

СУПЕРКОНДЕНСАТОРЫ. БАЛАНСИРОВКА С ПОМОЩЬЮ РЕЗИСТОРОВ

Томислав Барич

Факультет электротехники, компьютерных наук
и информационные технологии, Осиек, Хорватия
2018

Суперконденсаторы, также известные как ультраконденсаторы и электрохимические конденсаторы – особый вид конденсаторов ёмкостью порядка фарад (десятки, сотни и тысячи фарад). В статье описаны их основные особенности и представлены их эквивалентные схемы с указанием физического смысла элементов схемы в них. В данной статье даётся обзор проблемы неравномерного распределения напряжения в цепи с последовательно подключёнными суперконденсаторами. Показаны методы пассивной балансировки напряжения.

Получены аналитические выражения, описывающие поведение последовательного подключения суперконденсатора со схемой балансировки пассивного резистора и без неё. На практическом примере сравниваются результаты, полученные с помощью полученных аналитических выражений и моделирования.

1. ВВЕДЕНИЕ

Суперконденсаторы (SC), электрохимические конденсаторы с двойным слоем (EDLC) или ультраконденсаторы (UC) – это названия устройств для накопления энергии, которые накапливают энергию посредством физического процесса разделения заряда на границе твёрдое тело/жидкость [1]. Как устройства накопления энергии они имеют определенные преимущества и недостатки по сравнению с конденсаторами и батареями. Они обладают способностью накапливать и поставлять энергию с высокой удельной мощностью. Это делает их особенно привлекательными компонентами для определенных целей. Из-за электростатической природы накопителя энергии в них их долговечность, то есть количество циклов заряда и разряда, относительно высока по сравнению с любым типом батареи, они не нуждаются в обслуживании и работают в очень широком диапазоне температуры (от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1-3]).

Из-за физического процесса, на котором основано накопление энергии, они обычно имеют относительно низкое рабочее напряжение. Их рабочее напряжение составляет от 2,5 В до 2,7 В (в зависимости от используемого электролита). Поскольку приложения, в которых можно напрямую использовать такое низкое рабочее напряжение, являются очень редкими, суперконденсаторы необходимо подключать последовательно для достижения удовлетворительного рабочего напряжения. Поскольку допуск на параметры суперконденсаторов обычно составляет 20%, распределение напряжения на них в таком последовательном соединении будет

неравномерным. В этом случае напряжение на отдельных суперконденсаторах может превышать номинальное. Обычно суперконденсаторы сконструированы таким образом, что напряжение на них не должно быть более чем на 0,1 В от номинального напряжения. В противном случае происходит электролиз электролитов. Если этого не произойдет, а рабочее напряжение все ещё будет очень высоким и близко к номинальному, это значительно сократит срок службы суперконденсатора. Для предотвращения этого разработаны различные активные и пассивные электронные схемы, обеспечивающие равномерное распределение напряжения на суперконденсаторах. В этой статье описывается причина неравномерного распределения напряжения между суперконденсаторами в последовательном соединении. Показаны простые методы пассивной балансировки. Особое внимание уделяется пассивной балансировке напряжения с помощью резисторов.

Были получены аналитические выражения для описания поведения этой пассивной схемы для выравнивания напряжения. На практическом примере сравнивались результаты, полученные с помощью полученных аналитических выражений и моделирования.

2. О СУПЕРКОНДЕНСАТОРАХ

По сравнению с аккумуляторными батареями, суперконденсаторы имеют большое количество циклов заряда и разряда (100000 по сравнению с 1000) и высокую мощность на единицу массы (или объёма), но могут хранить небольшое количество энергии на единицу массы (или объёма) (рис. 1 [1]).

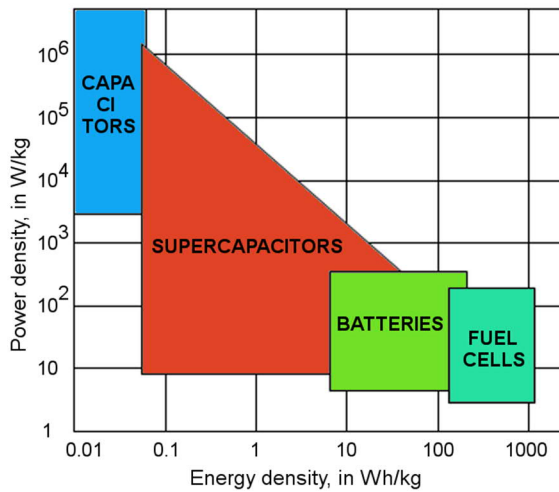


Рис. 1. Эскиз графика Рагона для различной энергии устройства хранения и преобразования. Указанный области представляют собой грубые направляющие линии.

Каждый суперконденсатор имеет два электрода, механически разделённых разделителем, которые ионно связаны друг с другом через электролит. Электролит представляет собой смесь положительных и отрицательных ионов, растворённых в растворителе, таком как вода или органическое вещество. Электроды находятся в подходящем электролите и разделены тонким разделителем (рис. 2. [4]).

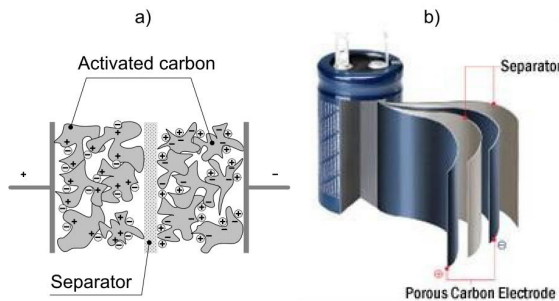


Рис. 2. а) Упрощённое двумерное изображение, представление структуры суперконденсатора, б) фактическая конструкция (цилиндрический тип)

Другие наиболее часто используемые формы суперконденсатор показаны на рис. 3 [4]. Наиболее известные производители: Samwha, Samxon, Maxwell, Panasonic, Korchip, VINATech, Nesscap [5-11].

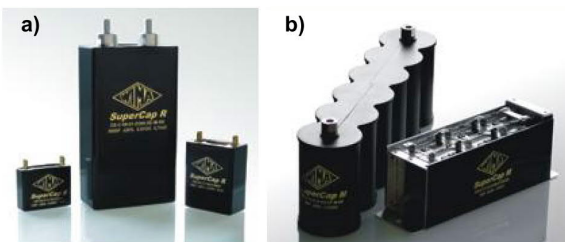


Рис. 3. Суперконденсаторы WIMA а) в прямоугольном корпусе, б) модули суперконденсаторов

3. СВОЙСТВА СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ И ИХ МОДЕЛИ

В зависимости от применения, суперконденсатор можно смоделировать по простейшим схемам, показанным на рисунке 4, в которых элементы схемы имеют значения: R_{ESR} – эквивалентное последовательное сопротивление, L_{ESL} – эквивалентная последовательная индуктивность, R_p – эквивалентное параллельное сопротивление (сопротивление утечки R_l), C_0 – ёмкость при нулевом напряжении.

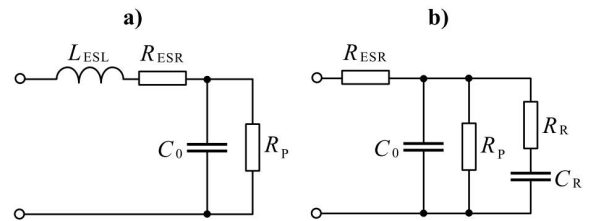


Рис. 4. Эквивалентная схема с RC-элементами

Вплоть до очень сложных схем, в которых учитывались свойства поглощения электронов и взаимозависимость ёмкости и напряжения (рис. 5, [12]).

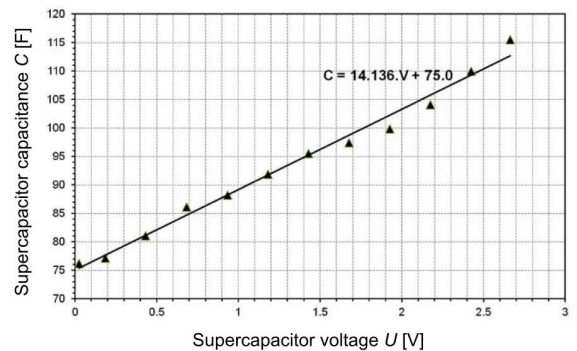


Рис. 5. Общая зависимость ёмкости суперконденсатора от напряжения

Дифференциальная ёмкость суперконденсатора зависит от приложенного напряжения. Обычно её аппроксимируют как функцию напряжения:

$$C(U) = C_0 + K_U \times U \quad (1)$$

где C_0 – начальная линейная ёмкость (при нулевом напряжении), а K_U – коэффициент, который учитывает изменение ёмкости от приложенного напряжения.

Зависимость ёмкости суперконденсатора от напряжения может быть учтена схемой, показанной на рис. 6. где R_0 – эквивалентное последовательное сопротивление, R_i – внутреннее сопротивление.

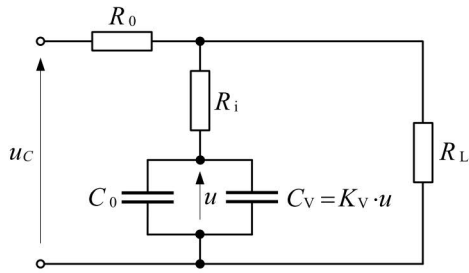


Рис. 6: Эквивалентная схема зависящего от напряжения суперконденсатора

Одна из схем, с помощью которой можно учесть диэлектрическое поглощение, показана на рис. 7, где R_1, R_2, R_n – распределённое внутреннее сопротивление, а C_1, C_2, C_n – распределённая ёмкость.

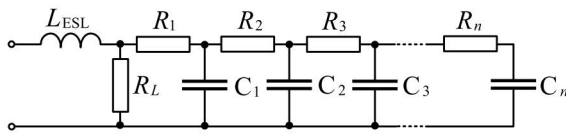


Рис. 7: Эквивалентная схема с каскадными RC-элементами

Третьим, особенно ярко выраженным явлением, связанным с суперконденсаторами по сравнению с обычными конденсаторами, является частотная зависимость ёмкости суперконденсатора (рис. 8. [13]).

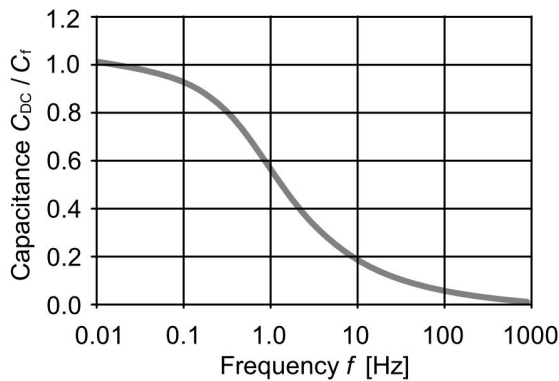


Рис. 8: Общая частотная зависимость ёмкости суперконденсатора

Эта необычайно сильная частотная зависимость может быть объяснена разным расстоянием, на которое ионы должны перемещаться в порах электрода. Эти три явления сильно отличают суперконденсаторы от обычных конденсаторов.

4. СРОК СЛУЖБЫ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ

Срок службы суперконденсаторов зависит от условий, в которых используются ячейки или модули. В целом, суперконденсаторы не имеют жёсткого отказа в конце срока

службы, как аккумуляторные батареи. Конец их срока службы определяется, когда ёмкость и(или) эквивалентное последовательное сопротивление выходит за определенные пределы, обычно 80% от номинального значения. На срок службы суперконденсаторов больше всего влияет приложенное напряжение и рабочая температура (рисунок 9. [14]). Ожидаемый срок службы при комнатной температуре от 5 до 10 лет. Расчётный срок службы соответствует времени между заводским измерением и уменьшением ёмкости менее 80% [7].

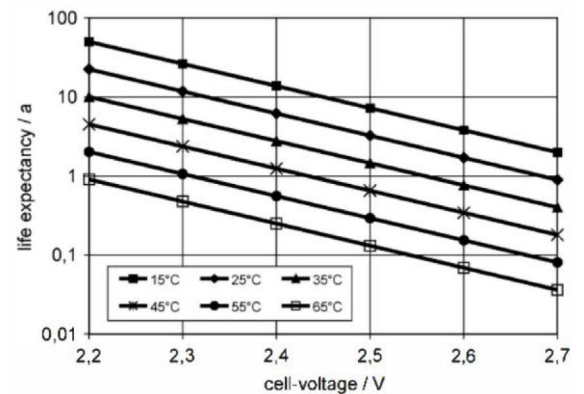


Рис. 9: Ожидаемый срок службы суперконденсатора при различных температурах и рабочих напряжениях

Проще говоря, срок службы уменьшается вдвое, когда температура суперконденсатора увеличивается на 10 °C или когда прикладываемое напряжение увеличивается на 0,02 В [14, 15]. Связь между сроком службы, рабочими напряжением и температурой может быть описана простым уравнением [15]:

$$T_{exp}(U, \vartheta) = T_0 \times e^{-\left(\frac{U}{U_0} + \frac{\vartheta}{\vartheta_0}\right)} \quad (2)$$

где T_0 – статический срок службы (с), U – постоянное напряжение на выводах суперконденсатора (В) и ϑ – гипотетическая постоянная рабочая температура суперконденсатора (°C).

Числовые значения констант равны [15]:

$$T_0 = 1,4 \cdot 10^{13}, \text{ c}; U_0 = \frac{0,2}{\ln 2}, \text{ В}; \vartheta_0 = \frac{10}{\ln 2}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

5. ПАССИВНАЯ БАЛАНСИРОВКА

Из-за низкого рабочего напряжения суперконденсаторов, за исключением редких случаев, когда такое напряжение может использоваться напрямую, необходимо соединить их последовательно для достижения подходящего рабочего напряжения. Поскольку допуск параметра суперконденсаторов обычно составляет 20%, распределение напряжения на них в таком последовательном

соединении будет неравномерным. В этом случае напряжение на отдельных элементах может превышать номинальное. Чтобы предотвратить это и выровнять напряжения, используются различные методы выравнивания напряжения на последовательно соединённых суперконденсаторах. Эти техники можно разделить на две группы: активные и пассивные. Активные методы имеют ряд преимуществ перед пассивными, но требуют дополнительной электроники. Напротив, пассивные методы очень просты и, несмотря на их недостатки, все ещё широко распространены (рис. 10 [14]).

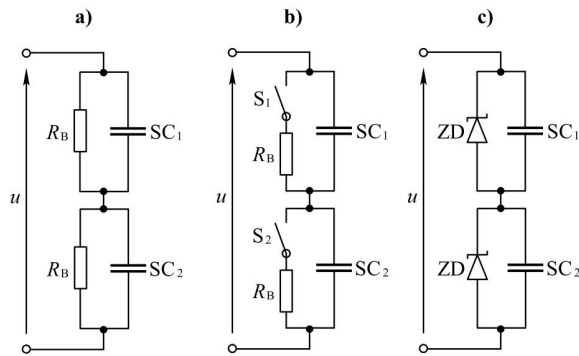


Figure 10.: Cell balancing circuits a) resistor, b) switched-resistor, c) Zener diodes

Рис. 10. Цепи балансировки ячеек: а) резистор, б) переключаемый резистор, в) стабилитроны

6. БАЛАНСИРОВКА ЯЧЕЙКИ С ПОМОЩЬЮ РЕЗИСТОРА

Влияние сопротивления утечки суперконденсаторов на распределение напряжения на них во время и после переходного процесса можно понять из эквивалентной схемы, показанной на рисунке 11.

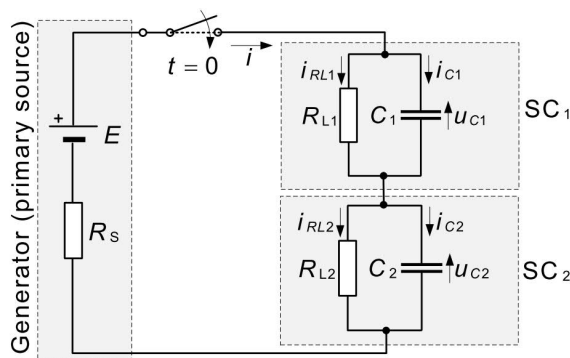


Рис. 11. Эквивалентная схема двух суперконденсаторов для анализа распределения напряжения на них во время и после переходного процесса

Хотя в схеме всего два суперконденсатора, без ограничения общности выводы можно применить к серии из n

суперконденсаторов. Из схемы, представленной на рисунке 11, следует:

$$E - i \times R_s - U_{C1} - U_{C2} = 0 \quad (3)$$

$$i = i_{RL1} + i_{C1} \quad (4)$$

$$i = i_{RL2} + i_{C2} \quad (5)$$

$$i_{RL1} = \frac{U_{C1}}{R_{L1}} \quad (6)$$

$$i_{RL2} = \frac{U_{C2}}{R_{L2}} \quad (7)$$

$$i_{C1} = C_1 \frac{dU_{C1}}{dt} \quad (8)$$

$$i_{C2} = C_2 \frac{dU_{C2}}{dt} \quad (9)$$

Уравнения (3-9) описывают поведение системы, образованной двумя суперконденсаторами, во время и после переходного процесса ($t \geq 0_+$). Подставляя уравнения (4), (6) и (8) в (3), получаем:

$$E - \left(\frac{U_{C1}}{R_{L1}} + C_1 \frac{dU_{C1}}{dt} \right) R_s - U_{C1} - U_{C2} \quad (10)$$

Уравнения (4) и (5) дают равенство:

$$i_{RL1} + i_{C1} = i_{RL2} + i_{C2} \quad (11)$$

Подстановка (6-9) в выражение выше даёт:

$$\frac{U_{C1}}{R_{L1}} + C_1 \frac{dU_{C1}}{dt} = \frac{U_{C2}}{R_{L2}} + C_2 \frac{dU_{C2}}{dt} \quad (12)$$

Использование преобразований Лапласа [16] из (10) и (12) с начальными условиями, равными нулю, даёт:

$$\frac{E}{s} - \left(\frac{U_{C1}(s)}{R_{L1}} + sC_1 U_{C1}(s) \right) R_s - U_{C1}(s) - U_{C2}(s) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{U_{C1}(s)}{R_{L1}} + sC_1 U_{C1}(s) = \frac{U_{C2}(s)}{R_{L2}} + sC_2 U_{C2}(s) \quad (14)$$

Преобразование приведённого выше выражения в три этапа даёт:

$$U_{C1}(s) \left(\frac{1}{R_{L1}} + sC_1 \right) = U_{C2}(s) \left(\frac{1}{R_{L2}} + sC_2 \right) \quad (15)$$

$$U_{C1}(s) \frac{1+sR_{L1}C_1}{R_{L1}} = U_{C2}(s) \frac{1+sR_{L2}C_2}{R_{L2}} \quad (16)$$

$$U_{C2}(s) = U_{C1}(s) \frac{R_{L2} (1+sR_{L1}C_1)}{R_{L1} (1+sR_{L2}C_2)} \quad (17)$$

Учитывая, что суперконденсатор с более высокой ёмкостью всегда имеет более низкое сопротивление утечки, и наоборот, можно принять $R_{L1}C_1 \approx R_{L2}C_2$.

Соответственно, выражение (17) можно упростить:

$$U_{C2}(s) \approx U_{C1}(s) \frac{R_{L2}}{R_{L1}} \quad (18)$$

Подстановка (18) в (13) даёт:

$$U_{C1}(s) \left(\frac{R_s}{R_{L1}} + sR_s C_1 \right) + U_{C1}(s) \left(1 + \frac{R_{L2}}{R_{L1}} \right) = \frac{E}{s} \quad (19)$$

Поскольку внутреннее сопротивление источника R_s (включая соединительные провода) имеет порядок величины мОм, а сопротивление утечки суперконденсатора составляет порядок величины кОм, почти без какой-либо значительной погрешности справедливо следующее утверждение $\frac{R_s}{R_{L1}} \ll 1$. Учитывая это,

уравнение (19) можно упростить следующим образом:

$$U_{C1}(s) \cdot sR_s C_1 + U_{C1}(s) \left(1 + \frac{R_{L2}}{R_{L1}}\right) = \frac{E}{s} \quad (20)$$

Преобразование приведённого выше выражения в несколько шагов даёт:

$$U_{C1}(s) \left(\frac{R_{L1}+R_{L2}}{R_{L1}} + sR_s C_1\right) = \frac{E}{s} \quad (21)$$

$$U_{C1}(s) \frac{R_{L1}+R_{L2}}{R_{L1}} \left(1 + s \frac{R_s R_{L1}}{R_{L1}+R_{L2}} C_1\right) = \frac{E}{s} \quad (22)$$

$$U_{C1}(s) \left(1 + s \frac{R_s R_{L1}}{R_{L1}+R_{L2}} C_1\right) = \frac{E}{s} \frac{R_{L1}}{R_{L1}+R_{L2}} \quad (23)$$

Дополнительная компоновка даёт выражение для напряжения на суперконденсаторе C_1 :

$$U_{C1}(s) = \frac{E}{s} \cdot \frac{R_{L1}}{R_{L1}+R_{L2}} \cdot \frac{1}{1+s \frac{R_s R_{L1}}{R_{L1}+R_{L2}} C_1} \quad (24)$$

Аналогичным образом следует:

$$U_{C2}(s) = \frac{E}{s} \cdot \frac{R_{L2}}{R_{L1}+R_{L2}} \cdot \frac{1}{1+s \frac{R_s R_{L2}}{R_{L1}+R_{L2}} C_2} \quad (25)$$

Используя обозначения T_1 и T_2 для постоянных времени:

$$T_1 = \frac{R_s R_{L1}}{R_{L1}+R_{L2}} \quad (26)$$

$$T_2 = \frac{R_s R_{L2}}{R_{L1}+R_{L2}} \quad (27)$$

Уравнения (24) и (25) можно кратко записать в виде:

$$U_{C1}(s) = \frac{E}{s} \cdot \frac{R_{L1}}{R_{L1}+R_{L2}} \cdot \frac{1}{T_1} \cdot \frac{1}{s + \frac{1}{T_1}} \quad (28)$$

$$U_{C2}(s) = \frac{E}{s} \cdot \frac{R_{L2}}{R_{L1}+R_{L2}} \cdot \frac{1}{T_2} \cdot \frac{1}{s + \frac{1}{T_2}} \quad (29)$$

Обратное преобразование Лапласа (28) и (29) выполняется в соответствии с выражением [16]:

$$L^{-1}\left(\frac{1}{s(s+a)}\right) = \frac{1}{a} \cdot (1 - e^{-at}) \quad (30)$$

Напряжения суперконденсаторов во временной области равны:

$$U_{C1}(t) = E \cdot \frac{R_{L1}}{R_{L1}+R_{L2}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right) \quad (31)$$

$$U_{C2}(t) = E \cdot \frac{R_{L2}}{R_{L1}+R_{L2}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right) \quad (32)$$

Члены $\frac{R_{L1}}{R_{L1}+R_{L2}}$ и $\frac{R_{L2}}{R_{L1}+R_{L2}}$ в выражениях (31) и (32) имеют значение делителя напряжения источника напряжения E .

Они определяют напряжения U_{C1} и U_{C2} на суперконденсаторах после окончания переходного процесса ($t \rightarrow \infty$) в соответствии с выражениями:

$$U_{C1}(\infty) = E \cdot \frac{R_{L1}}{R_{L1}+R_{L2}} \quad (33)$$

$$U_{C2}(\infty) = E \cdot \frac{R_{L2}}{R_{L1}+R_{L2}} \quad (34)$$

Соответственно, после окончания переходного процесса суперконденсатор, имеющий более высокое сопротивление утечки, будет принимать большее напряжение

и наоборот. Выражения (31) и (32) позволяют графически представить явление перехода напряжения на суперконденсаторах способом, показанным на рис.12.

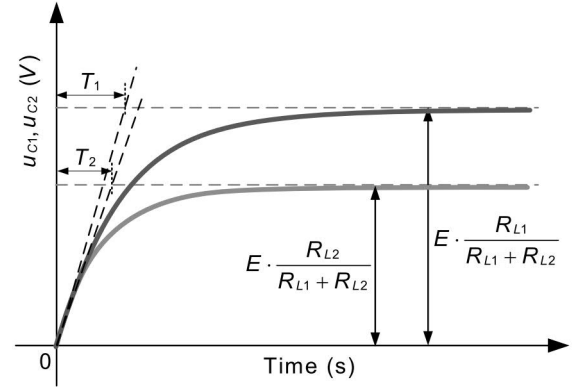


Рис. 12. Переходное изменение напряжения на суперконденсаторах при отсутствии балансировки напряжения

Динамика изменения напряжения на суперконденсаторах определяется постоянными времени T_1 и T_2 , которые определяются выражениями (26) и (27). Как правило, постоянные времени T_1 и T_2 различны, но учитывая, что суперконденсатор с большей ёмкостью всегда имеет меньшее сопротивление утечки и наоборот, их можно принять $R_{L1}C_1 \approx R_{L2}C_2$ и считать практически идентичными.

7. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Поскольку аналитические выражения получаются различными приближениями, их достоверность должна быть проверена имитационным моделированием. Для этого было использовано программное обеспечение ATP-EMTP [17]. Первое моделирование было выполнено для последовательного соединения двух суперконденсаторов без балансировочных резисторов в соответствии с моделью на рис. 11. Модель ATP-EMTP последовательного соединения двух суперконденсаторов без балансировочных резисторов показана на рис. 13. Второе моделирование проводилось для последовательного соединения двух суперконденсаторов с балансировочными резисторами R_B .

Модель последовательного соединения двух суперконденсаторов с балансировочными резисторами ATP-EMTP показана на рис. 14. Оба моделирования проводились для суперконденсатора номинальной ёмкостью 100 Ф от производителя SAMWHA [6].

По данным производителя [6], указанный суперконденсатор обозначается как: DB, выводы типа Snap-in, стандартная серия,

торговая марка: "Green-Cap". Основные данные суперконденсаторов: Номинальное напряжение $U_{г}=2,7$ В, ёмкость 100 Ф ($\pm 20\%$), эквивалентное последовательное сопротивление на постоянном токе ESR_{DC} 10 мОм. Эквивалентное последовательное сопротивление на 1 кГц $ESR_{1кГц}$ 8 мОм, ток утечки I_{LC} $0,27$ мА (при $2,7$ В).

Параметры моделирования: $E=5$ В, $R_s=0,1$ Ом, $R_{L1}=12$ кОм, $R_{L2}=8$ кОм, $C_1=80$ Ф, $C_2=120$ Ф, $R_B=1$ кОм.

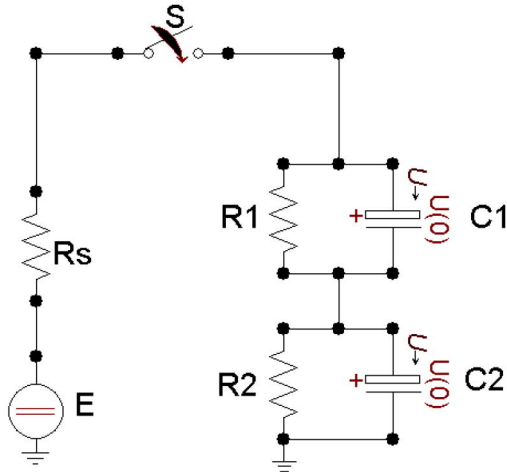


Рис. 13. Модель АТР-ЕМТР последовательного соединения двух суперконденсаторов без балансировочных резисторов

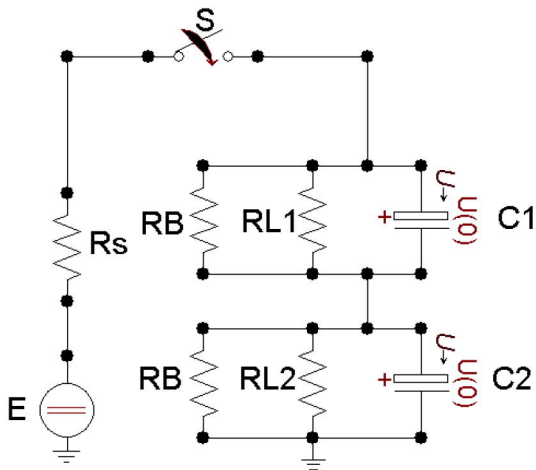


Рис. 14. Модель АТР-ЕМТР последовательного соединения двух суперконденсаторов с балансировочными резисторами

После выполнения моделирования были получены осциллограммы напряжений U_{C1} и U_{C2} , которые показаны на рисунках 15 и 16.

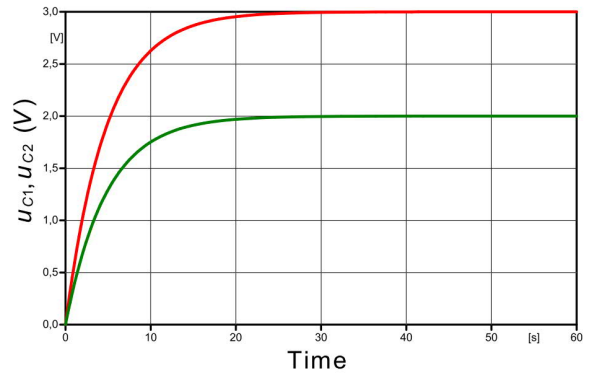


Рис. 15. Переходные напряжения на суперконденсаторах при отсутствии балансировки напряжения

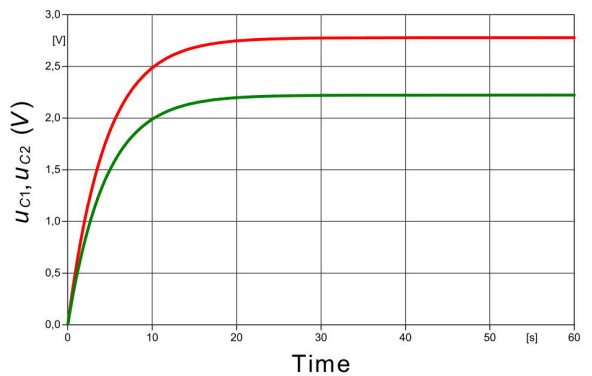


Рис. 16. Переходные напряжения на суперконденсаторах при использовании балансировки напряжения

8. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ссылаясь на рис. 15, напряжения U_{C1} и U_{C2} в установившемся режиме ($t \rightarrow \infty$) равняются $U_{C1}(\infty) = 3$ В и $U_{C2}(\infty) = 2$ В.

Согласно аналитическим выражениям, напряжения U_{C1} и U_{C2} в новом установившемся состоянии после окончания переходного процесса ($t \rightarrow \infty$) определяются выражениями (33) и (34):

$$U_{C1}(\infty) = E \cdot \frac{R_{L1}}{R_{L1} + R_{L2}} = 5 \cdot \frac{12 \cdot 10^3}{12 \cdot 10^3 + 8 \cdot 10^3} = 5 \cdot 0,6 = 3 \text{ В} \quad (35)$$

$$U_{C2}(\infty) = E \cdot \frac{R_{L2}}{R_{L1} + R_{L2}} = 5 \cdot \frac{8 \cdot 10^3}{12 \cdot 10^3 + 8 \cdot 10^3} = 5 \cdot 0,4 = 2 \text{ В} \quad (36)$$

Таким образом, результаты, полученные с помощью аналитических выражений и моделирования, идеально совпадают.

Обращаясь к рис. 16, напряжения U_{C1} и U_{C2} в установившемся режиме ($t \rightarrow \infty$) равняются $U_{C1}(\infty) = 2,6$ В и $U_{C2}(\infty) = 2,4$ В.

При использовании балансировки ($R_B=1$ ком), согласно аналитическим выражениям, напряжения U_{C1} и U_{C2} в новом установившемся состоянии после окончания переходного процесса ($t \rightarrow \infty$) равны:

$$U_{C1}(\infty) = E \cdot \frac{R_{L1}}{R_{L1} + R_{L2}} = 5 \cdot \frac{0,92 \cdot 10^3}{0,92 \cdot 10^3 + 0,89 \cdot 10^3} = 5 \cdot 0,51 = 2,55 \text{ В} \quad (37)$$

$$U_{C2}(\infty) = E \cdot \frac{R_{L2}}{R_{L1} + R_{L2}} = 5 \cdot \frac{0,89 \cdot 10^3}{0,92 \cdot 10^3 + 0,89 \cdot 10^3} = 5 \cdot 0,49 = 2,45 \text{ В} \quad (38)$$

где R_{L1} и R_{L2} – это эквивалентные сопротивления из:

$$R_{L1} = \frac{R_B R_{L1}}{R_B + R_{L1}} \quad (39)$$

$$R_{L2} = \frac{R_B R_{L2}}{R_B + R_{L2}} \quad (40)$$

Таким образом, результаты, полученные аналитическими выражениями и моделированием, хотя и не совпадают полностью, но очень близки.

Сравнивая рисунки 15 и 16, следует отметить, что добавление балансирующих напряжения сопротивлений незначительно влияет на постоянные времени. Это также можно объяснить аналитическими выражениями. Например, постоянная времени T_1 без балансировки, а после балансировки T_1 определяется выражениями:

$$T_1 = \frac{R_s R_{L1}}{R_s + R_{L1}} \cdot C_1 \quad (41)$$

$$T_1 = \frac{R_s R_{L1}}{R_s + R_{L1}} \cdot C_1 \quad (42)$$

Из сравнения этих двух термов следует, что изменение произойдёт, если следующие члены изменят сумму:

$$\frac{R_{L1}}{R_{L1} + R_{L2}} \quad (43)$$

$$\frac{R_{L1}}{R_{L1} + R_{L2}} \quad (44)$$

Поскольку эти элементы примерно одинаковы до и после балансировки, получается, что балансировка с помощью резисторов оказывает незначительное влияние на постоянные времени. Таким образом, результаты, полученные с помощью аналитических выражений и моделирования для постоянных времени, хорошо согласуются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) R. Kotz and M. Carlen, "Principles and Applications of Electrochemical Capacitors," *Electrochimica Acta*, 45 (2000), pp. 2483–2498.
- 2) Dušan Vujević, "Superkondenzatori", *Energija, časopis hrvatske elektroprivrede*, Vol. 52, No 4, 2003, ISSN 0013-7448, pp. 295-303
- 3) François Béguin, Elzbieta Frackowiak, "Supercapacitors: Materials, Systems, and Applications", Wiley-VCH; 1 edition, 2013, ISBN: 978-3-527-32883-3
- 4) ACTE A/S about ultracapacitors, url: <http://www.acte-uk.com/technologies/ultracapacitors/>
- 5) WIMA Spezialvertrieb elektronischer Bauelemente GmbH & Co.KG , http://www.wima.cn/EN/super-cap_construction.htm, (accessed 8.2.2018.)
- 6) Samwha Capacitor Group, http://www.samwha.com/goodsDetail.aspx?f_num=84 (accessed 8.2.2018.)
- 7) Maxwell Technologies, Inc., <http://www.maxwell.com/prod-ucts/ultracapacitors> (accessed 8.2.2018.)
- 8) NESSCAP Ultracapacitors, <http://www.nesscap.com/>, (accessed 8.2.2018.)
- 9) Panasonic Corporation, <https://industrial.panasonic.com/ww/products/capacitors/edlc> (accessed 8.2.2018.)
- 10) KORCHIP Corporation, Electric Double Layer Capacitor info, http://www.korchip.com/eng/sub02_01.php, (accessed 8.2.2018.)
- 11) VINATech Co.,Ltd. Supercapacitors manufacturer company, <https://www.vina.co.kr/eng/> (accessed 8.2.2018.)
- 12) P.O. Logerais, M.A. Camara, O. Riou, A. Djellad, A. Omeiri, F. Delaleux, J.F. Durastanti, "Modeling of a supercapacitor with a multibranch circuit ", *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 40, Issue 39, 19 October 2015, Pages 13725-13736
- 13) Wikipedia, The Free Encyclopedia, supercaapcitors <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>, (accessed 13.2.2018.)
- 14) Dirk Linzen, Stephan Buller, Eckhard Karden, Rik W. De Doncker, Analysis and Evaluation of Charge-Balancing Circuits on Performance, Reliability, and Lifetime of Supercapacitor Systems, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, VOL. 41, NO. 5, SEPTEMBER/OCTOBER 2005, pp. 1135-1141
- 15) Paul Kreczanik, Pascal Venet, Alaa Hijazi, Guy Clerc, Study of Supercapacitor Aging and Lifetime Estimation According to Voltage, Temperature, and RMS Current, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 61, NO. 9, SEPTEMBER 2014, pp. 4895-4902
- 16) John W. Harris, Horst Stocker, *Handbook of Mathematics and Computational Science*, 1998, Springer – Verlag, New York, Inc. ISBN: 0-387-94746-0
- 17) ATP-EMTP, Alternative Transients Program – Electromagnetic Transients Program <http://www.emtp.org>, (accessed 8.2.2018.)

Источник:

https://bib.irb.hr/datoteka/942041.Supercapacitors_cell_balancing_using_resistors_T.Bari_pp_15-22.pdf