

УДК 621.311.001.57

**ОБЗОР МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ. ЧАСТЬ II**© 2023 г. И. А. Разживин¹, *, А. А. Суворов¹, М. В. Андреев¹, Р. А. Уфа¹, А. Б. Аскарлов¹¹Федеральное 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 17.02.2023 г.

Принята к публикации 20.02.2023 г.

С развитием электроэнергетических систем (ЭЭС) с преобладанием возобновляемых источников энергии становится актуальным применение систем накопления энергии (СНЭ). При увеличении мощности применяемых СНЭ и доли их использования в ЭЭС они начинают оказывать существенное влияние на динамические свойства ЭЭС. Соответственно, решая задачи проектирования и эксплуатации ЭЭС с СНЭ, необходимым становится анализ и учет специфики их функционирования. Поскольку основной способ получения обозначенной информации математическое моделирование, то возникает вопрос адекватности подходов и способов воспроизведения процессов в СНЭ в составе ЭЭС. В первой части статьи были рассмотрены детальные математические модели основных элементов СНЭ. В рамках второй части статьи представлен анализ математических моделей разной степени детализации СНЭ в зависимости от типа накопителя энергии и ряда других факторов. Также в статье представлен обзор применяемых подходов к упрощению моделей СНЭ и их математическое описание. Рассматриваются области применения таких моделей. Кроме этого, представлен анализ ограничений и недостатков, связанных с упрощением моделей. Статья является обзорной и может помочь в выборе математической модели СНЭ для решения необходимых задач.

Ключевые слова: системы накопления электрической энергии, переходные процессы, математические модели, электроэнергетические системы

DOI: 10.31857/S000233102303007X, EDN: TBBYWM

ВВЕДЕНИЕ

В первой части статьи “Обзор математических моделей систем накопления энергии для моделирования электроэнергетических систем. Часть I” были обозначены основные типы систем накопления энергии (СНЭ), которые применяются в реальных электроэнергетических системах (ЭЭС). Среди них выделены наиболее перспективные СНЭ подключаемые к ЭЭС через статический преобразователь напряжения (СПН): аккумуляторные батареи (АБ), суперконденсаторы (СК), сверхпроводниковые накопители энергии (СПИН), водородные топливные элементы (ТЭ) и маховиковые накопители (МН). Для данных типов СНЭ были рассмотрены принципы реализации детальных моделей, топологии основных конфигураций преобразователей постоянного тока, модель СПН и их математическое описание. Были рассмотрены основные стратегии системы автоматического управления (САУ) СНЭ. Отмечено, что принцип по-

строения детальных моделей непосредственно накопителей энергии (НЭ) основан на представлении их в виде эквивалентных электрических схем. Однако применение детальных моделей затруднительно по ряду причин. Во-первых, параметрирование моделей зачастую требует проведения натурных экспериментов по извлечению параметров схемы замещения, во-вторых, их математическое моделирование, основанное на сугубо численном подходе, в частности, при моделировании ЭЭС реальной размерности требует высоких вычислительных ресурсов. Кроме этого, применение детальных моделей, способных воспроизводить широкий спектр переходных процессов, не всегда целесообразно. Для отдельных задач исследования режимов работы СНЭ в ЭЭС воспроизведение широкого спектра физико-химических процессов в накопителе или быстрой динамики силовых ключей СПН является необязательным. В связи с чем помимо детальных моделей высокого порядка разработано большое количество упрощенных математических моделей. В основном такие модели представляют идеализированные источники тока или напряжения с учетом и без учета уровня состояния заряда (СЗ). Также среди упрощенных моделей встречаются те, которые частично воспроизводят переходные процессы в НЭ или отражающие в какой-то степени динамику силовых ключей СПН. В связи с этим, поскольку для разных типов накопителей возможно применение различных подходов к упрощению их моделей, то вопрос моделирования и выбора подходящих моделей для разных типов СНЭ в зависимости от решаемых задач является актуальным. Данному вопросу посвящена вторая часть статьи.

В ряде работ рассматриваются упрощенные модели некоторых типов СНЭ [1–3]. Однако в литературе отсутствует широкий обзор упрощенных математических моделей для распространенных СНЭ, используемых в составе ЭЭС. Поэтому вкладом второй части данной статьи является описание современных подходов к возможным упрощениям математических моделей как самих накопителей, так и в целом СНЭ. Помимо описания моделей обозначены задачи, в которых данные модели могут быть применены. Также отдельно выделены те недостатки, которые присущи упрощенным моделям и ситуации в моделировании переходных процессов, в которых упрощенные модели не воспроизводят определенный спектр процессов и могут привести к неадекватным результатам моделирования. Статья будет интересна специалистам, занимающимся моделированием работы накопителей энергии в ЭЭС. Кроме этого, статья может поспособствовать в выборе математической модели СНЭ для решения конкретной исследовательской или практической задачи.

Статья организована следующим образом: в разделе 1 кратко представлены виды упрощенных моделей, применяемые для всех типов СНЭ. В разделе 2 рассматриваются принципы формирования упрощенных математических моделей для распространенных типов СНЭ. В разделе 3 описывается подход к представлению СНЭ в виде моделей низкого порядка. В разделе 4 представлено описание математической модели СНЭ как обобщенной модели. В разделе 5 рассматривается модель в виде идеального источника постоянного напряжения. В разделах 6–8 рассматриваются модели, построенные на принципе “усреднения” детальных моделей СПН.

1. СПОСОБЫ УПРОЩЕНИЯ МОДЕЛЕЙ СНЭ

Для решения различных задач в ЭЭС с СНЭ разработаны и применяются упрощенные математические модели. Упрощения математических моделей СНЭ выполняются как для самого НЭ, так и для интерфейса НЭ с ЭЭС, т.е. преобразователя постоянного тока и СПН или одновременно для модели НЭ и интерфейса (преобразователя посто-

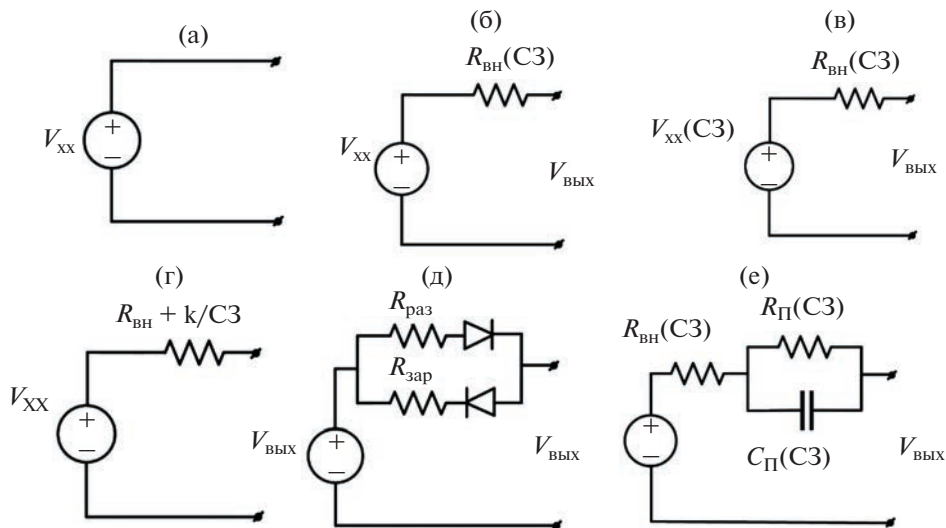


Рис. 1. Упрощенные модели АБ: (а) идеализированная модель АБ; (б) упрощенная модель АБ; (в) упрощенная модель АБ 1-ой модификации; (г) упрощенная модель АБ 2-ой модификации; (д) упрощенная модель АБ 3-ей модификации; (е) модель на основе схемы Тевенина.

янного тока и СПН). На основе этого можно выделить следующие применяемые подходы к упрощению моделей СНЭ:

- а) упрощение непосредственно НЭ;
- б) представление модели СНЭ моделью низкого порядка;
- в) моделирование всей СНЭ в виде обобщенной модели;
- г) моделирование СНЭ в виде источника напряжения (с постоянным напряжением V_{dc}) и детальным воспроизведением СПН;
- д) моделирование СНЭ идеальным источником напряжения [4];
- е) моделирование СНЭ в виде усредненных моделей, в которых преобразователь постоянного тока воспроизводится идеальным источником постоянного тока, а СПН идеальным источником напряжения при детальном или упрощенном представлении НЭ [5];
- ж) моделирование СНЭ в виде усредненной модели зависимого источника [6].

2. УПРОЩЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЭ

2.1. Упрощенные модели АБ

Распространенным подходом является представление АБ в виде идеального источника напряжения или упрощенной модели с учетом внутренних потерь [7, 8]. На рис. 1 представлены распространенные упрощенные модели АБ и их модификации.

В идеализированной модели АБ (рис. 1а) не учитывается состояние заряда и внутренние параметры АБ, модель представляется идеальным источником напряжения, соответственно модель НЭ представляется источником бесконечной мощности $V_{\text{ВЫХ}} = V_{\text{XX}}$. Применяется в задачах, не требующих учета состояния заряда и переходных процессов в АБ.

Для упрощенной модели АБ (рис. 1б) возможно применение двух вариантов конфигурации: с постоянным внутренним сопротивлением, тогда $V_{\text{ВЫХ}} = V_{\text{XX}} - R_{\text{ВН}} i_{\text{бат}}$, и

сопротивлением, зависящим от состояния заряда $V_{\text{вых}} = V_{\text{xx}} - R_{\text{вн}}(C3)i_{\text{бат}}$. При учете состояния заряда может применяться для контроля состояния АБ, а также для моделирования источников бесперебойного питания. Внутреннее сопротивление определяется согласно [9] (1):

$$R_{\text{вн}} = \frac{R_0}{S^K}, \quad (1)$$

$$S = 1 - \frac{Ah}{C_{10}}, \quad (2)$$

где C_{10} – 10-часовая емкость; A – ток разряда; h – время разряда; R_0 – начальное внутреннее сопротивление полностью заряженной батареи; S – состояние, коэффициент заряда (0 – полностью разряженное, 1 – полностью заряженное состояние); K – коэффициент мощности, учитывает изменение емкости батареи при различных скоростях разряда подобно так называемому коэффициенту Пеккерта [10].

В упрощенной модели АБ 1-ой модификации (рис. 1в) применяется зависимый от уровня состояния заряда источник напряжения. Используется для задач выравнивания графиков нагрузки, регулирования частоты. Напряжение на выводах АБ, внутреннее сопротивление и напряжение холостого хода рассчитываются согласно (3)–(5):

$$V_{\text{вых}} = V_{\text{нл}}(C3) - i_{\text{бат}} R_{\text{вн}}(C3), \quad (3)$$

$$V_{\text{нл}} = V_{\text{xx}} - AD, \quad (4)$$

$$R_{\text{вн}} = R_0 - BD, \quad (5)$$

где $V_{\text{вых}} = f(C3)$ – напряжение холостого хода, зависимое от уровня состояния заряда; $i_{\text{бат}}$ – ток батареи; V_{xx} – напряжение холостого хода; $R_{\text{вн}} = f(C3)$ – зависимое внутреннее сопротивление; R_0 – паспортное внутреннее сопротивление; D – состояние разряда; A, B – константы, подбираемые для параметрирования по паспортным характеристикам.

Упрощенная модель АБ 2-ой модификации (рис. 1г) упрощенно воспроизводит нелинейную характеристику зависимости напряжения холостого хода и внутреннего сопротивления. Может применяться для моделирования тяговых систем в задачах выравнивания графиков нагрузки и регулирования частоты. Напряжение на выходе АБ (6):

$$V_{\text{вых}} = V_{\text{xx}} - \left(R_{\text{вн}} + \frac{K}{C3} \right) i_{\text{бат}}, \quad (6)$$

где K – постоянная поляризации.

В упрощенной модели АБ 3-ей модификации (рис. 1д) идеальный источник напряжения подключается через внутренние постоянные зарядное $R_{\text{зар}}$ и разрядное $R_{\text{раз}}$ сопротивления и идеальные диоды. [11]. Применяется при упрощенном представлении в моделировании электротранспорта. Напряжение на выходе АБ при разряде определяется аналогично упрощенной модели АБ.

Модель на основе схемы Тевенина (рис. 1е) является одной из самых распространенных базовых моделей АБ. Может быть представлена идеальным источником напряжения с параметрами $R_{\text{вн}}$, C_{Π} и R_{Π} или с зависимостью обозначенных компонентов схемы от состояния заряда АБ [12, 13]. Схема Тевенина приближает переходные процессы АБ к реальным. Модель относят к средней между детальной и упрощенной,

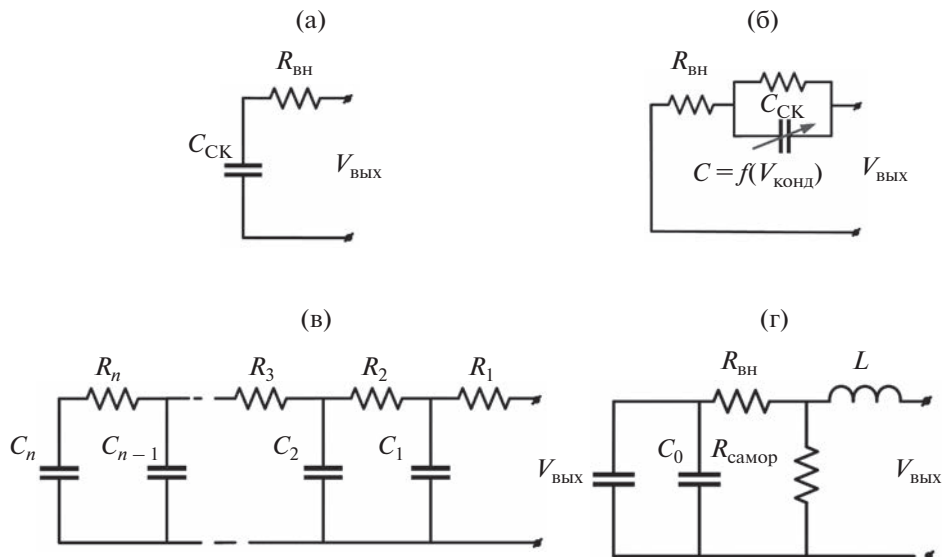


Рис. 2. Упрощенные модели СК: (а) упрощенная модель; (б) классическая модель; (в) модель на основе представления как линии электропередач; (г) модифицированная классическая модель.

что обуславливает ее широкое применение для различных задач исследования НЭ в ЭЭС, в том числе в гибридных СНЭ [14, 15]. Напряжение на выходе, состояние заряда и ток определяются согласно выражениям [17] (7)–(10):

$$V_{\text{ВЫХ}} = N_{\text{бат}} (V_{\text{ХХ}} - i_{\text{бат}} R_{\text{ВН}} - V_{C_{\Pi}}), \quad (7)$$

$$CЗ = CЗ_0 + \frac{1}{3600} \int \frac{i_{\text{бат}}}{C_{\text{яч}}} dt, \quad (8)$$

$$I_{\text{бат}} = \frac{I_{\text{наг}}}{N_{\text{бат}}}, \quad (9)$$

$$\frac{dV_{C_{\Pi}}}{dt} = -\frac{V_{C_{\Pi}}}{C_{\Pi} R_{\Pi}} + \frac{i_{\text{бат}}}{C_{\Pi}}, \quad (10)$$

где $I_{\text{наг}}$ – ток нагрузки АБ; $CЗ_0$ – начальный уровень состояния заряда; $N_{\text{бат}}$ – количество последовательных и параллельных ячеек АБ; $V_{C_{\Pi}}$ – переходное напряжение поляризации; $C_{\text{яч}}$ – емкость ячейки.

Помимо представленных упрощенных моделей АБ и их модификаций встречаются разнообразные прочие узкоспециализированные математические модели, не получившие широкого распространения. Их описание представлено в [7, 9, 11, 17].

2.2. Упрощенные модели СК

Для упрощенного представления СК распространение получили модели, представленные на рис. 2.

Упрощенная модель (рис. 2а) представлена идеальным конденсатором и последовательно соединенным сопротивлением, воспроизводящим омические потери. Применяет-

ся для прогнозирования рабочих характеристик НЭ, когда не требуется учет процесса саморазряда [2]. Напряжение на выходе СК в рабочем режиме определяется [18] (11):

$$V_{\text{вых}} = V_{\text{конд}} - I_{\text{наг}} R_{\text{вн}} = V_0 - I_{\text{наг}} R_{\text{вн}} - \frac{1}{C_{\text{конд}}} \int_0^t I_{\text{наг}} dt, \quad (11)$$

где $C_{\text{конд}}$ — емкость конденсатора двойного слоя; $I_{\text{наг}}$ — ток нагрузки; $R_{\text{вн}}$ — внутреннее сопротивление СК; $V_{\text{конд}}$ — напряжение на $C_{\text{конд}}$; V_0 — максимальное напряжение заряженного СК.

Модель первого порядка или классическая модель (рис. 2б) построена на основе упрощенной модели и может быть представлена идеальной емкостью или емкостью, зависимой от прикладываемого напряжения, при этом для воспроизведения эффекта саморазряда параллельно емкости включается сопротивление $R_{\text{самор}}$, а сопротивление $R_{\text{вн}}$ воспроизводит внутренний нагрев СК при заряде-разряде [18, 19]. Определение параметров модели опытным путем показано в [20]. Модель применяется также для прогнозирования рабочих характеристик НЭ в условиях, не требующих высокую точность воспроизведения переходных процессов в СК. Модель хорошо коррелирует с экспериментальными исследованиями при медленных процессах разряда [21–26]. Напряжение на выходе СК с зависимой емкостью определяется [27–29] (12):

$$V_{\text{вых}} = V_{\text{конд}} - I_{\text{наг}} R_{\text{вн}} = V_0 - I_{\text{наг}} R_{\text{вн}} - \frac{1}{R_{\text{самор}} (C_0 + C_V)} \int_0^t I_{\text{наг}} dt, \quad (12)$$

где $C_V = kV_{\text{конд}}$ — емкость, зависящая от напряжения; C_0 — постоянная емкость СК; k — коэффициент, определяемый экспериментальным способом.

Модель на основе представления как линии электропередачи (рис. 2в) учитывает распределения емкости и сопротивления СК в электролите [29]. Количество RC -цепей определяет точность и, соответственно, сложность модели. Каждая RC -цепь воспроизводит электродинамическое поведение емкости и сопротивления СК в слоях электродов, тем самым приближая реальный процесс постепенного проникновения зарядов в электроды [30]. Несмотря на относительную простоту построения модели, подбор параметров является сложной задачей, учитывая большое количество элементов схемы замещения. Таким образом, применение модели возможно лишь при понимании внутренних характеристик СК и в задачах, не требующих понимания изменения емкости при изменении напряжения и температуры. Напряжение на выходе СК можно определить согласно (13):

$$V_{\text{вых}} = \sum (V_{\text{конд } i} - I_{\text{наг}} R_{\text{вн } i}) = V_{0i} - I_{\text{наг}} R_{\text{вн } i} - \frac{1}{C_i} \int_0^t I_{\text{наг}} dt, \quad (13)$$

где R_i , C_i — емкость и сопротивление i -го слоя.

В модифицированной классической модели (рис. 2г) L воспроизводит индуктивность выводов конденсатора и параллельных токовых контуров. Полная емкость $C_{\text{яч}}$ рассчитывается аналогично классической модели. Модель применяют для исследования различных режимов работы СК в ЭЭС. Однако не всегда доступной является информация об индуктивности в СК, а моделирование зависимой емкости от напряже-

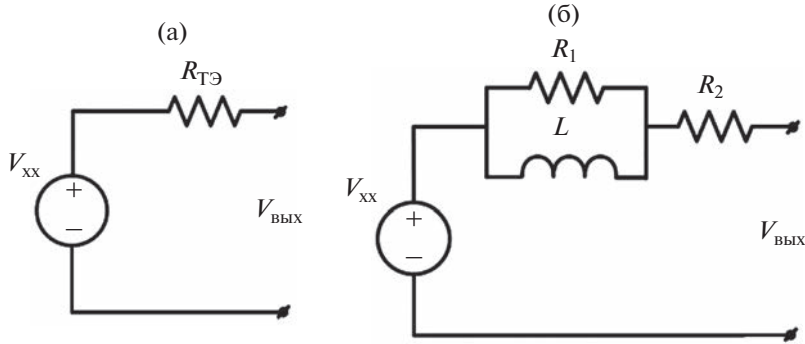


Рис. 3. Упрощенные модели ТЭ: (а) Эквивалентная модель Тевенина; (б) эквивалентная модель с RL -цепью.

ния требует определения параметров экспериментальным путем. Напряжение на выходе СК можно найти согласно (14):

$$V_{\text{ВЫХ}} = V_{\text{конд}} - I_{\text{наг}} \frac{R_{\text{вн}} R_{\text{самор}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{самор}}} - L \frac{dI_{\text{наг}}}{dt} = V_0 - I_{\text{наг}} \frac{R_{\text{вн}} R_{\text{самор}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{самор}}} - \frac{R_{\text{самор}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{самор}} (C_0 + C)} \int_0^t I_{\text{наг}} dt - L \frac{dI_{\text{наг}}}{dt}. \quad (14)$$

Встречаются разнообразные математические модели СК. Структуры их схем и описание представлены в [28, 31, 32].

2.3. Упрощенные модели ТЭ

На рис. 3 представлены упрощенные модели ТЭ наиболее часто встречающиеся в литературе.

Эквивалентная модель Тевенина (рис. 3а) является простейшей моделью ТЭ, которая не учитывает электрические и тепловые переходные процессы. Также не учитывается зависимость от влаги и давления. С учетом упрощений модель может применяться в задачах, не требующих учета изменения внутренних параметров от различных внешних факторов. Однако исследования показывают, что при динамическом моделировании ТЭ результаты хорошо коррелируют с экспериментальными данными в простой модели ЭЭС [33]. Напряжение с учетом омических потерь на выводах ТЭ может быть определено согласно (15):

$$V_{\text{ВЫХ}} = V_{\text{XX}} - R_{\text{вн}} i_{\text{наг}}, \quad (15)$$

где V_{XX} — теоретическое значение напряжения холостого хода ТЭ; $R_{\text{вн}}$ — сопротивление движению электронов и протонов; $i_{\text{наг}}$ — ток нагрузки ТЭ.

Эквивалентная модель с RL -цепью (рис. 3б) воспроизводит основные процессы ТЭ и была предложена как упрощение модифицированной модели Лармина [34]. Модель достаточно хорошо аппроксимирует статическое и динамическое поведение ТЭ, более проста в реализации и требует меньших вычислительных ресурсов в сравнении с детальными моделями. Таким образом может применяться в различных за-

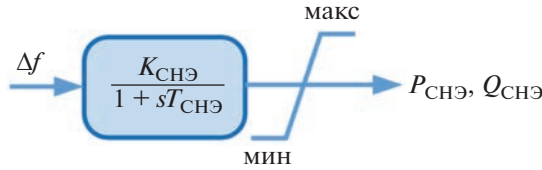


Рис. 4. Модель НЭ в виде апериодического звена первого порядка: $T_{CHЭ}$ – постоянная времени НЭ; $K_{CHЭ}$ – коэффициент усиления; $Q_{CHЭ}$ и $P_{CHЭ}$ – активная и реактивная выходная мощность НЭ.

дачах моделирования ТЭ в ЭЭС. Напряжение топливного элемента определяется в соответствии (16)–(18):

$$V_{\text{вых}} = V_{\text{хх}} - R_2 I_{\text{наг}} - R_1 (I_{\text{наг}} - I_L), \quad (16)$$

$$L \frac{dI_L}{dt} = R_1 (I_{\text{наг}} - I_L), \quad (17)$$

$$L \frac{dI_L}{dt} + R_1 I_L = R_1 I_{\text{наг}}, \quad (18)$$

где $V_{\text{хх}}$ – напряжение холостого хода ТЭ, определяемое в соответствии с уравнением Нернста, как было показано для детальной модели; R_1 , R_2 – сопротивление движению электронов и протонов.

Рассмотренные упрощения для моделей АБ, СК и ТЭ построены на принципе упрощения детальных моделей и применения идеальных источников напряжения. Ввиду того, что детальная модель СПИН строится по принципу электрических схем со сосредоточенными параметрами, ее упрощение, например, может быть реализовано по аналогии с рассмотренными моделями АБ, СК и ТЭ до идеального источника тока или моделью с одним эквивалентным контуром, напряжение и ток в которых будет определяться аналогично представленной для детальной модели выражениями.

Упрощение модели МН сводится к упрощению математической модели электрической машины, что является известным подходом, представленным в [35].

3. МОДЕЛИ СНЭ НИЗКОГО ПОРЯДКА

Представление СНЭ моделями низкого порядка в виде апериодических звеньев применяется в основном при исследованиях участия СНЭ в регулировании частоты в ЭЭС и поддержании напряжения в узлах [36]. В общем виде модель любого НЭ может быть представлена как показано на рис. 4.

Варьируя постоянной времени, воспроизводятся модели первичных источников и СПН в зависимости от типа НЭ и применяемого интерфейса связи, в частности, цепи постоянного тока или преобразователя постоянного тока. При необходимости такие модели могут быть дополнены контурами управления первичного регулирования частоты и обеспечения виртуальной инерции [37]. Также распространенным является применение моделей более высокого порядка, например, в работе [38] представлен обзор некоторых моделей СНЭ в виде апериодических звеньев для исследования частотного отклика в ЭЭС.

При моделировании СНЭ моделями в виде апериодических звеньев следует принимать во внимание невозможность учета процессов в НЭ и динамики преобразователя

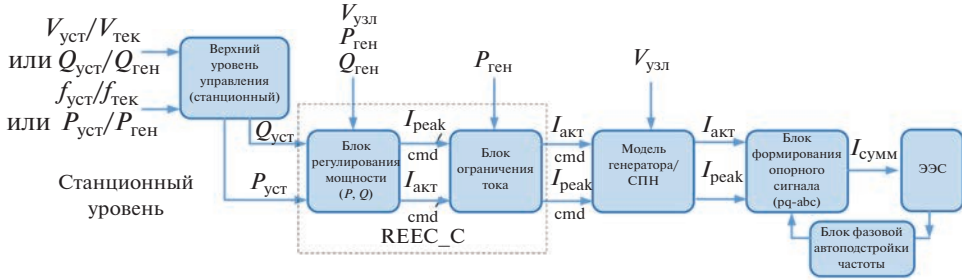


Рис. 5. Блок-схема обобщенной модели АБ с дополнительным управлением станционного уровня [40].



Рис. 6. Контур заряда-разряда в обобщенной модели АБ.

постоянного тока и СПН. Такие модели могут применяться в простых динамических исследованиях ЭЭС благодаря простым характеристикам управления, аналогично компенсирующим устройствам.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВСЕЙ СНЭ В ВИДЕ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ

В средствах моделирования ЭЭС, построенных на принципе воспроизведения прямой последовательности, доминирующим подходом является представление СНЭ обобщенной моделью. Такие модели могут быть доступны в стандартных библиотеках и не привязаны к конкретной модели производителя НЭ. Известной является обобщенная модель АБ, которая применяется для исследования устойчивости ЭЭС с СНЭ и доступна в GE PSLFTM, Siemens PTI PSS[®] [39]. Модель представлена блочной структурой и разработана на основе существующих моделей ветроэнергетических установок (ВЭУ) 4 типа и солнечных панелей (рис. 5).

В блоке REEC_C реализована дополнительная часть, которая упрощенно воспроизводит процессы заряда и разряда АБ (рис. 6).

Изменение уровня состояния заряда моделируется разницей между начальным уровнем и текущей мощностью, вырабатываемой АБ (19).

$$\Delta C3 = \frac{P_{\text{ген}}(t_0)\Delta t}{P_{\text{уст}}T_{\text{ном}}}, \quad (19)$$

где $P_{\text{ген}}$ – мгновенная мощность АБ; Δt – шаг интервала моделирования; $P_{\text{уст}}$ – установленная мощность АБ; $T_{\text{ном}}$ – номинальное время заряда или разряда.

Управление активной и реактивной мощностью реализовано аналогично разработанным стратегиям управления обобщенной модели ВЭУ 4 типа и солнечных панелей

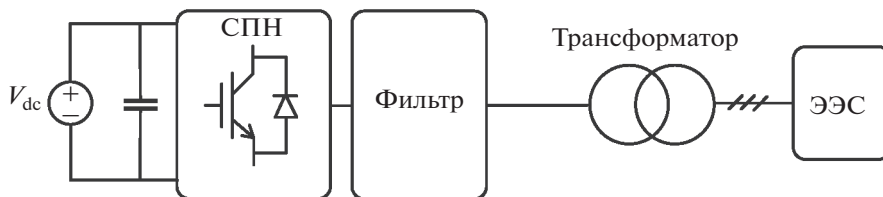


Рис. 7. Моделирование СНЭ с постоянным напряжением V_{dc} и детальным воспроизведением СПН.

[41–43]. Более детальное описание всех используемых ограничений, связанных с применением обобщенных моделей, представлено в [44]. Кроме общих недостатков обобщенных моделей следует учитывать, что для моделей СНЭ упрощения заключаются в пренебрежении переходных процессов в преобразователе постоянного тока и в самом НЭ.

Согласно отчетам NERC и проектам WECC REMTF и IEC TC88 WG2 обобщенные модели используются для анализа устойчивости энергосистем. Проведенные исследования в [45] показывают хорошую корреляцию результатов обобщенной модели АБ в сравнении с детальной моделью СНЭ, аналогичные результаты в опытах поддержки напряжения в узлах ЭЭС. Однако отмечено, что при изменении нагрузки в сети модель имеет отличный от детальной модели отклик ввиду отсутствия в системе управления дополнительного контура вторичного регулирования частоты, а также упрощенная модель хуже демпфирует колебания.

Частным случаем реализации обобщенной модели является доработка, представленная в [46]. Авторы предлагают учитывать динамику ЦПТ для анализа устойчивости по напряжению и углу, реализованную на основе систем линейных дифференциально-алгебраических уравнений. Результаты моделирования показывают, что предложенная модель способна точно воспроизводить динамический отклик, сравнимый с детальной моделью при больших возмущениях. Однако поскольку предложенная модель была реализована для средств моделирования прямой последовательности, и СПН представлен источником напряжения, ей присущи ограничения, описанные рабочей группой WECC.

Следует отметить, что по аналогии с моделью АБ можно реализовать обобщенную модель СК, ТЭ и СПИН, учитывая их зарядные и разрядные характеристики. Кроме того, применяя аналогичный подход в построении самой модели НЭ, последние могут быть реализованы в других средствах моделирования.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЭ ПОСТОЯННЫМ НАПЯЖЕНИЕМ И ДЕТАЛЬНЫМ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕМ СПН

Одним из подходов в моделировании СНЭ является воспроизведение их идеальным источником напряжения V_{dc} и детальным представлением преобразователя со стороны сети (рис. 7).

В данной модели НЭ воспроизводится постоянным напряжением в соответствии с выходными паспортными характеристиками конкретного НЭ. Модель игнорирует процессы в НЭ и преобразователе постоянного тока, а также их системах автоматического управления. Соответственно область их применения в основном ограничена исследованием работы преобразователя со стороны сети и оценкой его влияния на функционирование ЭЭС и наоборот, а также различных стратегий систем управления

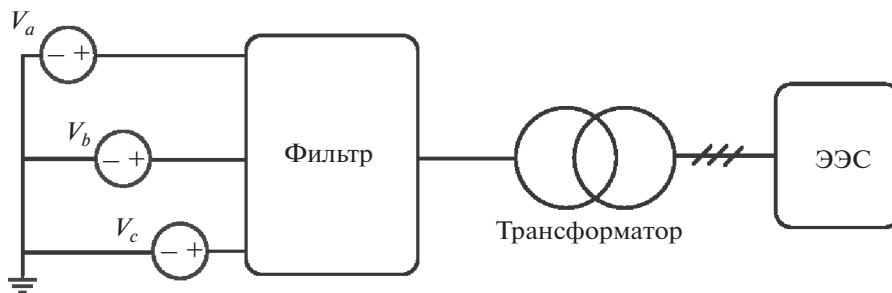


Рис. 8. Представление всей СНЭ в виде “усредненной” модели.

СПН, как было обозначено в первой части данной обзорной статьи. Моделирование СНЭ с постоянным напряжением V_{dc} и детальным воспроизведением СПН применяются для возможного исследования участия СНЭ в регулировании напряжения в ЭЭС без учета состояния заряда, процессов саморазряда и т.д. [47]. Как отмечается в [6], модель в виде идеального источника постоянного напряжения в сравнении с детальной моделью СНЭ демонстрируют приемлемые результаты в нормальных режимах работы ЭЭС. Упрощение преобразователя постоянного тока оказывает влияние лишь на коэффициент нелинейных искажений. Однако в предельных режимах работы СНЭ в ЭЭС результаты с моделью в виде идеального источника постоянного напряжения кардинально отличаются от результатов с детальной моделью.

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЭ В ВИДЕ УСРЕДНЕННОЙ МОДЕЛИ

Еще одним известным подходом к упрощению моделей СНЭ является применение так называемых динамических моделей среднего значения, которые согласно теории усреднения аппроксимируют исходную систему путем пренебрежения или “усреднения” эффекта быстрого переключения в пределах типового интервала переключения [48]. Мгновенные значения токов или напряжений заменяются средними значениями за интервал коммутации [49] (20):

$$\bar{f} = \frac{1}{T_s} \int_{t-T_s}^t f(t) dt, \quad (20)$$

где $f(t)$ — функция напряжения $v(t)$ или тока $i(t)$; T_s — интервал переключения.

В электроэнергетике усреднение в основном применяется при моделировании электромагнитных переходных процессов с целью сокращения расчетного времени и возможности моделирования большого количества СПН в ЭЭС. На рис. 8 изображена модель, которой можно представить СНЭ.

В данной модели весь интерфейс связи НЭ с ЭЭС заменяется идеальными источниками переменного напряжения, которые воспроизводят усредненную динамику плечей СПН со стороны сети в течение интервала переключения. Усреднение модели может быть реализовано по методу прямого усреднения (averaged-switch modeling) или методом по пространству состояний (state-space averaging method) [50]. “Усредненная” модель соответственно игнорирует все коммутационные процессы и процессы в НЭ. Система управления исключает управление широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), но стратегия управления СНЭ сохраняется. Данные модели наряду с обоб-

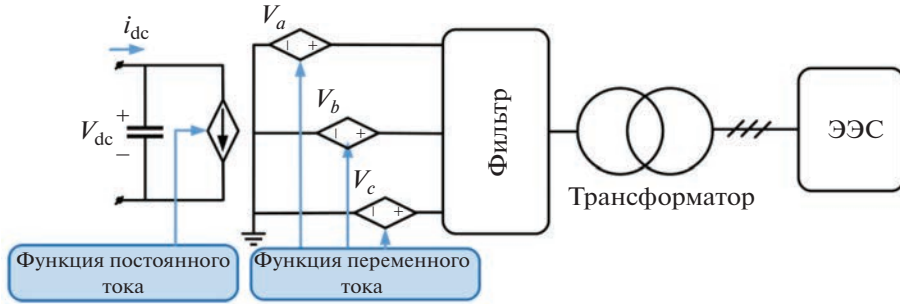


Рис. 9. Моделирование СНЭ с “усредненной” моделью СПН.

щенной моделью СНЭ и моделью в виде идеального источника постоянного напряжения могут применяться в любых исследованиях. Однако следует учитывать, что адекватность воспроизведения тех или иных процессов будет подвергаться сомнению, учитывая игнорирование коммутационных процессов, процессов в преобразователе постоянного тока, процессов в НЭ, уровня состояния заряда НЭ и т.д.

7. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ СНЭ В ВИДЕ УСРЕДНЕННОЙ МОДЕЛИ

Математическая модель СНЭ может быть представлена в виде комбинированной усредненной модели, которая широко применяется для моделирования преобразователя со стороны сети [51]. Такая модель состоит из трехфазного регулируемого источника напряжения, подключенного к стороне переменного тока, одного управляемого источника постоянного тока и конденсатора в цепи постоянного тока (рис. 9).

Аналогично представленной выше информации в данной модели упрощение, связанное с воспроизведением коммутационных процессов, может быть реализовано по двум подходам: векторный в осях $dq0$ и основанный на функциях переключения [51].

Для векторного подхода напряжения СПН и ток I_{dc} на стороне постоянного тока определяются в соответствии с выражениями (21)–(24):

$$\bar{f} = \frac{1}{T_s} \int_{t-T_s}^t f(t) dt, \quad (21)$$

$$v_j = \frac{1}{2} V_{dc} m_j, \quad j = a, b, c, \quad (22)$$

$$v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = V_{dc} I_{dc}, \quad (23)$$

$$I_{dc} = \frac{1}{2} (m_a i_a + m_b i_b + m_c i_c), \quad (24)$$

где m_j — соответствует функции модуляции и получена путем преобразования координат $dq0-abc$ опорного напряжения V_C .

Для системы отсчета $dq0$ (25):

$$I_{dc} = \frac{3}{2V_{dc}} (V_d I_d + V_q I_q). \quad (25)$$

Также следует учитывать потери в преобразователях, которые зависят от топологии СПН и частоты коммутации и определяются как функция потерь тока [5] (26):

$$I_{\text{потерь}} = \frac{P_{\text{потерь}}}{V_{\text{dc}}} = R \frac{I_{\text{с}}^2}{V_{\text{dc}}}, \quad (26)$$

где R – эквивалентное сопротивление, учитывающее резистивные потери и потери на переключение; $I_{\text{с}}$ – эквивалентный ток I_{dc} , включающий потери преобразователя.

В соответствии с этим уточненный ток ЦПТ, включающий потери преобразователя, $I_{\text{dc}} = I_{\text{с}} - I_{\text{потерь}}$. Модели, в которых усреднение основано на функциях переключения, содержат высокочастотные гармонические напряжения и токи СПН, тем самым воспроизводят упрощенно работу ШИМ. Например, для трехуровневого преобразователя коммутационные функции напряжения рассчитываются согласно [5, 51] (27):

$$v_{3j} = \frac{V_{\text{dc}}}{2} SF_{3j}, \quad SF_{3j} = SP_{u3j,1} SP_{u3j,2} - SP_{u3j,1} SP_{u3j,2}, \quad (27)$$

где SF_{3j} – функция переключения j -ой фазы; $SP_{u3j,1}$ и $SP_{u3j,2}$ – верхние импульсы переключения для двух верхних IGBT; $SP_{l3j,1}$, $SP_{l3j,2}$ – нижние импульсы переключения.

Функция постоянного тока задается следующим образом (28):

$$I_{3\text{dc}} = \sum_{j=a,b,c} i_{3j} (SP_{u3j,1} SP_{u3j,2}). \quad (28)$$

Усредненные модели с функцией коммутации более точны, поскольку воспроизводят динамику близкую к реальным процессам в преобразователе. Такие модели могут применяться для исследования широкого круга задач, в том числе для оценки параметров качества электроэнергии в ЭЭС с СНЭ, анализа гармонического состава и проектирования фильтров. Следует учитывать, что основным ограничением усредненных моделей является невозможность моделирования переходных процессов на стороне постоянного тока, например, замыкания между полюсами или полюсами и землей. Кроме этого, не могут быть воспроизведены внутренние замыкания или неисправности преобразователя. Таким образом, наряду с моделью в виде идеального источника постоянного напряжения, усредненной моделью, комбинированные усредненные модели не воспроизводят процессы в НЭ, соответственно учесть динамику НЭ в зависимости от изменяющегося уровня состояния заряда становится невозможным. Данный факт для широкого круга задач является важным. Например, в [52] отмечается, что для АБ при низком уровне состояния заряда или высокой изношенности напряжение на клеммах уменьшается, а ток становится высоким, что при аварийных режимах может приводить к насыщению переменных в системе управления и соответственно нарушению устойчивой работы СНЭ. Следовательно, вне зависимости от детальности усредненной модели, игнорирование процессов в НЭ и преобразователе постоянного тока может привести к неадекватным результатам моделирования при моделировании аварийных и предельных режимов работы СНЭ в ЭЭС.

8. МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЭ В ВИДЕ УСРЕДНЕННОЙ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОГО ИСТОЧНИКА

Усредненная модель зависимого источника разработана с целью воспроизведения процессов в преобразователе постоянного тока и более приближенном воспроизведении работы двухуровневого СПН со стороны сети [6]. В данной модели предложено силовые ключи заменить управляемыми источниками напряжения и тока, как показано на рис. 10.

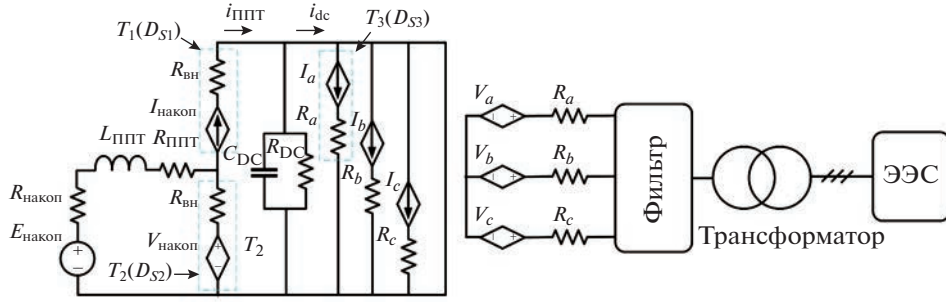


Рис. 10. Моделирование СНЭ в виде усредненной модели зависимого источника.

Таким образом, модель учитывает процессы в преобразователе постоянного тока (ППТ), реализованном простой топологией и работу его системы управления. Авторы также предлагают два варианта построения модели: обычное усреднение и основанное на функциях переключения.

Для модели, основанной на функциях переключения, токи и напряжения рассчитываются для каждого состояния коммутации силовых ключей. Например, в ППТ при выключенном ключе T_2 и включенном ключе T_1 $V_{d1n} = V_{dc}$ и ток через ключ 1 равен току через преобразователь постоянного тока $I_{ППТ}$, а $V_{накоп}$ и I_b определяются в соответствии (29):

$$\begin{cases} V_{d1n} = V_{накоп} = D_{S1}V_{dc}, \\ I_b = D_{S1}I_{ППТ}, \end{cases} \quad (29)$$

где D_{S1} – рабочий цикл силового ключа T_1 .

Для СПН при включенном ключе T_3 , и выключенном ключе T_4 $V_{an} = V_{dc}$, а ток через ключ T_3 равен току фазы A со стороны сети $I_{ЭЭСa}$. Тогда V_a и I_a могут быть определены следующим образом (30):

$$\begin{aligned} V_{an} &= D_{S3}V_{dc}, \\ I_a &= D_{S3}I_{ЭЭСa}, \end{aligned} \quad (30)$$

где D_{S3} – рабочий цикл силового ключа 3; $I_{ЭЭСa}$ – ток фазы A со стороны сети.

Аналогично выводятся уравнения для двух других плечей СПН. Для более приближенного расчета учитывается $R_{ВН}$ – внутренние сопротивления ключей.

Для усредненной модели зависимого источника аналогично векторному подходу в осях $dq0$ используется метод усреднения по основной составляющей частоты. В соответствии с этим уравнения токов и напряжений для фазы a выводятся согласно (31):

$$\begin{cases} V_a = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}m_a\right)V_{dc} - \frac{\frac{3}{2} + \frac{1}{2}(m_a + m_b + m_c)}{3}V_{dc} = \frac{1}{2}m_aV_{dc}, \\ I_a = \frac{1}{2}m_aI_{ЭЭСa}, \end{cases} \quad (31)$$

где m_a – функция коммутации фазы a .

По аналогии выводятся уравнения для управляемых источников напряжения и тока других фаз.

9. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СРАВНЕНИЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ ДЕТАЛЬНЫХ И УПРОЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

Как было отмечено ранее, применение детальных моделей для ряда исследований не всегда целесообразно. Это обосновывает возможность применения ряда упрощений при моделировании отдельных интересующих процессов. В частности, для математических моделей НЭ распространенным является уменьшение порядка эквивалентных цепей или их полная идеализация. При упрощении обычно не исследуют детальное воспроизведение процессов в НЭ, а задачи моделирования ограничиваются анализом динамического отклика комплексной модели НЭ в аварийных режимах [14, 15]. Также распространенным является игнорирование зависимости параметров НЭ от СЗ. Однако в [45] показано, что модели, игнорирующие зависимость параметров от СЗ (сравниваются в том числе АБ в разряженном состоянии) в опытах поддержания напряжения в узлах присоединения, демонстрируют большую достоверность воспроизведения процессов в сравнении с моделями, учитывающими зависимость от СЗ (рис. 11а). Поскольку возможности поддержания напряжения определяются управлением СПН и зарядом конденсатора ЦПТ. В опытах поддержания частоты и аварийных режимах игнорирование зависимости параметров от СЗ может приводить к существенным различиям (рис. 11б и 11в).

Полная модель включает в себя АБ, преобразователь постоянного тока, СПН и фильтр. Упрощенная модель представляется источником неизменного напряжения (V_{DC}), СПН и фильтром. Обобщенная — это параметризуемая динамическая модель СНЭ для исследований переходных процессов [39]. Ухудшенная модель соответствует полной модели, но со сниженным внутренним сопротивлением АБ.

В большинстве работ, связанных с исследованиями работы СНЭ в ЭЭС, применяются упрощенные модели для всей системы. Например, СНЭ представляют в виде апериодических звеньев, обобщенными моделями, моделями с неизменным постоянным напряжением и детальной моделью СПН или усредненными моделями. При применении указанных моделей следует учитывать, что исследование влияния пульсаций и потерь от переключения силовых ключей на состояние АБ, СК, ТЭ или СПИН и их зарядно-разрядные характеристики не представляется возможным [8]. В частности, эти процессы являются важными при моделировании чувствительных к высокочастотным колебаниям ТЭ водородных накопителей [53, 54]. При упрощениях интерфейса НЭ с ЭЭС или игнорировании, например, динамики ЦПТ, результаты моделирования вовсе могут быть не достоверными. В предельных режимах работы СНЭ могут возникнуть незатухающие высокочастотные колебания. Исследования, проведенные в [6, 52], показывают, что в нормальных режимах работы упрощение преобразователя постоянного тока или СПН оказывает влияние на коэффициент нелинейных искажений (рис. 12). Однако в аварийных и предельных режимах работы ЭЭС игнорирование динамики преобразователя постоянного тока кардинально влияет на устойчивость ЭЭС (рис. 13).

В статье [6] доказали, что пульсации напряжения в ЦПТ приводят к нарушению устойчивости при детальном моделировании преобразователя постоянного тока, в то время как упрощенные модели не позволяют воспроизвести соответствующие пульсации. Аналогичные результаты получены для модели АБ, работающей в режиме поддержания мощности и предельного режима работы в ЭЭС (рис. 14). Результаты исследований можно распространить на все типы СНЭ, подключаемые к ЭЭС через преобразователь постоянного тока и СПН.

Таким образом, упрощения, описанные в разделе, показывают, что игнорирование тех или иных составляющих математических моделей может привести к недостовер-

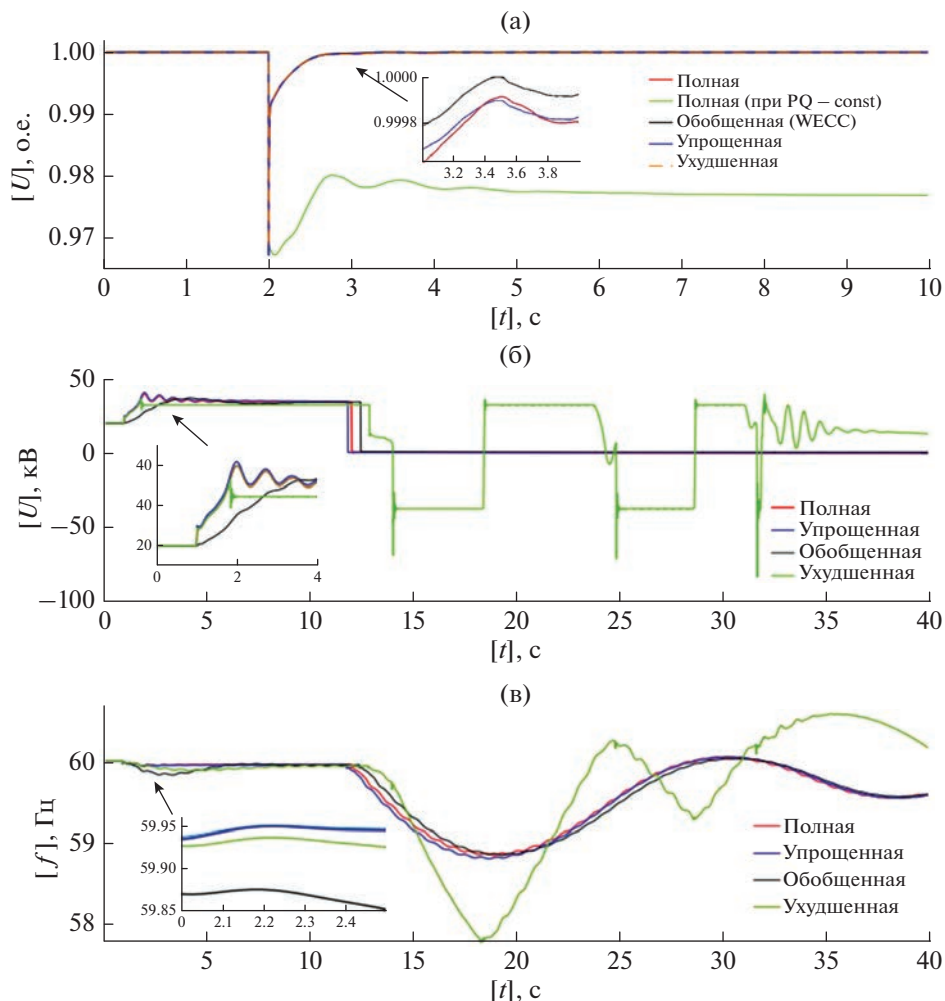


Рис. 11. Осциллограммы переходных процессов сравнения модели АБ различной детализации [45]: (а) регулирование напряжения; (б) увеличение нагрузки на 20%; (в) функции демпфирования колебаний мощности и регулирования напряжения.

ным результатам моделирования при исследовании определенного спектра переходных процессов в ЭЭС с СНЭ.

10. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РЕШЕНИЯ

С развитием технологий и устройств накопления энергии растет количество исследований, направленных на анализ режимов их работы в ЭЭС, преимущественно путем математического моделирования. Обзор исследований показывает, что при моделировании важным является воспроизведение процессов в самом накопителе, учет изменения параметров от СЗ, воспроизведение динамики ЦПТ, а также детальное моделирование коммутационных процессов [6, 45, 52, 55, 56]. Соответственно крайне важ-

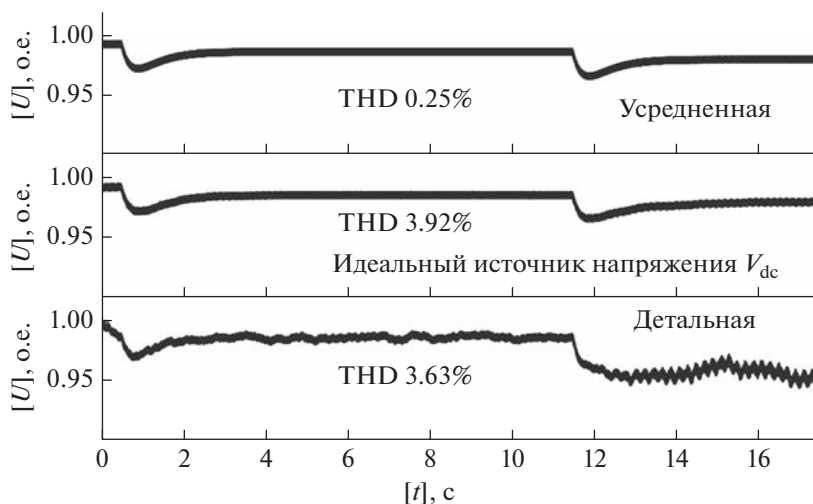


Рис. 12. Осциллограммы фазного среднеквадратичного значения мгновенного напряжения в точке подключения СНЭ [6].

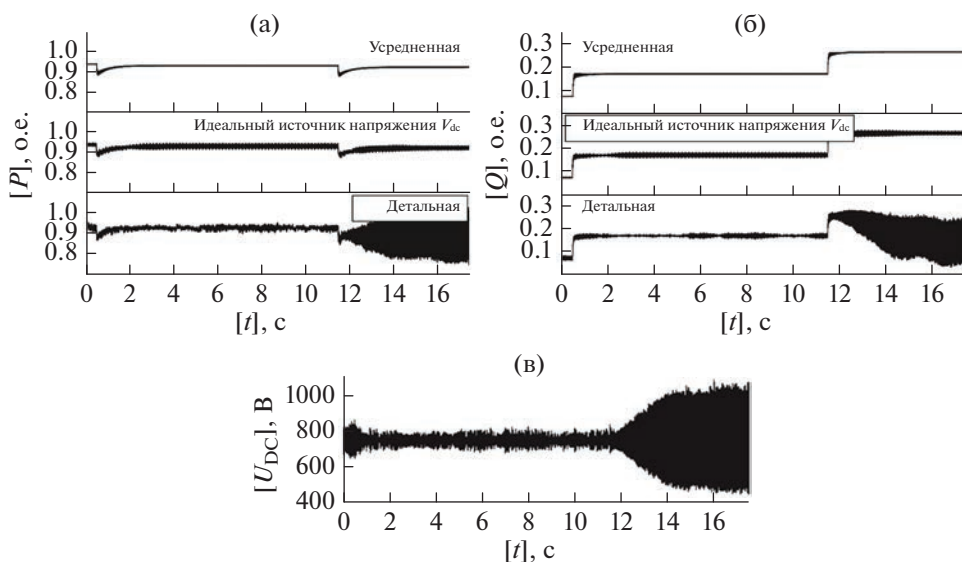


Рис. 13. Осциллограммы переходного процесса при увеличении нагрузки в ЭЭС с СНЭ с шагом 100 кВар в $t = 0.5$ с и $t = 11.5$ с [6]: (а) активная мощность; (б) реактивная мощность; (в) напряжение цепи постоянного тока.

но применять надежные и эффективные методы моделирования СНЭ, с помощью которых можно исследовать режимы работы СНЭ в ЭЭС. Несмотря на высокий уровень разработок, значительный обзор литературы показал, что существует ряд проблем, связанных с детальным моделированием СНЭ в ЭЭС, требующих отдельного внимания.

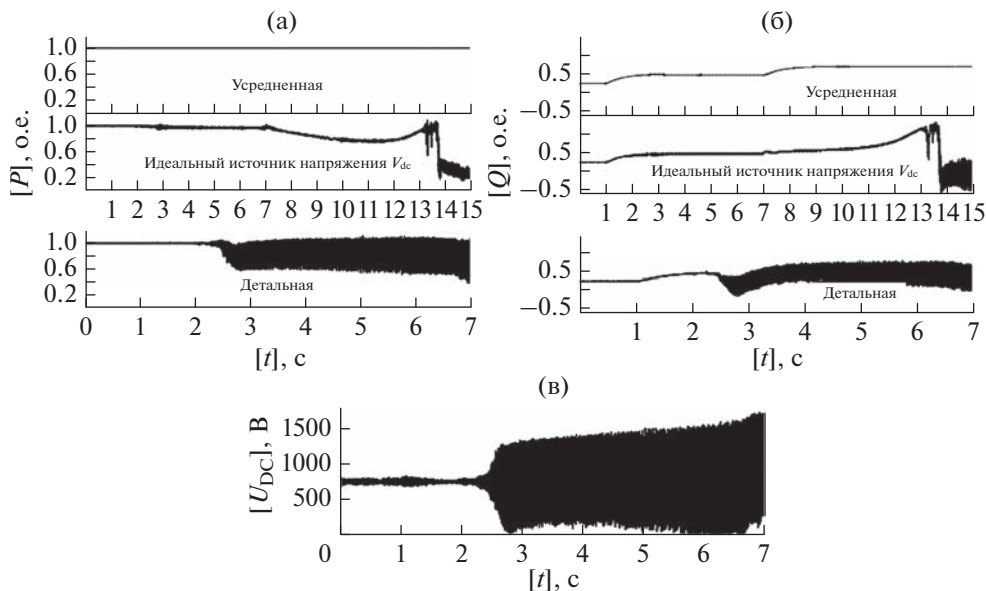


Рис. 14. Осциллограммы переходного процесса при увеличении реактивной мощности нагрузки и отключении одного из энергоблоков для полной модели [6]: (а) активная мощность; (б) реактивная мощность; (в) напряжение цепи постоянного тока.

10.1. Детальное моделирование силовых преобразователей

Как уже было отмечено, существенной проблемой цифрового моделирования является моделирование силовых полупроводниковых ключей СПН. В большинстве случаев модели силовых ключей представляются проводимостью, величина которой определяется состоянием ключа. Такое представление для силового ключа является сильно упрощенным, т.к. отсутствует возможность определить потери на переключение ключа и возникающие при этом перенапряжения. Также процессы в полупроводниковых ключах нельзя рассматривать как линейные процессы. Кроме этого, детальные модели силовых ключей в средствах моделирования электромагнитных переходных процессов используют значительное количество вычислительных ресурсов. В связи с этим для сокращения расчетного времени моделирования, как было отмечено, применяются усредненные модели СПН [4, 5, 48]. Однако в [6] доказано, что такой подход в предельных для СНЭ режимах работы не позволяет должным образом воспроизвести переходные процессы в СНЭ. Также одним из решений проблемы надежного моделирования СПН в [6] было впервые предложено описание в виде усредненной модели зависимого источника, близкая к детальной и затрачивающая меньше вычислительных ресурсов. С целью максимально достоверного воспроизведения коммутационных процессов возможно использовать модельное физическое моделирование. Модели преобразователя постоянного тока и СПН предполагается реализовать в виде физических моделей на базе цифруправляемых аналоговых ключей [57]. Такой подход, основанный на концепции гибридного моделирования ЭЭС, позволяет исключить обозначенные проблемы детального воспроизведения коммутаций силовых ключей [58].

10.2. Детальное моделирование НЭ

Несмотря на разнообразие математических моделей НЭ различной детальности [2, 59–62], описывающих широкий спектр физических и химических процессов в НЭ, одним из вызовов является возможность их использования в коммерческих программно-вычислительных (ПВК) и программно-аппаратных комплексах (ПАК) моделирования ЭЭС. Ввиду сложности извлечения параметров применение детальных моделей не всегда удается воспроизвести сопоставимую с натурной динамику НЭ [63–65]. Кроме этого, для новых разрабатываемых устройств накопления энергии математическое описание не всегда доступно или в принципе отсутствует в ПВК и ПАК. Тем самым для будущих исследований возможно применять натурные образцы НЭ, интегрируемые в гибридную платформу для исследований их работы в ЭЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье обозначены основные типы СНЭ, которые применяются в составе реальных ЭЭС. Среди них выделены наиболее перспективные СНЭ, подключаемые к ЭЭС через СПН: АБ, СК, СПИН, ТЭ и МН. Представлен обзор различных подходов к упрощению СНЭ. Преимущественно упрощения для математических моделей СНЭ заключаются в сокращении порядка эквивалентных цепей или их полной идеализации как с учетом зависимости от СЗ, так и без нее. Кроме этого, представлены и описаны упрощения СНЭ в целом, которые получили широкое распространение в коммерческих средствах моделирования ЭЭС. В таких моделях упрощения применяются не только для НЭ, но и для математических моделей преобразователя постоянного тока и СПН. Среди них описаны математические модели известных усредненных моделей и принципы их реализации. Также в статье обозначаются возможные варианты применения таких моделей для решения различных задач в ЭЭС и ограничения, связанные с применением таких моделей. Для графической иллюстрации приводятся результаты исследований зарубежных авторов, полученные при сравнении математических моделей СНЭ различной детальности. Представленная обзорная статья в области математического моделирования СНЭ позволяет читателю ознакомиться с различными моделями СНЭ, принципами их реализации, преимуществами и недостатками.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tamilselvi S., Gunasundari S., Karupiah N.* A Review on Battery Modelling Techniques. *Sustainability*, 2021. 13. № 18: 10042. <https://doi.org/10.3390/su131810042>
2. *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*, 2019. V. 85. P. 109–128. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2019.02.006.6>
3. *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>
4. *Jankovic Z., Novakovic B., Bhavaraju V., Nasiri A.* Average modeling of a three-phase inverter for integration in a microgrid, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2014. P. 793–799. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2014.6953477>
5. *Rodriguez J.P.* Dynamic Averaged Models of VSC-Based HVDC Systems for Electromagnetic Transient Programs. PhD Thesis. University of Montreal; 2013.

6. *Farrokhbadi M., König S., Cañizares C.A., Bhattacharya K.* Battery Energy Storage System Models for Microgrid Stability Analysis and Dynamic Simulation, in *IEEE Transactions on Power Systems*, V. 33. № 2. P. 2301–2312. March 2018.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2740163>
7. *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>
8. *Kim Y.-H., Ha H.-D.* Design of interface circuits with electrical battery models, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1997. V. 44. № 1. P. 81–86.
<https://doi.org/10.1109/41.557502>
9. *Dürr M., Cruden A., Gair S.* Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system. *Journal of Power Sources*, 2006. V. 161. Iss. 2. P. 1400–1411.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.12.075>
10. *Cun J.P., Fiorina J.N., Fraise M., Mabboux H.* The experience of a UPS company in advanced battery monitoring, *Proceedings of Intelec'96 – International Telecommunications Energy Conference*, 1996. P. 646–653.
<https://doi.org/10.1109/INTLEC.1996.573404>
11. *Pang S., Farrell J., Du J., Barth M.* Battery state-of-charge estimation, *Proceedings of the 2001 American Control Conference*, (Cat. No.01CH37148), 2001. V. 2. P. 1644–1649.
<https://doi.org/10.1109/ACC.2001.945964>
12. *Chan H.L.* A new battery model for use with battery energy storage systems and electric vehicles power systems, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings* (Cat. No.00CH37077), 2000. V. 1. P. 470–475.
<https://doi.org/10.1109/PESW.2000.850009>
13. *Daowd M., Omar N., Verbrugge B., Van den Bossche P., Van Mierlo J.* Battery Models Parameter Estimation based on Matlab: Simulink.; 2013.
14. *Daowd M., Omar N., Verbrugge B.* Battery models parameters estimation based on Matlab/ Simulink, the 25th world bat. hybrid and FC elec. Veh. Symp. & exh., 2010.
15. *Williamson S., Rimmalapudi S., Emadi A.C.* Electrical modeling of renewable energy sources and energy storage devices. *J Power Electron* 2004. 4 (2).
16. *Zhan C.-J., Wu X.G., Kromlidis S.* Two electrical models of the lead-acid battery used in a dynamic voltage restorer, *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, 2003. 150. (2). P. 175–182.
<https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20030124>
17. *Hegazy O., Barrero R., Mierlo J.V.* An Advanced Power Electronics Interface for Electric Vehicles Applications, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013. V. 28. № 12. P. 5508–5521.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2256469>
18. *Naseri F., Karimi S., Farjah E., Schaltz E.* Supercapacitor management system: A comprehensive review of modeling, estimation, balancing, and protection techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022. V. 155.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111913>
19. *Ban S., Zhang J., Zhang L.* Charging and discharging electrochemical supercapacitors in the presence of both parallel leakage process and electrochemical decomposition of solvent, *Electrochimica Acta*, 2013. V. 90. P. 542–549.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.12.056>
20. *Naseri F., Farjah E., Ghanbari T.* Online Parameter Estimation for Supercapacitor State-of-Energy and State-of-Health Determination in Vehicular Applications, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020. V. 67. № 9. P. 7963–7972.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2941151>
21. *Cahela D.R., Tatarchuk B.J.* Overview of electrochemical double layer capacitors, *Proceedings of the IECON'97 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation* (Cat. No.97CH36066), 1997. V. 3. P. 1068–1073.
<https://doi.org/10.1109/IECON.1997.668430>
22. *Spyker R.L., Nelms R.M.* Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor, in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000. V. 36. № 3. P. 829–836.
<https://doi.org/10.1109/7.869502>
23. *Spyker R.L.* Application of double-layer capacitors in power electronic systems. Ph.D. dissertation. Auburn University, 1997.
24. *Nelms R.M., Cahela D.R., Tatarchuk B.J.* Modeling double-layer capacitor behavior using ladder circuits, in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003. V. 39. № 2. P. 430–438.
<https://doi.org/10.1109/TAES.2003.1207255>

25. 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>
26. Funaki T., Hikihara T. Characterization and Modeling of the Voltage Dependency of Capacitance and Impedance Frequency Characteristics of Packed EDLCs, in IEEE Transactions on Power Electronics, 2008. V. 23. № 3. P. 1518–1525.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2008.921156>
27. Rafik F., Gualous H., Gallay R. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling, Journal of Power Sources, 2007. V. 165. Iss. 2. P. 928–934.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.12.021>
28. Zhang Y., Yang H. Modeling and characterization of supercapacitors for wireless sensor network applications, Journal of Power Sources, 2011. V. 196. Iss. 8. P. 4128–4135.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.152>
29. Qu D., Shi H. Studies of activated carbons used in double-layer capacitors, Journal of Power Sources, 1998. V. 74. Iss. 1. P. 99–107.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(98\)00038-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(98)00038-X)
30. Pean C., Rotenberg B., Simon P. Multi-scale modelling of supercapacitors: From molecular simulations to a transmission line model, Journal of Power Sources, 2016. V. 326. P. 680–685.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.03.095>
31. Jiya I.N., Gurusinghe N., Gows R. Electrical Circuit Modelling of Double Layer Capacitors for Power Electronics and Energy Storage Applications: A Review. Electronics 2018. V. 7. № 11 P. 268.
<https://doi.org/10.3390/electronics7110268>
32. Saha P., Dey S., Khanra M. Modeling and State-of-Charge Estimation of Supercapacitor Considering Leakage Effect, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020. V. 67. № 1. P. 350–357.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2897506>
33. Alvarez V., Garcia A.F., Ramos-Paja C.A., Saavedra-Montes A.J., Arango E.I. Design of a low power system based on fuel cells. Revista EIA. 2012. V. 17. P. 85–103.
34. Belhaj F.Z., El Fadil H., El Idrissi Z. New Equivalent Electrical Model of a Fuel Cell and Comparative Study of Several Existing Models with Experimental Data from the PEMFC Nexa 1200 W Micromachines 2021. V. 12. № 9. P. 1047.
<https://doi.org/10.3390/mi12091047>
35. Kundur P. Power System Stability and Control. McGraw-Hill Professional. 1994.
36. Ise T., Murakami Y., Tsuji K. Simultaneous Active and Reactive Power Control of Superconducting Magnet Energy Storage Using GTO Converter. IEEE Trans. on PWRD 1986. V. 1. № 1. P. 143–150.
37. Mosca C., Arrigo F., Mazza A. Mitigation of frequency stability issues in low inertia power systems using synchronous compensators and battery energy storage systems. IET Gener. Transm. Distrib., 2019. V. 13. P. 3951–3959.
<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.7008>
38. Akram U., Nadarajah M., Shah R., Milano F. A review on rapid responsive energy storage technologies for frequency regulation in modern power systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020. V. 120.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109626>
39. WECC battery storage dynamic modeling guideline, WECC Modeling and Validation Work Group. Salt Lake City. UT. USA. Rep., 2016. P. 1–38.
40. WECC Battery Storage Guideline updates_ Bo 4-5-17 SLT 4-7-17 XX SC
41. WECC Modeling and Validation Working Group, “WECC Type 4 Wind Turbine Generator Model – Phase II” January 23, 2013.
42. WECC Modeling and Validation Working Group, “WECC Solar Plant Dynamic Modeling Guidelines” May 8, 2014.
43. WECC Second Generation Wind Turbine Models, January 23, 2014.
44. Pourbeik P., Sanchez-Gasca J.J., Senthil J., Weber J., Ellis A., Williams S., Seman S., Bolton K., Miller N., Nelson R.J., Nayeibi K., Clark K., Tacke S. and Lu S. Value and Limitations of the Positive Sequence Generic Models of Renewable Energy Systems, WECC Modeling and Validation Working Group.
45. Calero F., Cañizares C.A. and Bhattacharya K. Dynamic Modeling of Battery Energy Storage and Applications in Transmission Systems, in IEEE Transactions on Smart Grid, 2021. V. 12. № 1. P. 589–598.
<https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3016298>
46. Ortega Á., Milano F. Generalized Model of VSC-Based Energy Storage Systems for Transient Stability Analysis, in IEEE Transactions on Power Systems, 2016. V. 31. № 5. P. 3369–3380.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2496217>

47. *Choi J.-W., Sul S.-K.* Inverter output voltage synthesis using novel dead time compensation, in IEEE Transactions on Power Electronics, 1996. V. 11. № 2. P. 221–227.
<https://doi.org/10.1109/63.486169>
48. *Chiniforoosh S. et al.* Definitions and Applications of Dynamic Average Models for Analysis of Power Systems, in IEEE Transactions on Power Delivery, 2010. V. 25. № 4. P. 2655–2669.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2043859>
49. *Sanders S.R., Noworolski J.M., Liu X.Z., Verghese G.C.* Generalized averaging method for power conversion circuits, in IEEE Transactions on Power Electronics, 1991. V. 6. № 2. P. 251–259.
<https://doi.org/10.1109/63.76811>
50. *Sanders S.R., Verghese G.C.* Synthesis of averaged circuit models for switched power converters, in IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1991. V. 38. № 8. P. 905–915.
<https://doi.org/10.1109/31.85632>
51. *Peralta J., Saad H., Dennetière S., Mahseredjian J.* Dynamic performance of average-value models for multi-terminal VSC-HVDC systems, IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012. P. 1–8.
<https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6345610>
52. *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>
53. *Rajashekara K.* Propulsion System Strategies for Fuel Cell Vehicles, Tech. Rep., Energenix Ctr., Delphi Automotive Syst., 2000.
54. Fuel Cell Control, Ltd., Tech. Rep., DC–DC Converter Module 2006 [Online]. Available: <http://www.fuelcellcontrol.com/dcconverter.html> [accessed 12 March 2022].
55. *Chen M., Rincon-Mora G.A.* Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I–V performance, in IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006. V. 21. № 2. P. 504–511.
<https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874229>
56. *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>
57. *Andreev M. et al.* A Hybrid Model of Type-4 Wind Turbine – Concept and Implementation for Power System Simulation. 2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), 2020. P. 799–803.
<https://doi.org/10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248860>
58. *Andreev M.V. et al.* Hybrid Real-Time Simulator of Large-Scale Power Systems, in IEEE Transactions on Power Systems, March 2019. V. 34. № 2. P. 1404–1415.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2876668>
59. *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>
60. *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>
61. *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>
62. *Ramadesigan V., Northrop P.W.C., De S., Santhanagopalan S., Braatz R.D., Subramanian V.R.* Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective. J. Electrochem. Soc. 2012. 159. R31–R45.
<https://doi.org/10.1149/2.018203jes>
63. *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>
64. *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>
65. *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>

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

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*

Currently the energy storage system (ESS) has become the development focus in the electric power systems (EPS) with the renewable energy power generation. At the same time, high penetration levels of ESS leads to a change the dynamic properties of the EPS. Accordingly, the analysis of the specifics of ESS operation becomes necessary for effective solution the problems of designing and operating EPS with ESS. Since mathematical simulation level is the main way to obtain the indicated information, the task of the adequacy of approaches and methods for modeling a processes in the ESS as part of the EPS becomes relevant. In the first part of the article, detailed mathematical models of the main elements of the ESS were considered. An analysis of mathematical models of ESS with different detailization level, depending on the type of energy storage device and a number of other factors, are presented within the framework of the second part of the article. The article also provides an overview of the approaches used to simplify the ESS models and their mathematical description. The areas of application of these models are considered. In addition, an analysis of the limitations and disadvantages associated with the simplification of models are presented. The article is an overview and can help in choosing an appropriate mathematical model of the ESS for solving a required designing and operating tasks.

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