

УДК 621.317.3

DOI 10.22213/2413-1172-2018-4-151-158

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДУЛЕЙ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ КОНДЕНСАТОРОВ С ДВОЙНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЛОЕМ

**Ю. Г. Подкин**, доктор технических наук, профессор, Сарапульский политехнический институт (филиал) ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Сарапул, Россия

**Т. Г. Чикуров**, кандидат технических наук, доцент, ОАО «Элеконд», Сарапул, Россия

*На основе анализа рынка приведены основные сегменты производства и потребления накопителей электрической энергии (НЭЭ).*

*Предложен вариант решения задачи проектирования модулей конденсаторов с двойным электрическим слоем (суперконденсаторов) на уровне применяемости, а именно: определены классификационные требования, варианты системотехнического построения и алгоритмизации их работы, рассмотрены способы адаптации к конструкции суперконденсаторов.*

*Рассмотрены варианты включения в работу НЭЭ, обеспечивающие кратковременную работу нагрузки. Показан характер изменения напряжения на нагрузке и условия для расширения рабочего интервала модулей на основе суперконденсаторов, в том числе с применением DC/DC-преобразователей.*

*Показано, что для формирования линейки источников питания на основе накопителей электрической энергии достаточно использовать типовые DC- или AC-преобразователи. При моделировании процессов зарядки и анализе режимов работы конденсаторов в составе модуля подтверждена необходимость применения схем активной и пассивной балансировки, позволяющих обеспечить устойчивую работу конденсаторов в составе модуля.*

*Проведено моделирование переходных процессов в многоэлементных накопителях энергии, позволившее исследовать динамику выхода накопителей на стационарный режим работы и установить основные требования к компонентам суперконденсаторных НЭЭ. Экспериментальные исследования в ОАО «Элеконд» подтвердили результаты теоретических исследований. Морфологический анализ импортной и отечественных элементной базы позволил обосновать выбор управляющих, силовых и прочих электронных компонентов, позволяющих создавать НЭЭ с оптимальными эксплуатационными характеристиками.*

**Ключевые слова:** накопитель электрической энергии, суперконденсатор, схема балансировки, переходные процессы, преобразователи электрической энергии.

### Введение

Уникальные технические и эксплуатационные характеристики конденсаторов с двойным электрическим слоем (ДЭС), иначе суперконденсаторов, вызывают большой интерес у разработчиков источников питания.

Специфика формирования модулей накопителей электрической энергии (НЭЭ) путем объединения конденсаторов с ДЭС предусматривает решение следующих задач:

– выбор конденсаторов и расчет схемы их соединения по параметрам накопления и с учетом электрофизических и конструктивных особенностей конденсаторов с ДЭС;

– разработка электронных схем защиты конденсаторов от перенапряжения;

– обеспечение конструктивных мер защиты от внешних воздействующих факторов.

Анализ технических требований потребителей, обзор и исследования модулей отечественного и импортного производства показывают,

что в основном конденсаторы с ДЭС применяются как разнообразные НЭЭ в схемах импульсного или кратковременного бесперебойного электропитания. Причем на рынке электронной и электротехнической продукции отечественных и иностранных производителей сформировались три сегмента производства и потребления НЭЭ:

а) простые и, соответственно, дешевые модули, представляющие собой соединение конденсаторов с ДЭС на печатной плате без защиты от влияющих факторов, предназначенные для работы в массово выпускаемых электронных гаджетах, применяемых в зоне комфорта человека;

б) модули, собранные на печатной плате, с обеспечением безотказной работы накопителя в условиях, отличающихся от нормальных по ряду факторов, предназначенные для применения в устройствах производственной автоматики, электроники и других сферах;

в) модули для ответственных применений, связанных с гарантированно-высокой вероятностью обеспечения безотказной работы изделия.

В концептуальном плане разработка и изготовление модулей конденсаторов с ДЭС предусматривает решение задачи трех уровней: уровня применимости (системотехнический), уровня функционирования (схемотехнический) и уровня конструкторских решений.

Предложен вариант решения задачи проектирования таких модулей на уровне применимости: определяются классификационные требования, варианты системотехнического построения и алгоритмизации их работы, рассматриваются способы адаптации к конструкции суперконденсаторов.

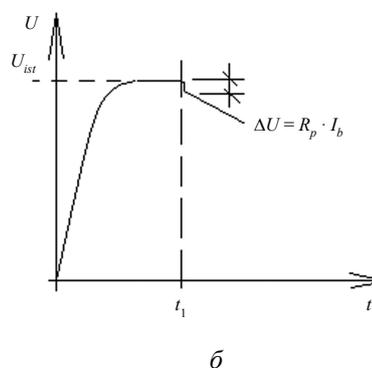
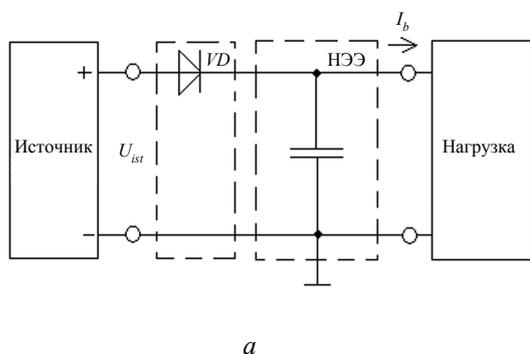


Рис. 1. Подключение накопителя (модуля конденсаторов с ДЭС) к источнику без преобразователей через вентиль: а – схема; б – нагрузочная характеристика

Возможны два варианта включения в работу НЭЭ: временное незначительное снижение напряжения источника – «провал» – и выключение источника. В обоих случаях накопитель должен обеспечить кратковременное стабильное напряжение на нагрузке с током  $I_n$  на время, необходимое для перевода потребителя в спящий режим или безопасное выключение.

При провале  $U_{ist}$  в момент  $t_1$  (рис. 1, б) напряжение на выходе модуля скачком снижается на величину  $\Delta U$  из-за падения напряжения на эквивалентном последовательном сопротивлении (ЭПС) НЭЭ  $R_p$ . При  $(U_{ne} - U_v - \Delta U) > U_{ist}$ , НЭЭ обеспечивает работу нагрузки, разряжаясь до момента  $(U_{ne} - U_v - \Delta U) = U_{ist}$ . С увеличением тока нагрузки  $\Delta U$  возрастает. И если  $(U_{ne} - U_v - \Delta U) < U_{ist}$ , то НЭЭ выключается из энергообмена.

При отключении источника накопитель должен обеспечить кратковременное стабильное питание нагрузки током  $I_b$ . Однако при разряде конденсатора на нагрузку  $r$  напряжение на ней экспоненциально снижается со скоростью, определяемой постоянной времени  $\tau = rC_{ne}$  (рис. 1, б) [2]:

### Простейший источник питания с накопителем электрической энергии

В соответствии с принципом модульности простейший источник питания с накопителем электрической энергии (НЭЭ) имеет структуру, приведенную на рис. 1, а [1]. В этом случае НЭЭ заряжается до напряжения  $U_{ist}$  через вентиль, исключая разряд НЭЭ на источник при снижении напряжения источника относительно номинального. В прямом включении на вентиле создается пороговое падение напряжения  $U_v$ , величина которого определяется маркой диода. Напряжение на НЭЭ и нагрузке снижается до  $U_{ist} - U_v$ . Для диодов Шоттки  $U_v$  составляет сотни милливольт и должно учитываться, особенно в низковольтных источниках.

$$u_b(t) = U_{ne} \exp\left(-\frac{t}{rC_{ne}}\right),$$

где  $U_{ne}$  – исходное напряжение на накопителе;  $C_{ne}$  – емкость модуля.

Снижение нагрузочного напряжения  $u_b(t)$  не обеспечивает требуемого качества электропитания, поэтому для фиксации рабочего напряжения нагрузки необходимо использовать стабилизатор напряжения, а для обеспечения его нормального функционирования  $U_{ne}$  должно быть существенно завышено относительно номинального. Это требование может быть снято или облегчено, если работоспособность нагрузки не критична к параметрам электропитания.

### Влияние DC/DC-преобразователей на работу модулей конденсаторов с ДЭС

Недостатки схемы (рис. 1, а) можно частично нейтрализовать применением входного повышающего DC/DC-преобразователя (рис. 2, а). Если источник и нагрузка согласованы по напряжению, то основной режим питания обеспечивается замыканием ключа, непосредственно соединяющего источник и нагрузку. Модуль

НЭЭ должен быть рассчитан на завышенное напряжение  $U_1$ . Входной повышающий DC/DC-преобразователь преобразует  $U_{ist}$  до  $U_1$ . После того как конденсатор накопителя зарядится, он хранит напряжение  $U_1$ , и ток схемой резервирования не потребляется. Выходной DC/DC-преобразователь работает в режиме стабилизатора, обеспечивая на нагрузке напряжение  $U_c = U_{ist} + U_v$ .

Эпоюра напряжения в модуле накопителя представлена на рис. 2, б. При возникновении «провала» напряжения  $U_{ist}$  ключ размыкается. На конденсаторе с ДЭС накопителя запасено напряжение  $U_1$ . Схема резервирования активи-

зируется, питает нагрузку стабилизированным напряжением  $U_{ist}$ , при этом конденсатор накопителя разряжается от  $U_1$  до  $U_c$  за время  $\Delta t = t_2 - t_1$ . С момента  $t_2$  напряжение на выходе стабилизатора оказывается ниже  $U_{ist}$ , и нагрузка выходит из номинального режима питания.

Таким образом, время  $\Delta t$  является рабочим интервалом модуля НЭЭ при независимом от источника электропитания, а применение DC/DC-преобразователей позволяет расширить рабочий интервал работы модулей конденсаторов с ДЭС и применять модули конденсаторов с напряжениями много выше номинального напряжения нагрузки.

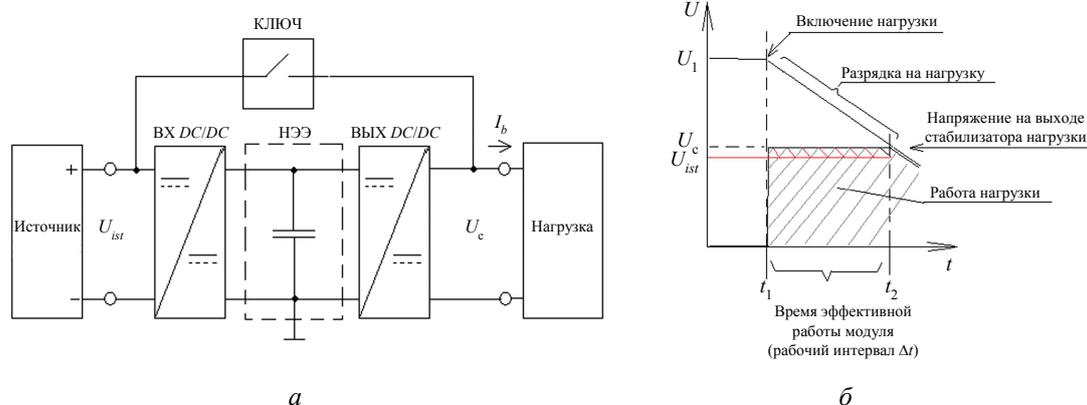


Рис. 2. Подключение накопителя (модуля конденсаторов с ДЭС) к источнику и нагрузке через DC/DC-преобразователи (а); эпоюра напряжения в модуле накопителя (б)

Для работы модулей в цепях переменного тока достаточно преобразователи DC/DC в схеме (рис. 2, а) заменить на AC/DC и DC/AC. Если в качестве преобразователя AC/DC может быть использована любая схема выпрямления, то к выходному DC/AC-преобразователю в первую очередь предъявляется требование обеспечения напряжения переменного тока требуемой (обычно синусоидальной) формы и заданной частоты.

#### Виды и характеристики конденсаторов с двойным электрическим слоем

В целом для преобразователей задается набор параметров, формирующих необходимое качество электроэнергии. Для гражданского применения наиболее приемлема продукция компаний Mean Well, Peak, Recom [3, 4]. Преобразователи этих фирм перекрывают весь спектр приложений, необходимых для модулей источников питания, а их технические характеристики и параметры – диапазон преобразуемых величин. Кроме того, для этих изделий характерно большое разнообразие конструктивного исполнения, включая бескорпусное и корпусное, пре-

дусмотрена возможность монтажа на плату. Не регулируемые и неизолированные преобразователи представлены в номенклатуре отдельными сериями. Предлагаются серии, в которых один или несколько параметров доведены до эталонного значения: серия с очень высокой электрической прочностью (до 10000 В), серия с чрезвычайно широким температурным диапазоном ( $-55...100$  °С), серия маломощных повышающих преобразователей с высоким выходным напряжением (до 210 В постоянного тока). Широко представлена номенклатура нестабилизированных и неизолированных преобразователей. Гарантируется высокое качество выпускаемой продукции.

Для спецтехники выпускаются преобразователи с расширенными пределами по напряжению и мощности в диапазоне температур от  $-60$  °С и ниже до  $+70...80$  °С. На этом рынке представлены отечественные компании «Александр Электрик», «СКТБ РТ», «Актор» и др. [5–7].

Таким образом, при разработке модулей источников питания на основе конденсаторов с двойным электрическим слоем имеется воз-

возможность использования комплектующих различных фирм производителей. Однако для создания специализированных источников питания целесообразно использовать модули собственной разработки и изготовления, что позволит оптимизировать их конструкцию и основные параметры.

**Особенности объединения конденсаторов с ДЭС в модули**

Реальные конденсаторы в области низких частот обычно моделируют трехкомпонентной схемой замещения, содержащей емкость  $C$ , ЭПС  $R_s$  и сопротивление утечки  $R$  (рис. 3, а). При последовательном (рис. 3, б) и параллельном (рис. 3, в) соединении конденсаторов структуры усложняются, однако и в этих случаях возможно эквивалентное преобразование в трехкомпонентную схему (рис. 3, а) из которой следует, что комплексное сопротивление суперконденсатора

$$z(j\omega) = R_s + \frac{R_l}{1 + j\omega CR_l},$$

где  $j\omega$  – мнимая частота.

Комплексная передаточная функция по напряжению

$$k(j\omega) = \frac{z(\omega)}{R_i + z(\omega)} = \frac{(1 + j\omega CR_l)R_s + R_l}{(1 + j\omega CR_l)(R_i + R_s) + R_l}.$$

Для анализа переходного процесса воспользуемся преобразованием Лапласа. Операторный коэффициент передачи для заряжающегося кон-

денсатора, подключенного к ЭДС источника  $E$  через сопротивление  $R_{и}$ , представим как

$$K(p) = \frac{(1 + pCR_l)R_s + R_l}{(1 + pCR_l)(R_i + R_s) + R_l}.$$

Обозначим

$$\beta = \frac{R_i + R_s + R_l}{CR_l(R_i + R_s)}; \quad \alpha = \frac{R_s + R_l}{CR_s \cdot R_l},$$

тогда операторный коэффициент передачи преобразуется к виду

$$K(p) = \frac{R_s(\alpha + p)}{(R_i + R_s)(\beta + p)},$$

а с учетом входного напряжения изображение напряжения на суперконденсаторе будет

$$U(p) = \frac{R_s}{(R_i + R_s)} \frac{(\alpha + p)}{p(\beta + p)}.$$

Переходя к оригиналу, находим переходную характеристику напряжения на конденсаторе в режиме включения:

$$u(t) = E \frac{R_s}{(R_i + R_s)} \left[ \frac{\alpha}{\beta} (1 - e^{-\beta t}) + e^{-\beta t} \right].$$

Зарядный ток рассчитаем по формуле

$$i_c(t) = \frac{E - u(t)}{R_i}.$$

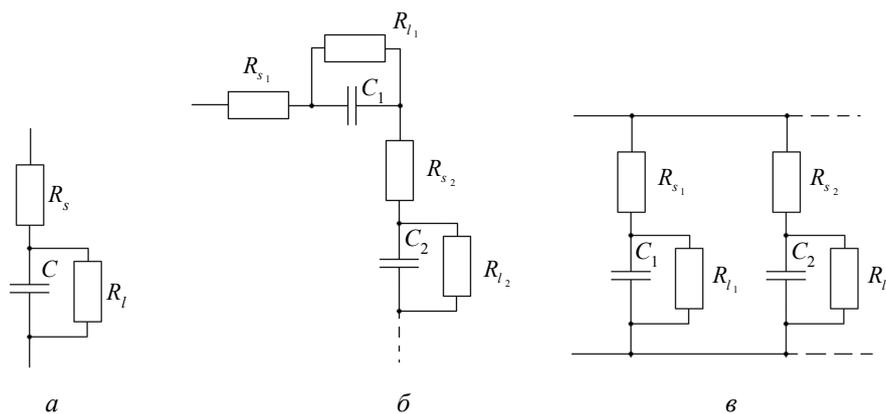


Рис. 3. Эквивалентные схемы: а – суперконденсатор; б – последовательное соединение; в – параллельное соединение

На рис. 4, а изображен процесс установления напряжения и тока в суперконденсаторе емкостью 10 Ф с ЭПС  $R_i = 1$  Ом и сопротивлением утечки  $R_l = 100$  Ом от источника с внутренним сопротивлением  $R_i = 0,5$  Ом и ЭДС  $E = 3$  В. Из-за наличия в схеме замещения сопротивлений напряжение  $u(0)$  испытывает

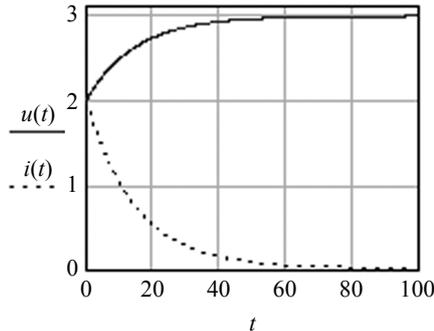
фиксированный скачок 2 В и затем экспоненциально нарастает, стремясь в пределе к  $E$ . Однако траектория переходной характеристики зависит от емкости суперконденсатора. При уменьшении емкости она смещается вверх, а при увеличении – вниз относительно номинальной (рис. 4, б).

Номинальное напряжение конденсатора с ДЭС не превышает (2,5...3,0) В, что обусловлено самим принципом функционирования двойного электрического слоя и существенно ограничивает его применение [8, 9]. Поэтому для получения высокоемкостных устройств с повышенными рабочими напряжениями конденсаторы с ДЭС объединяют в модули или блоки [10, рис. 7] путем их последовательного или параллельного соединения. При этом необходимо учитывать, что объединение суперконденсаторов изменяет не

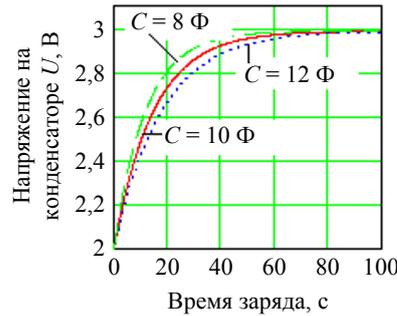
только результирующие напряжения и емкости, но и эквивалентные сопротивления. Если в составе объединенного модуля конденсаторы с ДЭС для повышения рабочего напряжения соединяются последовательно (см. рис. 3, б), то

$$z_{\text{noc}}(j\omega) = \sum_i R_{si} + \frac{\sum_i G_i + \sum_i j\omega C_i}{\prod_i (G_i + j\omega C_i)},$$

где  $G_i = 1/R_{li}$  – проводимость утечки.



а



б

Рис. 4. Переходные характеристики моделируемого суперконденсатора: а – переходные характеристики тока и напряжения; б – дисперсия зарядных характеристик

Поскольку всегда  $R_{si} \ll R_{li}$ , при последовательном соединении  $i$ -я парциальная передаточная функция имеет вид

$$k_i(j\omega) = \frac{R_{si} + \frac{1}{G_i + j\omega C_i}}{R_{is} + \sum_i R_{si} + \sum_i \frac{1}{G_i + j\omega C_i}} \approx \frac{R_{si} + \frac{1}{j\omega C_i}}{R_{is} + \sum_i R_{si} + \sum_i \frac{1}{j\omega C_i}}$$

Обозначим  $a_i = 1/(R_{si} C_i)$ ;  $C_0 = \sum_i C_i$ ;

$$R_0 = \left( R_{is} + \sum_i R_{si} \right); \quad b = 1/(C_0 R_0); \quad A_i = R_{si}/R_0,$$

тогда парциальная комплексная передаточная функция и парциальная переходная характеристика определяются выражениями

$$k_i(j\omega) = \frac{R_{si} (a_i + j\omega)}{R_0 (b + j\omega)}$$

$$u_i(t) = EA_i \left[ \frac{a_i}{b} (1 - e^{-bt}) + e^{-bt} \right].$$

На рис. 5 приведены АЧХ  $K(\omega)$  и переходная характеристика  $u_i(t)$  цепи, образованной последовательным соединением трех конденсаторов со следующими параметрами:  $C_1 = 8 \text{ Ф}$ ;  $C_2 = 10 \text{ Ф}$ ;  $C_3 = 12 \text{ Ф}$ ;  $R_{п1} = 1,2 \text{ Ом}$ ;  $R_{п2} = 1,0 \text{ Ом}$ ;  $R_{п3} = 0,8 \text{ Ом}$ ;  $R_{y1} = 120 \text{ Ом}$ ;  $R_{y2} = 100 \text{ Ом}$ ;  $R_{y3} = 80 \text{ Ом}$ . При снижении эквивалентных сопротивлений на порядок динамические диапазоны АЧХ и переходных характеристик возрастают (рис. 6).

#### Анализ результатов

Отклонения емкостей конденсаторов с ДЭС в цепи относительно номинальной (10 Ф) приводит к тому, что при  $R_{п}$  порядка 1 Ом (рис. 5, а) парциальные АЧХ оказываются разнотипными. Для номинальной емкости  $C_2$  ФЧХ соответствует характеристике ФВЧ. У конденсаторов  $C_1$  и  $C_3$ , емкости которых отличаются от номинальной на  $\pm 2 \text{ Ф}$ , АЧХ соответствуют ФНЧ. Снижение  $R_{п}$  на порядок устраняет эти аномалии в рассмотренных диапазонах частот и времени (рис. 6, а, б). Такое разнонаправленное (рис. 5, а, б) и согласованное (рис. 6, а, б) изменение АЧХ подтверждается экспериментальными исследованиями, проведенными в ОАО «Элеконд», и обеспечивает стабилизацию суммарного напряжения на всей цепи.

Разнонаправлены и переходные характеристики. Напряжения на конденсаторах  $C_1$  и  $C_3$  в процессе заряда возрастают, на  $C_2$  – снижается. Кроме того, если считать перенапряжением  $u > 3$  В, то в безопасной зоне находится только конденсатор максимальной емкости  $C_3$ . Для обеспечения безопасного режима эксплуатации можно снизить ЭДС источника до 7,5 В. Однако при этом два других конденсатора оказываются в сильно недонапряженном режиме. Такой разбаланс приводит к деградации свойств, сокращению времени безотказной работы и быстрому выходу из строя тех элементов, которые испытывают перенапряжение и тем более переполюсовку. Поэтому для повышения эффективности использования конденсаторы с ДЭС, входящими в модуль, целесообразно комплектовать по критерию равенства напряжения и емкости. Однако это требование нетехнологично. В условиях массового применения модулей на основе суперконденсаторов

более оправдано применение схем балансировки [11, 12].

Пассивная балансировка достигается включением параллельно конденсаторам шунтирующих резисторов с сопротивлением  $R_{ш} < 0,1R_y$ . Тогда шунтирующие сопротивления в режиме хранения заряда на ток утечки практически не влияют. Однако в переходном режиме шунты практически выключены, поэтому опасность перенапряжения и переполюсовки не устраняется. Наиболее эффективна активная балансировка. Она позволяет снизить напряжение на конденсаторе до безопасного, тем самым обеспечивает устойчивость его работы. При малых зарядных токах достаточно параллельно суперконденсатору включить стабилитрон. При перенапряжении он шунтирует конденсатор в режиме лавинного пробоя, при переполюсовке – сопротивлением прямо смещенного диода. При больших зарядных токах шунтирование обеспечивает мощный транзисторный ключ, управляемый компаратором [13].

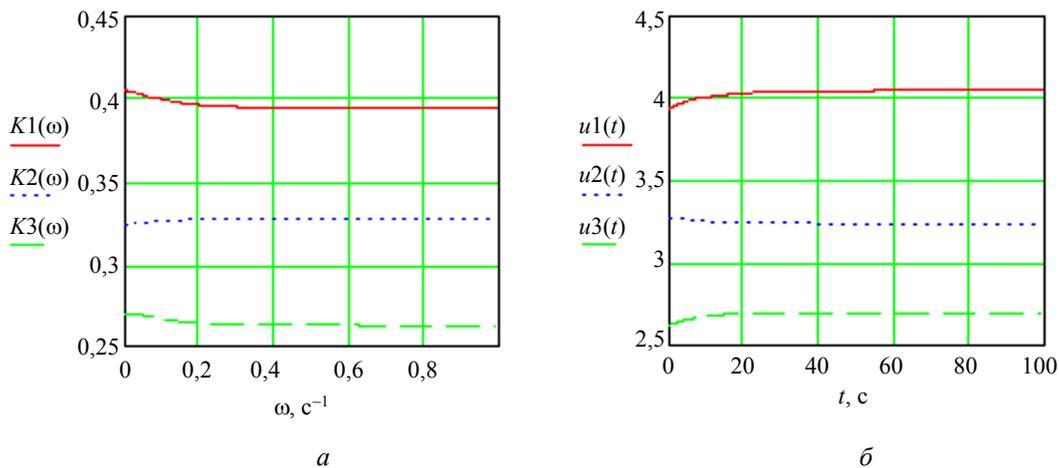


Рис. 5. АЧХ (а) и переходные характеристики (б) трехэлементной последовательной цепи

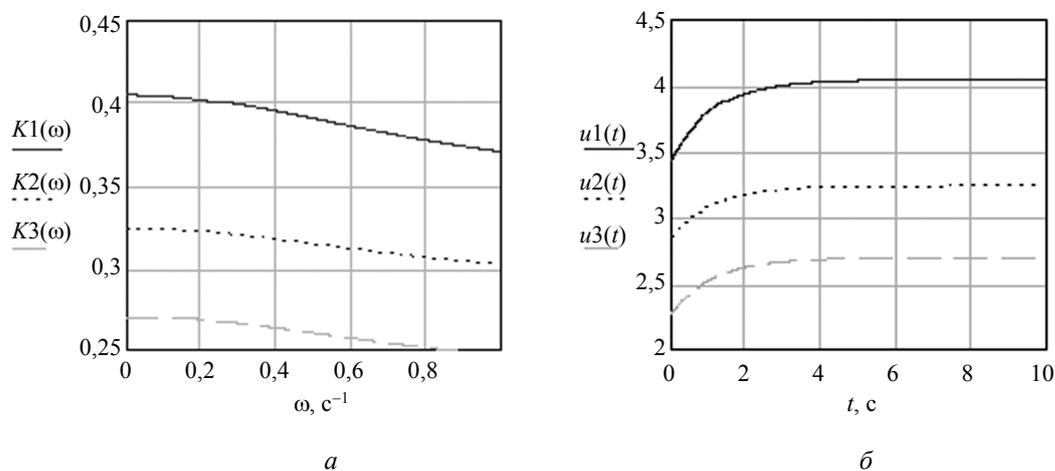


Рис. 6. АЧХ (а) и переходные характеристики (б) по следующим данным:  
 $R_{n1} = 0,12$  Ом;  $R_{n2} = 0,10$  Ом;  $R_{n3} = 0,08$  Ом

## Выводы

Таким образом, для формирования линейки источников питания на основе НЭЭ в создаваемые модули помимо суперконденсаторов следует вводить DC- или AC-преобразователи и схемы активной балансировки. Это позволит исключить стадию подбора суперконденсаторов по рабочей емкости и напряжению и повысить технологичность конструкции.

Применение DC/DC-преобразователей совместно с модулями позволяет расширить рабочий интервал модулей и применять модули конденсаторов с ДЭС с разными номинальными напряжениями. Если нагрузка не критична к параметрам электропитания, возможно применение модулей без преобразователей или со встроенным собственным стабилизатором.

Анализ импортной и отечественных элементных баз позволил определить номенклатуру управляющих, силовых и прочих электронных компонентов, позволяющих создавать модули НЭЭ с оптимальными эксплуатационными характеристиками.

## Библиографические ссылки

1. Подкин Ю. Г., Чикуров Т. Г. Анализ влияния перенапряжений на характеристики суперконденсаторов // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. 2016. № 1. С. 54–58.
2. Подкин Ю. Г., Чикуров Т. Г., Данилов Ю. В. Электротехника и электроника / под ред. Ю. Г. Подкина. М.: Академия, 2011. Т. I. Электротехника. 400 с.
3. Источники питания MEAN WELL. URL: <http://www.mean-well.ru/>
4. DC/DC-преобразователи Mean Well, Recom и Peak // Новости электроники. 2013. № 3.
5. Модульные источники питания фирмы «Александр Электрик». URL: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/power/aesp/index.htm>
6. Разработка и производство реле и переключателей. URL: <http://www.sktb-relay.ru/>
7. Компания «Актор». Инновации, мастерство, качество. URL: <http://www.aktor.ru/>
8. Там же.
9. Schneuwly A., Gallay R. Properties and applications of supercapacitors From the state-of-the-art to future trends. Proceeding PCIM - 2000. Available at: <http://www.garmanage.com/atelier/root/public/Contacting/biblio.cache/PCIM2000.pdf>
10. Методы балансировки напряжений суперконденсаторных элементов / Ю. Ю. Разуваев, М. Ю. Чайка, В. В. Агулов, В. С. Горшков, Д. Е. Силютин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8, № 7-2. С. 101–105.
11. Там же.
12. Варианты конструктивных исполнений суперконденсаторов / Д. Е. Силютин, М. Ю. Чайка, В. С. Горшков, А. И. Дунаев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8, № 7-2. С. 96–100.
13. Методы балансировки напряжений суперконденсаторных элементов.

## References

1. Podkin Yu. G., Chikurov T. G. [Analysis of the effect of overvoltages on the characteristics of supercapacitors]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2016, no. 1, pp. 54-58 (in Russ.).
2. Podkin Yu. G., Chikurov T. G., Danilov Yu. V. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. Moscow, Akademiya Publ., 400 p. (in Russ.).
3. *Istochniki pitaniya MEAN WELL* [MEAN WELL power supplies] (in Russ.). Available at: <http://www.mean-well.ru/>
4. [DC / DC converters Mean Well, Recom and Peak]. *Novosti elektroniki*, 2013, no. 3 (in Russ.).
5. *Modul'nye istochniki pitaniya firmy "Aleksander Elektrik"* [Modular power supplies of Alexander Electric] (in Russ.). Available at: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/power/aesp/index.htm>
6. *Razrabotka i proizvodstvo rele i pereklyuchatelei* [Development and manufacture of relays and switches] (in Russ.). Available at: <http://www.sktb-relay.ru/>
7. *Kompaniya «Aktor». Innovatsii, masterstvo, kachestvo* [The company "Aktor". Innovation, skill, quality] (in Russ.). Available at: <http://www.aktor.ru/>
8. *Kompaniya «Aktor». Innovatsii, masterstvo, kachestvo* [The company "Aktor". Innovation, skill, quality] (in Russ.). Available at: <http://www.aktor.ru/>
9. Schneuwly A., Gallay R. Properties and applications of supercapacitors From the state-of-the-art to future trends. Proceeding PCIM - 2000. Available at: <http://www.garmanage.com/atelier/root/public/Contacting/biblio.cache/PCIM2000.pdf>
10. Razuvaev Yu. Yu., Chaika M. Yu., Agupov V. V., Gorshkov V. S., Silyutin D. E. [Methods for balancing the stresses of supercapacitor elements]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 8, no. 7-2, pp. 101-105 (in Russ.).
11. Razuvaev Yu. Yu., Chaika M. Yu., Agupov V. V., Gorshkov V. S., Silyutin D. E. [Methods for balancing the stresses of supercapacitor elements]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 8, no. 7-2, pp. 101-105 (in Russ.).
12. Silyutin D. E., Chaika M. Yu., Gorshkov V. S., Dunaev A. I. [Versions of superconductors designs]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 8, no. 7-2, pp. 96-100 (in Russ.).
13. Razuvaev Yu. Yu., Chaika M. Yu., Agupov V. V., Gorshkov V. S., Silyutin D. E. [Methods for balancing the stresses of supercapacitor elements]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 8, no. 7-2, pp. 101-105 (in Russ.).

## Designing of Power Supply Modules Based on Capacitors with a Double Electric Layer

*Yu. G. Podkin*, DSc in Engineering, Professor, Sarapul Polytechnic Institute (branch) of Kalashnikov ISTU, Sarapul, Russia

*T. G. Chikurov*, PhD in Engineering, Associate Professor, Elecond OJSC, Sarapul, Russia

*On the basis of the market analysis the main segments of production and consumption of electric energy storage (EES) are given.*

*A solution to the problem of designing the modules of capacitors with a double electric layer (supercapacitors) at the level of applicability is proposed, namely: classification requirements, variants of system engineering and algorithmization of their work are determined, methods of adaptation to the design of supercapacitors are considered.*

*The variants of inclusion in the work of EES, providing short-term work load are considered. The paper shows the character of change of the load voltage and the conditions for the extension of the working range of operation of the modules based on supercapacitors, including with the use of DC/DC converters.*

*It is illustrated that for the formation of a line of power sources based on electric energy storage devices it is enough to use typical DC or AC – converters. In the simulation of the processes of charging and analysis of the modes of operation of capacitors within the modules confirmed the necessity of application of schemes for active and passive balancing of supercapacitors, which allows to ensure stable operation of capacitors within the modules.*

*The simulation of transient processes in multi-element energy storage is performed that allowed to investigate the dynamics of the output of storage to the stationary mode and to establish the basic requirements for the components of supercapacitor EES. Experimental studies at JSC “Elecond” confirmed the results of theoretical studies. Morphological analysis of imported and domestic components allowed to justify the choice of control, power and other electronic components, allowing to create EES with optimal performance.*

**Keywords:** accumulator of electric energy, supercapacitor, balancing circuit, transients, converters of electric energy.

Получено 09.06.2018