее давление.

Обратимое напряжение ячейки ТЭ (E_0) для нормальных условий при произвольной температуре $T_{TЭ}$ может быть рассчитано по уравнению (14):

$$E_0 = E^0 - k_E(T_{TЭ} - 298.15 K), \quad (14)$$

где k_E – эмпирическая константа.

Активационные потери зависят от состояния электродов, температуры и определяются в соответствии с уравнением Тафеля (15) [70]:

$$\Delta E_{акт} = \xi_3 T_{TЭ} \ln \left(\frac{I_{TЭ}}{A} \right), \quad (15)$$

где $I_{TЭ}$ – ток нагрузки ТЭ; A – константа, зависящие от состояния электрода и ячейки; ξ_3 – постоянный параметрический коэффициент.

Падение напряжения концентрации вызвано градиентами концентрации реагентов и их диффузией из анодных и катодных каналов через пористые электроды и описывается уравнениями Стефана-Максвелла [70, 71]. В общем виде потери концентрации можно выразить как:

$$\Delta E_{конц} = R_{конц} I_{TЭ}. \quad (16)$$

Омическое падение напряжения возникает при переносе электронов через собирающие пластины и электроды, а также при проходе протонов через мембрану [72], и описывается уравнением:

$$\Delta E_{Ом} = R_{Ом} I_{TЭ}, \quad (17)$$

где $R_{Ом}$ – сопротивления переноса электронов и протонов.

Обобщенная модель, представленная на рис. 9, разработана для моделирования распространенных типов водородных ТЭ [73].

Напряжение холостого хода E_{xx} и напряжение на выходе ТЭ $V_{TЭ}$ с учетом потерь определяются в соответствии с выражением:

$$V_{вых} = E_{xx} - R_{вн} I_{TЭ}, \quad (18)$$

$$E_{xx} = E_{ос} N A \ln \left(\frac{i_{TЭ}}{i_0} \right) \frac{1}{s T_d / 3 + 1}, \quad (19)$$

где N – количество ячеек; A – коэффициент отклонения Тафеля; i_0 – ток реакции; T_d – постоянная времени отклика; $i_{TЭ}$ – ток ТЭ; $V_{TЭ}$ – напряжение ТЭ.

Передаточная функция первого порядка воспроизводит эффект активационных потерь (замедления химических реакций на поверхности электрода). Уравнения, необходимые для расчета параметров модели, приведены в [73].

1.1.6. Выводы

Общий принцип детальных моделей для накопителей энергии заключается в их представлении в виде эквивалентных электрических схем. Такой подход позволяет детально воспроизводить переходные процессы при накоплении энергии, учитывая специфику физических и химических явлений. Однако при исследовании конкретных типов с помощью электрических схем необходимо проводить идентификацию параметров, которых достаточно много. Более того, некоторые из параметров не всегда

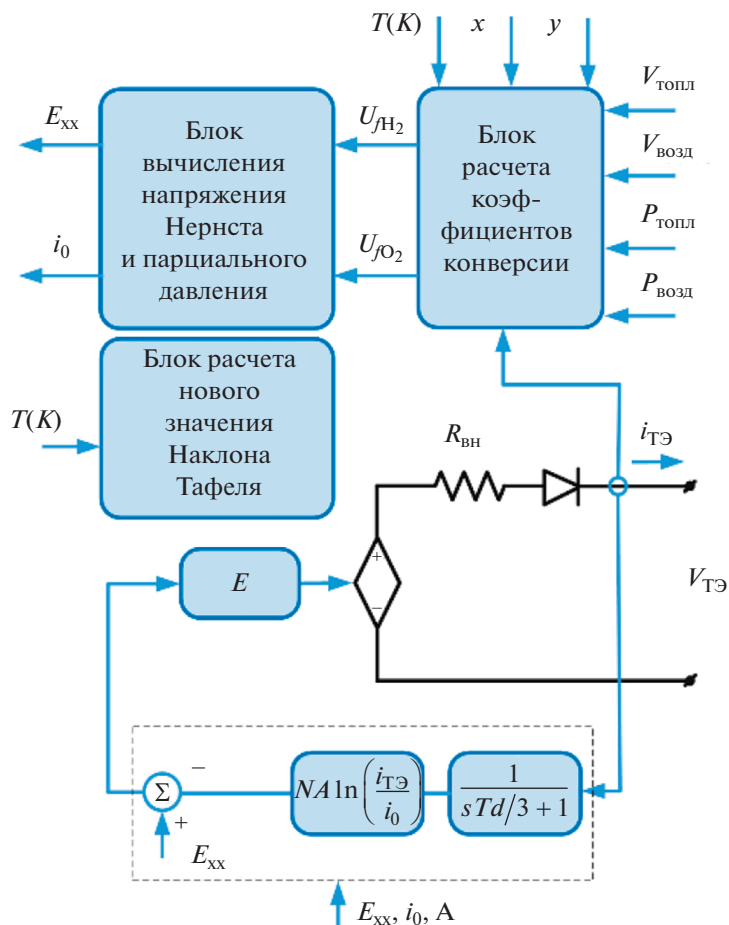


Рис. 9. Детализированная обобщенная модель ТЭ ($P_{топл}$ – абсолютное давление подачи топлива; $P_{возд}$ – абсолютное давление подачи воздуха; $V_{топл}$ – расход топлива; $V_{возд}$ – расход воздуха; x – процентное содержание водорода в топливе; y – процентное содержание кислорода в окислителе (%); U_{fO_2} и U_{fH_2} – коэффициенты перехода кислорода и водорода).

могут быть определены по каталожным данным и требуют проведения физических замеров, например, температурные или пневматические зависимости [74–76]. В связи с этим эквивалентные электрические схемы применимы только для конкретных типов накопления, для которых имеется полное понимание внутренних характеристик и исходных данных. Кроме этого, при составлении модели и задания исходных данных требуется проводить верификацию модели. Однако, как показывает практика, не всегда возможно найти требуемые зарядно-разрядные характеристики и прочие данные. Ввиду этого для некоторых типов накопителей энергии верификация выполняется с использованием натуральных опытов, что не всегда осуществимо в принципе. В связи с этим разработаны обобщенные модели, которые практически не уступают по детализации электрическим схемам, являются универсальными, хорошо параметрируются по паспортным данным. Обобщенные модели менее чувствительны к неточностям в задании исходных данных и не требуют чрезвычайно сложных опытов по натурной верификации.

2. ДЕТАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕРФЕЙСА СВЯЗИ МЕЖДУ НАКОПИТЕЛЕМ И ЭЭС

Трехфазный двунаправленный СПН является одним из основных элементов в составе схемы подключения СНЭ к ЭЭС [1]. Основным типом, используемым в современных энергосистемах, является преобразователи на основе быстродействующих полностью управляемых полупроводниковых силовых ключей преимущественно на базе IGBT-транзисторов [77, 78]. Для управления ключами в основном используется принцип синусоидальной широтно-импульсной модуляции (СШИМ) [79]. В зависимости от структуры цепи постоянного тока инверторы могут быть выполнены на базе статических преобразователей тока или напряжения (СПТ или СПН). Каждый имеет свои преимущества и недостатки [1]. В частности, инверторы на базе СПТ ограничивают применение мощных СНЭ на базе СПИН и СК, поскольку имеют меньшую пропускную способность [80]. Кроме этого, результаты анализа, представленного в [81], демонстрируют экономическую нецелесообразность применения СПТ со стороны сети. Таким образом, для СНЭ более эффективной является схема на базе СПН. С точки зрения топологии, наиболее предпочтительной, подходящей для всех типов накопителей энергии является трехуровневая мостовая схема преобразователя с фиксированной нейтральной точкой (3L-NPC-VSC). Фрагмент преобразователя представлен на рис. 10 [82]. Такая топология позволяет достичь более высоких уровней напряжения и передаваемой мощности нежели в двухуровневых схемах СПН, а также имеет меньший уровень гармоник и потерь мощности.

Основные элементы схемы 3L-NPC-VSC описаны в [83]. В детальной математической модели 3L-NPC-VSC (также называемой коммутационной моделью) силовые ключи (IGBT-транзисторы) моделируется последовательно включенными сопротивлениями, индуктивностью, источником постоянного тока и идеальным ключом, управляемым логическим сигналом [84]. Вольт-амперная характеристика диода предоставляется упрощенной или идеализированной характеристикой. Таким образом, система уравнений (20), описывающая переходные процессы в 3L-NPC-VSC и их связь с внешними напряжениями и токами, учитывает дискретный характер формирования выходных напряжений ЦПТ [85–87].

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{abcZ} = u_{c1} \left(S_{abc1} - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^{b,c} S_{n1} \right) + u_{c2} \left(S_{abc2} - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^{b,c} S_{n2} \right); \\ C_1 \frac{du_{c1}}{dt} = i_{dc} - (S_{a1}S_{a2}i_a + S_{b1}S_{b2}i_b + S_{c1}S_{c2}i_c); \\ C_2 \frac{du_{c2}}{dt} = i_{dc} - (S_{a1}S_{a2}i_a + S_{b1}S_{b2}i_b + S_{c1}S_{c2}i_c) - (S_{a2}S_{a3}i_a + S_{b2}S_{b3}i_b + S_{c2}S_{c3}i_c), \end{array} \right. \quad (20)$$

где u_{abcZ} – выходные фазные напряжения 3L-NPC-VSC; i_{abc} – выходные фазные токи 3L-NPC-VSC; u_{c1} , u_{c2} – напряжения на эквивалентных емкостях цепи постоянного тока; C_1 , C_2 – эквивалентные значения емкостей цепи постоянного тока; i_{dc} – величина входного тока цепи постоянного тока; S_{abc} – коммутационная функция.

Отдельно следует отметить, что для МН трехуровневая топология СПН применяется также со стороны электрической машины (блок “интерфейс” на рис. 1), т.е. 3L-NPC-VSC имеет двунаправленную конфигурацию [88, 89]. Такая конфигурация необходима поскольку ротор маховика с переменной скоростью вращения напрямую соединен с электрической машиной.

Структурная схема САУ СПН со стороны сети строится в рамках общепринятых подходов, используемых для устройств подключаемых через преобразователи. В зависимости от реализации внешнего контура управления преобразователи со стороны се-

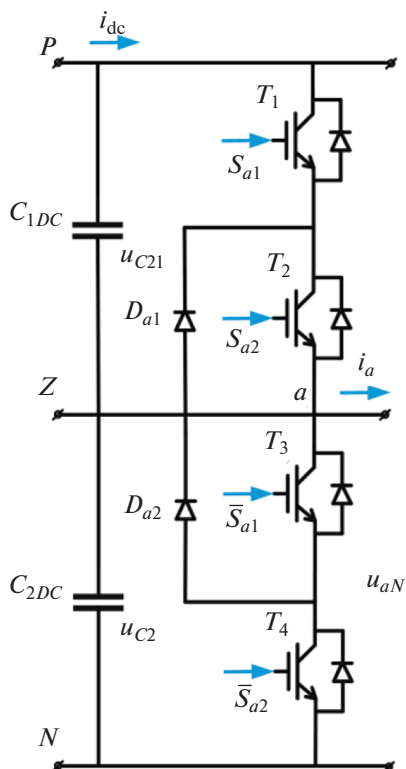


Рис. 10. Трехуровневая мостовая схема СПН с фиксированной нейтральной точкой.

ти делятся на две известные, принципиально отличающие группы: “ведомые” сетью и “ведущие” относительно сети (рис. 11) [90, 91].

В случае работы СПН в режиме “ведущего” на внешнем уровне формируются опорные значения напряжения и частоты, т.е. в данном режиме преобразователь со стороны сети является управляемым источником напряжения [92]. В рамках такого подхода используются три основные стратегии: управление статизмом, виртуальная инерция, виртуальное демпфирование колебаний [93]. Таким образом, за счет такого управления СНЭ могут гибко участвовать в регулировании частоты и напряжения сети, а также исчезает необходимость в использовании контура фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [94–96]. Более подробное описание преобразователей в режиме “ведущих” приведено в [97].

В случае работы в режиме “ведомого” СПН является управляемым источником тока, для которых опорными значениями являются активная и реактивная мощности. Последние вычисляются из мгновенных значений тока и напряжения в точке подключения по известным формулам [98] или могут быть заданы от системы управления верхнего уровня. Для последнего вне зависимости от типа СНЭ могут применяться три основных режима работы [15]. Контроль напряжения или контроль коэффициента мощности для формирования опорного значения тока по оси q , контроль по активной мощности для формирования опорного значения тока по оси d . Внутренний контур управления током не отличается от стратегии управления СПН в режиме “ведущего”.

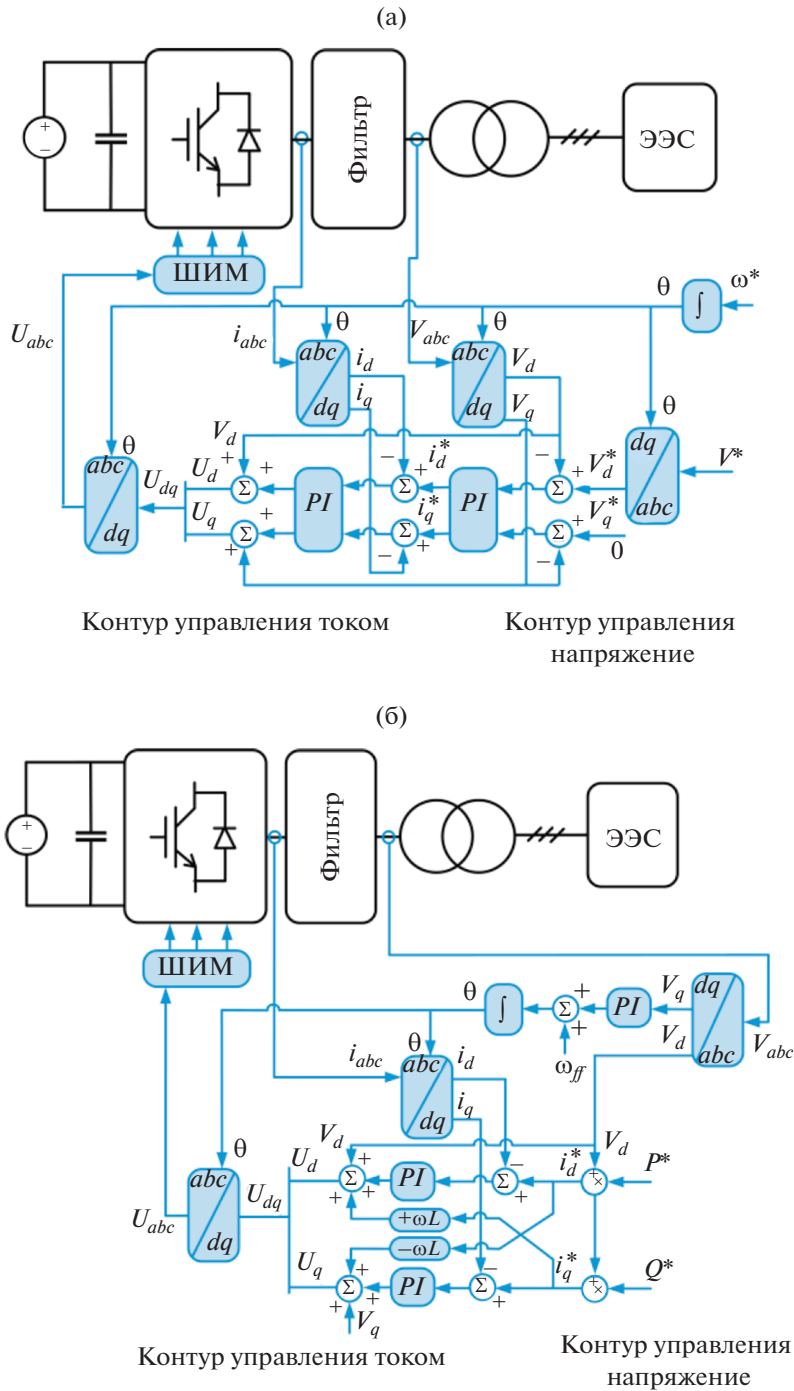


Рис. 11. Структурная схема САУ СПН со стороны сети (а) “ведомый”, (б) “ведущий”.

2.1. Преобразователь на постоянном токе

В качестве интерфейса связи между ЦПТ и накопителем энергии используются двунаправленные повышающие/понижающие преобразователи на постоянном токе (bidirectional-current buck/boost DC-DC converter). DC-DC преобразователь осуществляет функции заряда/разряда накопителя путем управления уровнем напряжений в ЦПТ. В составе СНЭ основное распространение получили изолированные и неизолированные двухуровневые и многоуровневые DC-DC преобразователи с нейтральной точкой и различными топологиями (рис. 12) [99–104]. Неизолированные преобразователи применяются с малым коэффициентом трансформации по напряжению [103, 105]. Изолированные BDC используются в случае большой мощности СНЭ, содержат гальваническую развязку (высокочастотный трансформатор) и применяются для более чувствительных к электромагнитным помехам и пульсациям накопителей энергии. Для повышения эффективности (снижения уровня шумов и гармоник) в изолированных и неизолированных DC-DC преобразователях могут применяться технологии мягкого переключения (soft-switching technique) при нулевом напряжении посредством вспомогательных схем, компонентов и специальной настройки модуляции (zero-voltage switching – ZVS) [106–109].

Для СК и АБ, как правило, используется трехуровневый инвертор, и поэтому применяют схемы двухквadrантных двунаправленных DC-DC преобразователей или двухквadrантных двухуровневых DC-DC преобразователей (рис. 12а, 12б). Также в цепях переключения могут предусматриваться дополнительные индуктивности, ограничивающие пульсации выходного тока. Для СПИН применяется конфигурация, обеспечивающая работу в трех режимах: заряд, разряд и “режим ожидания” (рис. 12в) [80, 100, 109]. Для водородных ТЭ широко применяются резонансные преобразователи с питанием от напряжения [110, 100] или тока [111]. В более современных водородных ТЭ также получили распространение полу- или полномостовые преобразователи и их модификации с фиксированной частотой резонансного перехода и ZVS (рис. 12г) [109–117].

Основу математического описания, воспроизводящего электромагнитные переходные процессы в двухквadrантном DC-DC преобразователе, составляет система уравнений (21) [118]. На ее основе формируются уравнения для других более сложных конфигураций, используемых с разными типами СНЭ.

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = E - u_C(1 - S) - R_L i_L \\ C \frac{du_C}{dt} = i_L(1 - S) - \frac{u_C}{R_C} - i_{dc}, \end{cases} \quad (21)$$

где S – коммутационная функция; R_L , L – последовательные активное и индуктивное сопротивления катушки индуктивности; C , R_C – параллельные емкостное и активное сопротивления конденсатора; u_C – напряжение цепи постоянного тока; i_L – ток в индуктивности; E – ЭДС накопителя; i_{dc} – выходной ток.

Основная задача САУ DC-DC преобразователя поддерживать постоянным напряжением ЦПТ за счет управления процессом заряда/разряда СНЭ. Для СПИН САУ контролирует отклонение тока катушки в режиме заряда вместо напряжения ЦПТ [110]. Для МН алгоритм управления преобразователя со стороны электрической машины основан на контуре управления током (КУТ) и стратегии СШИМ, также как для преобразователя со стороны сети [88]. Его особенность заключается в формировании входного сигнала тока i_q для КУТ, которая обусловлена контролем режима заряда/разряда [15]. Кроме этого, для координатного преобразования вместо угла, формируемого ФАПЧ, используется измеряемый угол на роторе, отражающий его положение [119].

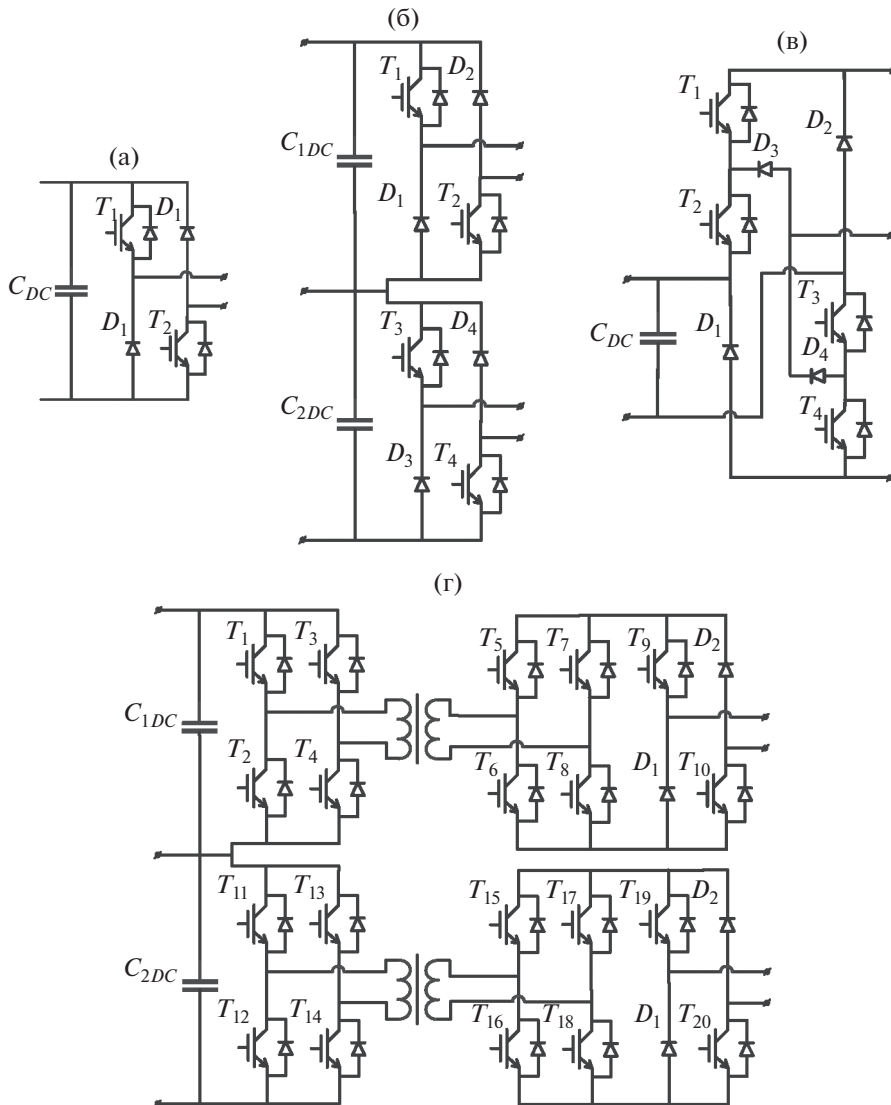


Рис. 12. Конфигурации DC-DC преобразователей, используемых в СНЭ: (а) двухквadrантные двунаправленные DC-DC преобразователи; (б) двухквadrантные двухуровневые DC-DC преобразователи; (в) трехрежимный DC-DC преобразователь; (г) полномостовой DC-DC преобразователь.

2.2. Фильтр и повышающий трансформатор связи

Как отмечалось ранее, фильтр и повышающий трансформатор связи в схеме подключения СНЭ к ЭЭС используются для сглаживания нежелательных гармоник и обеспечения гальванической развязки. Топология и параметры фильтра выбираются в рамках общепринятых методик с целью минимизации гармоник тока, создаваемых переключением силовых ключей преобразователя со стороны сети [120]. Математическое описание, отражающее электромагнитные переходные процессы в симметрич-

ной системе “преобразователь – RL -фильтр – трансформатор связи – сеть”, в общем виде формируется с помощью закона Кирхгофа и имеет следующий вид:

$$L_{abc} \frac{di_{abc}}{dt} = v_{Zabc} - v_{0abc} - R_{abc} i_{abc}, \quad (22)$$

где L_{abc} , R_{abc} – сопротивления RL -фильтра и трансформатора связи; i_{abc} – выходной ток преобразователя (в выражении выходной ток преобразователя со стороны сети и ток, протекающий через фильтр в сторону сети, идентичны); u_{0abc} – напряжение в точке подключения СНЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статья является обзорной в области математического моделирования СНЭ и позволяет читателю ознакомиться с детальными моделями СНЭ, принципами их реализации. В статье обозначены основные типы СНЭ, которые считаются наиболее перспективными для применения в современных ЭЭС. Рассмотрены математические модели СНЭ подключаемых к ЭЭС через СПН: АБ, СК, СПИН, ТЭ и МН. Для данных типов СНЭ описан принцип реализации детальными моделями, приводятся топологии основных конфигураций преобразователей постоянного тока, модели СПН и их математическое описание. Рассматриваются распространенные стратегии САУ СНЭ. Показано, что при моделировании различных режимов работы ЭЭС с СНЭ для детального математического представления различных типов накопителей (кроме маховиковых) используются в основном модели в виде эквивалентных электрических схем. Такие модели отражают переходные процессы различной длительности в накопителях, имеют схожий принцип построения и реализации. Однако для всех детальными моделями в виде эквивалентных электрических схем во многих рассмотренных работах отмечается сложность идентификации ряда параметров. Соответственно усложняется применение таких моделей, особенно в случае отсутствия натурных опытов по параметрированию. Поэтому в статье также приводятся обобщенные модели распространенных типов СНЭ, которые не уступают по уровню детализации моделям в виде эквивалентных электрических схем и воспроизводят значимый для электроэнергетики спектр процессов. Обобщенные модели менее чувствительны к неточностям в задании исходных данных и не требуют чрезвычайно сложных опытов по натурной верификации. Кроме этого, применение таких моделей возможно как для исследований электромагнитных, так и электромеханических переходных процессов.

Работа выполнена в рамках Программы стратегического академического лидерства “Приоритет – 2030” ТПУ (№ Приоритет-2030-НИП/ЭБ-022-1308-2021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Electrical energy storage: white paper. Technical report. Prepared by electrical energy storage project team. International Electrotechnical Commission (IEC), Published December 2011.
2. Gallo A.B., Simões-Moreira J.R., Costa H.K.M. Energy storage in the energy transition context: A technology review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* V. 65. p. 800–822, Nov. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.028>
3. DOE global energy storage database. [Online]. Available: <https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/statistics.html>; 2022 [accessed 23 March 2022].
4. Database of the European energy storage technologies and facilities. [Online]. Available: <https://data.europa.eu/data/datasets/database-of-the-european-energy-storage-technologies-and-facilities?locale=en>; 2022 [accessed 12 March 2022].
5. Ефремов Д.Г., Глушкин И.З. Повышение динамической устойчивости генератора с помощью управления группой накопителей энергии различного вида // Вестник ИГЭУ. № 6. 2017. С. 5–14.
6. Ефремов Д.Г., Глушкин И.З. Управление маховиковым накопителем с целью повышения динамической устойчивости станции // Релейная защита и автоматизация. 2016. № 2. С. 18–26.

7. *Илюшин П.В., Куликов А.Л., Березовский П.К.* Эффективное использование накопителей электрической энергии для предотвращения отключений объектов распределенной генерации при кратковременных отклонениях частоты / Релейная защита и автоматизация. 2019. № 4. С. 32–39.
8. *Куликов Ю.А.* Накопители электроэнергии – эффективный инструмент управления режимами электроэнергетических систем / Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: материалы 9 междунар. молодеж. науч.-техн. конф., Казань, 1–5 окт. 2018 г. в 3 т. – Казань: Казан. гос. энергет. ун-т. 2018. Т. 1. С. 38–43.
9. *Ефремов Д.Г., Ефремова И.Ю., Глускин И.З.* Применение накопителей в энергосистеме для целей противоаварийной автоматики // Евразийский научный журнал. 2015. № 11. С. 80–86.
10. *Ефремов Д.Г., Ефремова И.Ю.* Исследование возможности применения накопителей энергии для целей противоаварийной автоматики // Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Энергия-2015”. Т. 3. 2015. С. 129–131.
11. *Luo X., Wang J., Dooner M., Clarke J.* Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation // Applied Energy. 2015. V. 137. 2015. P. 511–536.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>
12. *Molina M.G.* Energy Storage and Power Electronics Technologies: A Strong Combination to Empower the Transformation to the Smart Grid, in Proceedings of the IEEE, 2017. V 105. № 11. P. 2191–2219.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2702627>
13. *Tamilselvi S., Gunasundari S., Karuppiah N.* A Review on Battery Modelling Techniques // Sustainability 2021. 13. № 18: 10042.
<https://doi.org/10.3390/su131810042>
14. *Hidalgo-Reyes J.I., Gómez-Aguilar J.F., Escobar-Jiménez R.F.* Classical and fractional-order modeling of equivalent electrical circuits for supercapacitors and batteries, energy management strategies for hybrid systems and methods for the state of charge estimation: A state of the art review // Microelectronics Journal. V. 85. 2019. P. 109–128.
<https://doi.org/10.1016/j.mejo.2019.02.006.6>
15. *Molina M.G.* Dynamic Modelling and Control Design of Advanced Energy Storage for Power System Applications. In Dynamic Modelling, edited by *Alisson Brito*. London: IntechOpen, 2010.
<https://doi.org/10.5772/7092>
16. *Wagner N.* “Electrochemical Impedance Spectroscopy”, in *PEM Fuel Cell Diagnostic Tools* ed. Haijiang Wang, Xiao-Zi Yuan and Hui Li (Boca Raton: CRC Press, 2011), [Online]. Available: <https://www.routledgehandbooks.com/doi/10.1201/b11100-5> [accessed 24 March 2022].
17. *Souleman N.M., Tremblay O. and Dessaint L.-A.* A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles, 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2009. P. 1722–1729.
<https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289692>
18. *Tremblay O., Dessaint L. and Dekkiche A.* A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles,” 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. P. 284–289.
<https://doi.org/10.1109/VPPC.2007.4544139>
19. *Chen M., Rincon-Mora G.A.* Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I–V performance,” in IEEE Transactions on Energy Conversion. V. 21. № 2. 2006. P. 504–511.
<https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874229>
20. *Calero F., Cañizares C.A. and Bhattacharya K.* Detailed and Average Battery Energy Storage Model Comparison,” 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), 2019. P. 1–5.
<https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2019.8905772>
21. *Beck J.W., Carroll D.P., Gareis G.E.* A computer study of battery energy storage and power conversion equipment operation, in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1976. V. 95. № 4. P. 1064–1072.
<https://doi.org/10.1109/T-PAS.1976.32198>
22. *Gareis G.E., Carroll D.P., Ong C.M., Wood P.* The interaction of batteries and fuel cells with electrical distribution systems: Force commutated converter interface, in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977. V. 96. № 4. P. 1242–1250.
<https://doi.org/10.1109/T-PAS.1977.32447>
23. *Friede W., Rael S., Davat B.* Mathematical model and characterization of the transient behavior of a PEM fuel cell,” in IEEE Transactions on Power Electronics, 2004. V. 19. № 5. P. 1234–1241.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.833449>
24. *Rosewater D.M., Copp D.A., Nguyen T.A., Byrne R.H. and Santoso S.* Battery Energy Storage Models for Optimal Control, in IEEE Access, V. 7. pp. 178357–178391. 2019.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957698>
25. *He F., Li X., Ma L.* Combined experimental and numerical study of thermal management of battery module consisting of multiple Li-ion cells, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014. V. 72. P. 622–629.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.038>

26. *Li J., Cheng Y., Jia M.* An electrochemical–thermal model based on dynamic responses for lithium iron phosphate battery // *Journal of Power Sources*. 2014. V. 255. P. 130–143.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.007>
27. *Linden D., Reddy T. B.* Handbook of Batteries, McGraw-Hill, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
28. *Freeborn T.J., Maundy B., Elwakil A.S.* Fractional-order models of supercapacitors, batteries and fuel cells: a survey // *Mater Renew Sustain Energy*. 2015.
<https://doi.org/10.1007/s40243-015-0052-y>
29. *Shepherd C.M.* Design of Primary and Secondary Cells – Part 2. An equation describing battery discharge // *Journal of Electrochemical Society*. 1965. V. 112. P. 657–664.
30. *Einhorn M., Conte F.V., Kral C., Fleig J.* Comparison, Selection, and Parameterization of Electrical Battery Models for Automotive Applications, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013. V. 28. № 3. P. 1429–1437.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2210564>
31. *Olivier T., Dessaint L.-A.* Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications // *World Electric Vehicle Journal*. 2009. 3. № 2: 289–298.
<https://doi.org/10.3390/wevj3020289>
32. *Prieto R., Oliver J.A., Reglero I., Cobos J.A.* Generic Battery Model based on a Parametric Implementation. Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. P. 603–607.
<https://doi.org/10.1109/APEC.2009.4802720>
33. *Huria T., Ceraolo M., Gazzarri J., Jackey R.* High fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cells, *IEEE International Electric Vehicle Conference*, 2012. P. 1–8.
<https://doi.org/10.1109/IEVC.2012.6183271>
34. *Kim T., Qiao W.* A Hybrid Battery Model Capable of Capturing Dynamic Circuit Characteristics and Nonlinear Capacity Effects, in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011. V. 26. № 4. P. 1172–1180.
<https://doi.org/10.1109/TEC.2011.2167014>
35. *Binelo M.F.B., Sausen A.T.Z.R., Sausen P.S.* Mathematical Modeling and Parameter Estimation of Battery Lifetime using a Combined Electrical Model and a Genetic Algorithm. *Tendencias em Matematica Aplicadae Computacional*, 2019. 20. № 1. P. 149–167.
<https://doi.org/10.5540/tema.2019.020.01.0149>
36. *Mauracher P., Karden E.* Dynamic modelling of lead/acid batteries using impedance spectroscopy for parameter identification // *Journal of Power Sources*. 1997. V. 67. Iss. 1–2. P. 69–84.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(97\)02498-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(97)02498-1)
37. *Motapon S.N., Lupien-Bedard A., Dessaint L.* A Generic Electrothermal Li-ion Battery Model for Rapid Evaluation of Cell Temperature Temporal Evolution, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017. V. 64. № 2. P. 998–1008.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2618363>
38. *Mousavi G.S.M., Nikdel M.* Various battery models for various simulation studies and applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. V. 32. P. 477–485.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.048>
39. *Gamboa P., Pinto S.F., Silva J.F., Margato E.* A flywheel energy storage system with Matrix Converter controlled Permanent Magnet Synchronous Motor, *18th International Conference on Electrical Machines*, 2008. P. 1–5.
<https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2008.4799861>
40. Накопители энергии. Учебное пособие для вузов / Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин, П.В. Васюкович. Под редакцией Д.А. Бута. М: Энергоатомиздат, 1991. 400 с.
41. *Астахов Ю.Н. и др.* Накопители энергии в электрических системах: Учеб. пособие для электроэнергет. спец. вузов / Ю.Н. Астахов, В.А. Веников, А.Г. Тер-Газарян-М.: Высш. шк., 1989. 159 с.
42. *Nagorny A.S., Dravid N.V., Jansen R.H., Kenny B.H.* Design aspects of a high speed permanent magnet synchronous motor/generator for flywheel applications, *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*. 2005. P. 635–641.
<https://doi.org/10.1109/IEMDC.2005.195790>
43. *Arani A.A.K., Karami H., Gharehpetian G.B., Hejazi M.S.A.* Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. V. 69. P. 9–18.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.166>
44. *Sebastián R., Alzola R.P.* Flywheel energy storage systems: Review and simulation for an isolated wind power system // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. V. 16. Iss. 9. P. 6803–6813.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.08.008>
45. *Pillay P., Krishnan R.* Modeling of permanent magnet motor drives // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1988. V. 35. № 4. P. 537–541.
<https://doi.org/10.1109/41.9176>

46. Якимец И.В., Астахов Ю.Н., Лабунцов В.А., Глушкин И.З., Мохов В.Б. Сверхпроводниковые накопители для электроэнергетических систем // *Электричество*. 1995. № 5.
47. Якимец И.В., Наровлянский В.Г., Матвейкин В.М. Выбор параметров индуктивного накопителя для энергетических систем // *Электричество*. 1992. № 6.
48. Якимец И.В. Расчетные модели работы сверхпроводникового накопителя в энергосистеме // *Электричество*. 2000. № 7.
49. Глушкин И.З., Дмитриева Г.А., Мисриханов М.Ш., Наровлянский В.Г., Якимец И.В. Сверхпроводниковые токоограничивающие устройства и накопители энергии для электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 2002. 373 с.
50. Chowdhuri P. Calculation of Series Capacitance for Transient Analysis of Windings, in *IEEE Power Engineering Review*. 1987. V. PER-7. № 1. P. 45–46.
<https://doi.org/10.1109/MPER.1987.5527311>
51. Chen L., Liu Y., Arsoy A.B. Detailed modeling of superconducting magnetic energy storage (SMES) system, in *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2006. V. 21. № 2. P. 699–710.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.864075>
52. Arsoy A.B., Wang Z., Liu Y., Ribeiro P.F. Transient modeling and simulation of a SMES coil and the power electronics interface, in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 1999. V. 9. № 4. P. 4715–4724.
<https://doi.org/10.1109/77.819343>
53. Miri A.M., Sihler C., Salbert H. and Vollmer K.-U. Investigation of the transient behaviour of a superconducting magnetic energy storage (SMES) generating high power pulses // *Euro. Trans. Electr. Power*. 1998. 8: P. 13–19.
<https://doi.org/10.1002/etep.4450080103>
54. Hassan I.D., Bucci R.M., Swe K.T. 400 MW SMES power conditioning system development and simulation, in *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1993. V. 8. № 3. P. 237–249.
<https://doi.org/10.1109/63.233279>
55. Skiles J.J. Performance of a power conversion system for superconducting magnetic energy storage (SMES), in *IEEE Transactions on Power Systems*. 1996. V. 11. № 4. P. 1718–1723.
<https://doi.org/10.1109/59.544633>
56. Zubieta L., Bonert R. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications, in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000. V. 36. № 1. P. 199–205.
<https://doi.org/10.1109/28.821816>
57. Liu K., Zhu C., Lu R., Chan C.C. Improved Study of Temperature Dependence Equivalent Circuit Model for Supercapacitors, in *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, V. 41. № 5. P. 1267–1271.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2251363>
58. Simscape Power Systems Reference (Simscape Components), The MathWorks, Inc. 3 Apple Hill Drive Natick, MA 01760-2098.
59. Oldham K.B. A Gouy–Chapman–Stern model of the double layer at a (metal)/(ionic liquid) interface // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. V. 613. Iss. 2. 2008. P. 131–138.
<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2007.10.017>
60. Xu N., Riley J. Nonlinear analysis of a classical system: The double-layer capacitor, *Electrochemistry Communications*. 2011. V. 13. Iss. 10. P. 1077–1081.
<https://doi.org/10.1016/j.elecom.2011.07.003>
61. Larminie J.R.J. Current interrupt techniques for circuit modeling. *IEE Colloquium Electrochem Measure* 1994. 12/1–12/6.
62. Wang C., Nehrir M.H., Shaw S.R. Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits, in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005 V. 20. № 2. P. 442–451.
<https://doi.org/10.1109/TEC.2004.842357>
63. Lan T., Strunz K. Modeling of multi-physics transients in PEM fuel cells using equivalent circuits for consistent representation of electric, pneumatic, and thermal quantities, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. V. 119. 105803.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105803>
64. Chang W.-Y. Estimating equivalent circuit parameters of proton exchange membrane fuel cell using the current change method, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2013. V. 53. P. 584–591.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.05.031>
65. Lee J.M., Cho B.H. A Dynamic Model of a PEM Fuel Cell System, *Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 2009. pp. 720–724.
<https://doi.org/10.1109/APEC.2009.4802740>
66. Lan T., Strunz K. Multiphysics Transients Modeling of Solid Oxide Fuel Cells: Methodology of Circuit Equivalents and Use in EMTP-Type Power System Simulation, in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, V. 32. № 4. pp. 1309–1321. Dec. 2017.
<https://doi.org/10.1109/TEC.2017.2687886>
67. Nehrir M.H., Wang C. *Modeling and Control of Fuel cells*. Piscataway, NJ, USA: Wiley/IEEE Press; 2009.
68. Larminie L., Dicks A. *Fuel Cell Systems Explained*, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2003.

69. Wang C., Nehrir M.H. A Physically Based Dynamic Model for Solid Oxide Fuel Cells, in IEEE Transactions on Energy Conversion. 2007. V. 22. № 4. P. 887–897.
<https://doi.org/10.1109/TEC.2007.895468>
70. Amphlett J.C., Baumert R., Mann R.F. Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell I. Mechanistic model development. J Electrochem Soc 1995. V 142(1). P. 1–8.
<https://doi.org/10.1149/1.2043866>
71. Bird R., Stewart W., Lightfoot E. Transport phenomena. 2nd ed. New York: Wiley; 2002.
72. Mann R.F., Amphlett J.C., Hooper M.A.I. Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell, Journal of Power Sources, 2000. V. 86. Iss. 1–2. P. 173–180.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00484-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00484-X)
73. Souleman N.M., Tremblay O., Dessaint L. A generic fuel cell model for the simulation of Fuel Cell Power Systems, IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2009. P. 1–8.
<https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275853>
74. Li S., Ke B. Study of battery modeling using mathematical and circuit oriented approaches, IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011, P. 1–8.
<https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039230>
75. Saw L.H., Somasundaram K., Ye Y., Tay A.A.O. Electro-thermal analysis of Lithium Iron Phosphate battery for electric vehicles // Journal of Power Sources, 2014. V. 249. P. 231–238.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.10.052.123>
76. Балыев Д.Ю., Зырянов В.М., Кириянова Н.Г., Пранкевич Г.А. Методика расчета основных параметров накопителя энергии по экспериментальным нагрузочным диаграммам // Вестник ИрГТУ. 2018. № 5 (22). С. 105.
77. Chen Z., Guerrero J.M., Blaabjerg F. A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines, in IEEE Transactions on Power Electronics. 2009. V. 24. № 8. P. 1859–1875.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2017082>
78. Sirisukprasert S. Power electronics-based energy storages: A key component for Smart Grid technology, International Electrical Engineering Congress (iEECON). 2014. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1109/iEECON.2014.6925979>
79. Rodriguez J.R., Dixon J.W., Espinoza J.R. PWM regenerative rectifiers: state of the art, in IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2005. V. 52. № 1. P. 5–22.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2004.841149>
80. Molina M.G., Mercado P.E., Watanabe E.H. Static synchronous compensator with superconducting magnetic energy storage for high power utility applications, Energy Conversion and Management. 2007. V. 48. Iss. 8. P. 2316–2331.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.03.011>
81. Arsoy A.B., Liu Y., Ribeiro P.F., Wang F. StatCom-SMES, in IEEE Industry Applications Magazine. 2003. V. 9. № 2. P. 21–28.
<https://doi.org/10.1109/MIA.2003.1180946>
82. Jakob R., Keller C., Mohlenkamp G., Gollentz B. 3-Level high power converter with press pack IGBT, European Conference on Power Electronics and Applications. 2007. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1109/EPE.2007.4417648>
83. Rodriguez J., Bernet S., Steimer P.K., Lizama I.E. A Survey on Neutral-Point-Clamped Inverters, in IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. V. 57. № 7. P. 2219–2230.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2032430>
84. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. Power electronics: Converters, applications, and design. New Delhi, India: John Wiley & Sons; 2007.
85. Yaramasu V., Wu B. Predictive Control of a Three-Level Boost Converter and an NPC Inverter for High-Power PMSG-Based Medium Voltage Wind Energy Conversion Systems, in IEEE Transactions on Power Electronics. 2014. V. 29. № 10. P. 5308–5322.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2292068>
86. Portillo R.C. et al. Modeling Strategy for Back-to-Back Three-Level Converters Applied to High-Power Wind Turbines, in IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2006. V. 53. № 5. P. 1483–1491.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2006.882025>
87. Vargas P., Cortes P., Ammann U. Predictive Control of a Three-Phase Neutral-Point-Clamped Inverter // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007. V. 54. № 5. P. 2697–2705.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2007.899854>
88. Suvire G.O., Molina M.G., Mercado P.E. Improving the Integration of Wind Power Generation Into AC Microgrids Using Flywheel Energy Storage, in IEEE Transactions on Smart Grid. 2012. V. 3. № 4. P. 1945–1954.
<https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2208769>
89. Mustafa A.E., Pullen K.R. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications // Applied Sciences 7. 2017. № 3. P. 286.
<https://doi.org/10.3390/app7030286>
90. Engler A. Control of inverters in isolated and in grid tied operation with regard to expandability in tutorial: Power Electronics for Regenerative Energy, presented at the Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., Aachen, Germany; 2004.

91. *De Brabandere K., Bolsens B., Van den Keybus J.* A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters, in IEEE Transactions on Power Electronics. 2007. V. 22. № 4. P. 1107–1115. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.900456>
92. *Rocabert J., Luna A., Blaabjerg F., Rodríguez P.* Control of Power Converters in AC Microgrids, in IEEE Transactions on Power Electronics. 2012. V. 27. № 11. P. 4734–4749. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2199334>
93. *Lin Yashen, Joseph H. Eto, Brian B. Johnson.* Research Roadmap on Grid-Forming Inverters. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. Technical Report NREL/TP-5D00-73476 November 2020 <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/73476.pdf>
94. *Kkuni K.V., Mohan S., Yang G., Xu W.* Comparative assessment of typical control realizations of grid forming converters based on their voltage source behavior. Systems and Control (eess.SY) 2021. P. 22. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.10048>
95. *Zhong Q.-C., Hornik T.* Synchronverters: Grid-Friendly Inverters That Mimic Synchronous Generators, in Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration, IEEE. 2012. P. 277–296. <https://doi.org/10.1002/9781118481806.ch18>
96. *Vasudevan K.R., Ramchandaramurthy V.K., Babu T.S., Pouryekt A.* Synchronverter: A Comprehensive Review of Modifications, Stability Assessment, Applications and Future Perspectives, in IEEE Access. 2020. V. 8. P. 131565–131589. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010001>
97. *Rathnayake D.B. et al.* Grid Forming Inverter Modeling, Control, and Applications, in IEEE Access. 2021. V. 9. P. 114781–114807. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3104617>
98. *Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M.* Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. Wiley-IEEE Press. 2007 p: 400.
99. *Krimer F., Biela J., Kolar J.W.* A comparative evaluation of isolated bi-directional DC/DC converters with wide input and output voltage range, Fourtieth IAS Annual Meeting, 2005, V. 1. P. 599–606. <https://doi.org/10.1109/IAS.2005.1518368>
100. *Brovanov S.V., Egorov S.D.* Review of AC voltage generation systems based on multilevel converters and photovoltaic cells, 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. 2013. P. 275–278. <https://doi.org/10.1109/EDM.2013.6641994>
101. *Singh B., Singh B.N., Chandra A.* A review of single-phase improved power quality AC-DC converters, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003. V. 50. № 5. P. 962–981. <https://doi.org/10.1109/TIE.2003.817609>
102. *Kaspar K., Husev O., Tytelmaier K.* An Overview of Bidirectional AC-DC Grid Connected Converter Topologies for Low Voltage Battery Integration. International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDES) 2018 V. 9. № 3:1223. doi.: 9.13. PP.1223–1239 <https://doi.org/10.11591/IJPEDES.V>
103. *Tytelmaier K., Husev O., Veligorskyi O., Yershov R.* A review of non-isolated bidirectional dc-dc converters for energy storage systems, II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF). 2016. P. 22–28. <https://doi.org/10.1109/YSF.2016.7753752>
104. *Ma X., Wu H., Huang C., Huang X.* A Novel Topology Family of Single-stage Parallel Mode Uninterruptible AC/AC Converter with PFC, CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference. 2006. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/IPEMC.2006.4778197>
105. *Dawood N.B.* Review of different DC to DC converters based for renewable energy applications // International Research Journal of Engineering and Technology. 2016, V. 3. № 3. P. 46–50.
106. *Duong T.-D., Nguyen M.-K., Lim Y.-C.* An Active-Clamped Current-Fed Half-bridge DC-DC Converter With Three Switches, International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia). 2018. P. 982–986. <https://doi.org/10.23919/IPEC.2018.8507795>
107. *Yang J., Do H.* Soft-Switching Bidirectional DC-DC Converter Using a Lossless Active Snubber, in IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2014. V. 61. № 5. P. 1588–1596. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2013.2285700>
108. *Jung D.-Y., Hwang S.-H., Ji Y.-H.* Soft-Switching Bidirectional DC/DC Converter with a LC Series Resonant Circuit, in IEEE Transactions on Power Electronics. 2013. V. 28. № 4. P. 1680–1690. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2208765>
109. *Das P., Laan B., Mousavi S.A.* A Nonisolated Bidirectional ZVS-PWM Active Clamped DC–DC Converter, in IEEE Transactions on Power Electronics. 2009. V. 24. № 2. P. 553–558. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2008.2006897>
110. *Zhang H., Kang Y., Zhu P.* Enhancement of generator transient stability using superconducting magnetic energy storage (SMES) in dynamic simulation test of power system, 4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE PEDS 2001 - Indonesia. Proceedings (Cat. No.01TH8594). 2001. P. 208–213 V. 1. <https://doi.org/10.1109/PEDS.2001.975312>

111. *Kwasinski A.* Identification of Feasible Topologies for Multiple-Input DC–DC Converters, in *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2009. V. 24. № 3. P. 856–861. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2008.2009538>
112. *Steigerwald R.L.* A comparison of half-bridge resonant converter topologies, in *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1988. V. 3. № 2. P. 174–182. <https://doi.org/10.1109/63.4347>
113. *Bhat A.K.S.* Analysis and design of LCL-type series resonant converter, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1994. V. 41. № 1. P. 118–124. <https://doi.org/10.1109/41.281617>
114. *Steigerwald R.L.* High-Frequency Resonant Transistor DC-DC Converters, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1984. V. IE-31. № 2. P. 181–191. <https://doi.org/10.1109/TIE.1984.350066>
115. *Rajashekara K.* Propulsion System Strategies for Fuel Cell Vehicles, Tech. Rep., Energenix Ctr., Delphi Automotive Syst., 2000.
116. Fuel Cell Control, Ltd., Tech. Rep., DC–DC Converter Module 2006 [Online]. Available: <http://www.fuelcellcontrol.com/dcconverter.html> [accessed 12 March 2022].
117. *Parchomiuk M., Strzelecki R., Zymmer K., Domino A.* Modular power converter with superconducting magnetic energy storage for electric power distribution system — Analysis and simulation, 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe). 2017. P. P.1–P.6. <https://doi.org/10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8099341>
118. *Bacha S., Munteanu I., Bratcu A.I.* Power Electronic Converters Modeling and Control: With Case Studies. Springer Sci. Bus. Media; 2013.
119. *Cardenas R., Pena R., Asher G.M.* Control strategies for power smoothing using a flywheel driven by a sensorless vector-controlled induction machine operating in a wide speed range, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2004. V. 51. № 3. P. 603–614. <https://doi.org/10.1109/TIE.2004.825345>
120. *Liserre M., Blaabjerg F., Hansen S.* Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier, in *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2005. V. 41. № 5. P. 1281–1291. <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.853373>

A Review of Mathematical Models of Energy Storage Systems for Electric Power Systems Simulation. Part I

I. A. Razzhivin^{a,*}, A. A. Suvorov^a, M. V. Andreev^a, R. A. Ufa^a, and A. B. Askarov^a

^aNational Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

*e-mail: lionrash@tpu.ru

Nowadays energy storage systems (ESS) are becoming an integral part of modern power systems (PES) and are used to solve a wide range of tasks. However, as the penetration level and power of ESS grows, their impact on the processes and operation modes of EPS is also increasing. Therefore, there is a need for using mathematical models of ESS, taking into account the specifics, various distinctive properties of each type and class of EPS, as part of the models of large-scale EPS. However, in foreign and national literature there are no review papers about detailed mathematical models of commonly use types and classes of SNE and simplifications used for them, which can be used to adequately simulate the large-scale EPS depending on the research tasks. Therefore, the first part of this paper considers the most promising types and classes of SNE used in the EPS, as well as the areas and tasks of their use. The principles of implementation of detailed mathematical models and structures of automatic control systems are described for the considered types and classes of SNE. In the second part of the paper the modern approaches of simplification of mathematical models of SNE, and analysis of consequences of such simplifications and areas of their application are given. Thus, the review paper consists of two parts and can help in choosing a mathematical model of the SNE for solving specific research tasks of analysis of their operation as a part of real EPS.

Keywords: energy storage systems, types of energy storage, mathematical models, electric power systems