

УДК 621.319.4

DOI: 10.22213/2410-9304-2017-1-41-46

В. А. Стародубцева, кандидат технических наук

М. О. Шкляев, магистрант

ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

АКТИВНАЯ БАЛАНСИРОВКА СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ

В данной статье рассматривается решение одной из проблем использования суперконденсаторов, в связи с которым их применение является затруднительным в настоящее время.

Как известно, из-за низкого номинального напряжения суперконденсаторов использование происходит при их последовательном соединении. При производстве суперконденсаторов имеется некоторый разброс параметров по емкости. В связи с этим возникает проблема разной скорости заряда суперконденсаторов, а именно: возникает вероятность перезаряда суперконденсатора, что может вызвать его пробой. Появляется необходимость ограничения напряжения на суперконденсаторе при заряде. Для проверки теоретических сведений проведено моделирование заряда последовательно соединенных суперконденсаторов в программной среде Multisim.

В статье рассматриваются ключевые этапы разработки схемы устройства для ограничения напряжения на суперконденсаторах, которая будет являться активной балансировкой. Сохранится расчет основных параметров данной балансировки. Для подтверждения работоспособности предложенной схемы проведено моделирование последовательно соединенных суперконденсаторов с использованием разработанной активной балансировки. Описаны результаты проведенных моделирований. Для наглядного представления принципа работы активной балансировки при моделировании были дополнительно выведены осциллограммы напряжений внутренних узлов схемы. В качестве доказательства важности правильного расчета параметров схемы проведено моделирование с неверно выбранными параметрами активной балансировки. Проведены описание и анализ результатов данного моделирования.

В заключение раскрывается эффективность решения проблемы заряда последовательно соединенных суперконденсаторов. Раскрывается вопрос надежности и энергоэффективности использования модулей суперконденсаторов. С помощью приведенной статьи раскрывается вопрос ускорения внедрения использования суперконденсаторов в качестве накопителей энергии.

Ключевые слова: активная балансировка, суперконденсатор, ток балансировки, моделирование, Multisim.

Применение суперконденсаторов в радио- и электротехнике является перспективным направлением на сегодняшний день. Модули суперконденсаторов найдут свое применение в гибридных аккумуляторах, а также в источниках бесперебойного питания. Преимуществом суперконденсаторов является малое внутреннее сопротивление, что дает возможность работать при больших токах заряда-разряда. Однако имеется большой недостаток – ограничение рабочего напряжения до 3 В (большинство суперконденсаторов изготавливают на рабочее напряжение 2,7 В). Конечно, можно обойти это ограничение, используя последовательное соединение суперконденсаторов, но при этом уменьшается суммарная емкость, также возникает проблема балансировки напряжений. Из-за разброса значений внутренних сопротивлений суперконденсаторов и их емкости напряжения на них будут отличаться. Если на каком-либо суперконденсаторе напряжение превысит номинальное значение, то в нем произойдут необратимые процессы [1]. Поэтому возникает необходимость ограничивать напряжение.

Это достигается за счет балансировки суперконденсаторов при их заряде. Существует два вида балансировки: пассивная и активная. Первый вид хотя и имеет простую схему реализации, когда суперконденсаторы шунтируются постоянными резисторами равного сопротивления, но имеет достаточно низкий КПД. Второй вид балансировки намного эффективнее [2], он и будет проанализирован в данной статье.

Для анализа дисбаланса напряжений на суперконденсаторах разной емкости в процессе заряда промоделируем в Multisim схему, приведенную на рис. 1. В схему заряда подключены два последовательно соединенных суперконденсатора. Условно

выберем рабочее напряжение каждого суперконденсатора, равное 2,7 В при номинальной емкости 50 Ф с разбросом по емкости 10 %, следовательно, при наихудшем варианте получим, что емкости суперконденсаторов равны 45 и 55 Ф.

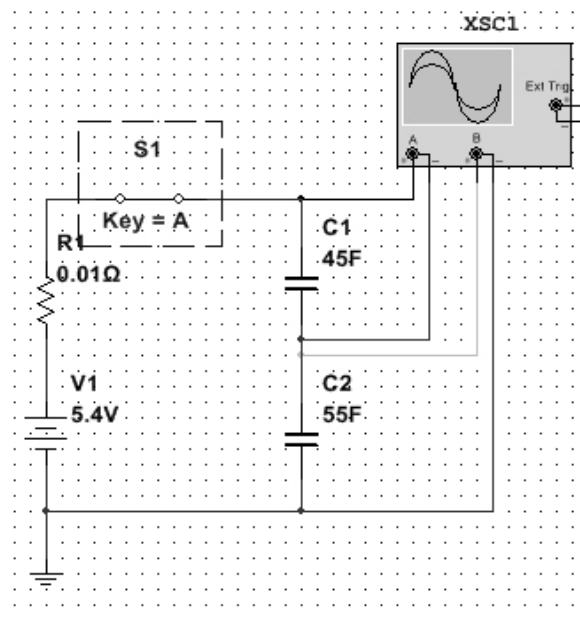


Рис. 1. Схема исследования заряда последовательно соединенных суперконденсаторов

В результате моделирования получаем следующую осциллограмму напряжения (рис. 2). На данном графике можно наблюдать, что напряжение на суперконденсаторе с емкостью 45 Ф растет значительно быстрее, чем на конденсаторе с емко-

стью 55 Ф. При почти полном завершении заряда суперконденсаторов на первом будет напряжение 2,943 В, на втором – 2,408 В. Но как указывалось выше, при превышении напряжения на суперконденсаторе выше рабочего значения происходят

необратимые процессы, что категорически не допускается.

Рассмотрим активную балансировку, построенную на основе регулируемого стабилизатора TL431ACD, приведенную на рис. 3.

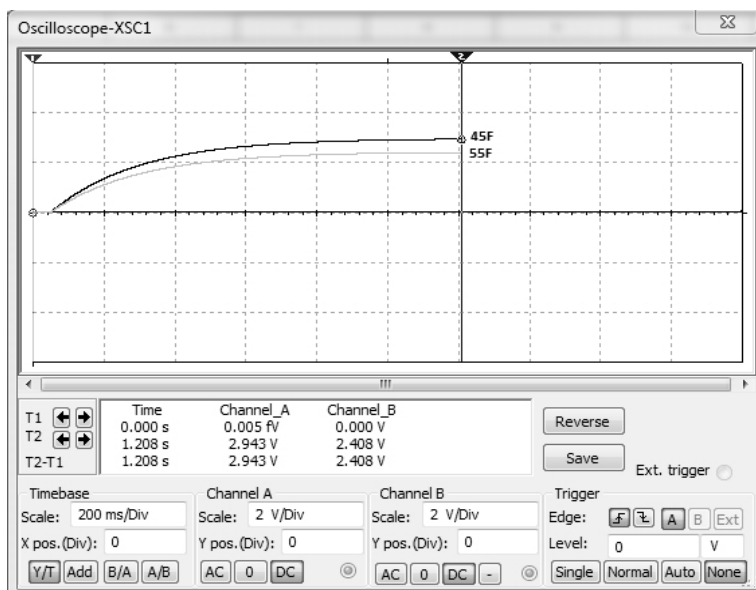


Рис. 2. Осциллограмма напряжений на суперконденсаторах при заряде

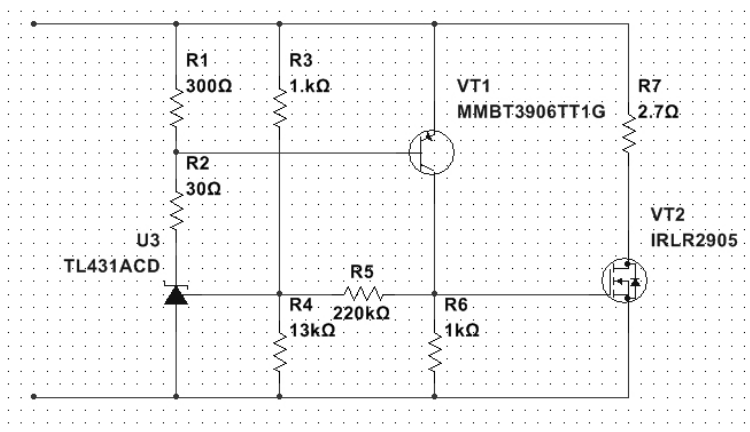


Рис. 3. Активная балансировка на основе TL431

Чтобы выполнить данную активную балансировку, необходимо было превратить TL431ACD в триггер Шмитта. Этого удалось добиться, добавив в схему *p-n-p*-транзистор VT1 и резистор R5. Делителем R3, R4 определяется порог контролируемого напряжения. В момент, когда напряжение на управляющем электроде достигает 2,5 В, TL431ACD – открывается, открывается при этом и транзистор VT1. Потенциал коллектора повышается, и часть этого напряжения через резистор R5 поступает в цепь управляющего электрода TL431ACD. При этом TL431ACD лавинообразно входит в насыщение. Схема приобретает ярко выраженный гистерезис – включение происходит при 2,700 В, а выключение – при 2,690 В. В этом случае на затворе силового ключа формируется управляющий импульс с очень крутыми фронтами, и попадание силового

ключа в активный режим исключено. При этом потеря энергии на силовом ключе минимальна. Эту схему можно легко настроить для контроля любого напряжения (делителем R3, R4). Величина максимального тока балансировки определяется резистором R7 и напряжением на суперконденсаторе. Возникает вопрос о величине максимального тока балансировки [3].

Рассмотрим конкретный случай. Возьмем два последовательно соединенных конденсатора с номинальной емкостью $C_{NOM} = 300$ мФ и разбросом по емкости $d = 10\%$ ($C_1 = 270$ мФ и $C_2 = 330$ мФ) с рабочим напряжением $U_{OP} = 2,7$ В, при этом суммарное сопротивление цепи $r = 0,54$ Ом. Данные значения выбраны из принципа оптимальной работы программы Multisim.

Рассчитаем переходные процессы. Начальные условия: $U_{C1} = U_{C2} = 0$, $U_{IN} = 0$. При включении источника ЭДС $U_{IN} = 5,4$ В через конденсаторы начинает протекать ток заряда I_{CH} , который определяется по формуле

$$I_{CH}(t) = \frac{U_{IN}}{r} \cdot e^{\frac{t}{r \cdot C_{MOD}}}, \quad (1)$$

где C_{MOD} – суммарная емкость модуля, определяемая по формуле

$$C_{MOD} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Для того чтобы определить необходимый максимальный ток балансировки I_{BAL} , нужно найти зарядный ток в момент времени T , соответствующий $U_{C1} = U_{OP}$. Данное время определяется по формуле

$$T = r \cdot C_{MOD} \cdot \ln \frac{100}{d}. \quad (3)$$

Подставив уравнение (3) в уравнение (1), находим

$$I_{BAL} = I_{MAX} \cdot \frac{d}{100}, \quad (4)$$

где I_{MAX} – максимальный ток заряда, который можно определить как

$$I_{MAX} = \frac{U_{IN}}{r} = \frac{5,4}{0,54} = 10 \text{ А}, \quad (5)$$

тогда

$$I_{BAL} = 10 \cdot \frac{10}{100} = 1 \text{ А}.$$

Следовательно, величина $R7$ определяется по формуле

$$R7 = \frac{U_{OP}}{I_{BAL}} = \frac{2,7}{1} = 2,7 \text{ Ом}. \quad (6)$$

Проведем моделирование заряда двух последовательно соединенных конденсаторов, используя при этом активную балансировку (рис. 4, 5).

На осциллограмме напряжений показан процесс заряда двух конденсаторов $C_1 = 270$ мФ (черный график) и $C_2 = 330$ мФ (серый график). На данной осциллограмме можно пронаблюдать, что конденсатор C_1 заряжается быстрее, так как имеет меньшую емкость, но при достижении напряжения 2,7 В его шунтирует активная балансировка, тем самым ограничивая напряжение на нем. Для наблюдения работы активной балансировки подключим вывод осциллографа В так, чтобы он снимал график напряжения подаваемого на затвор полевого транзистора (рис. 6, 7).

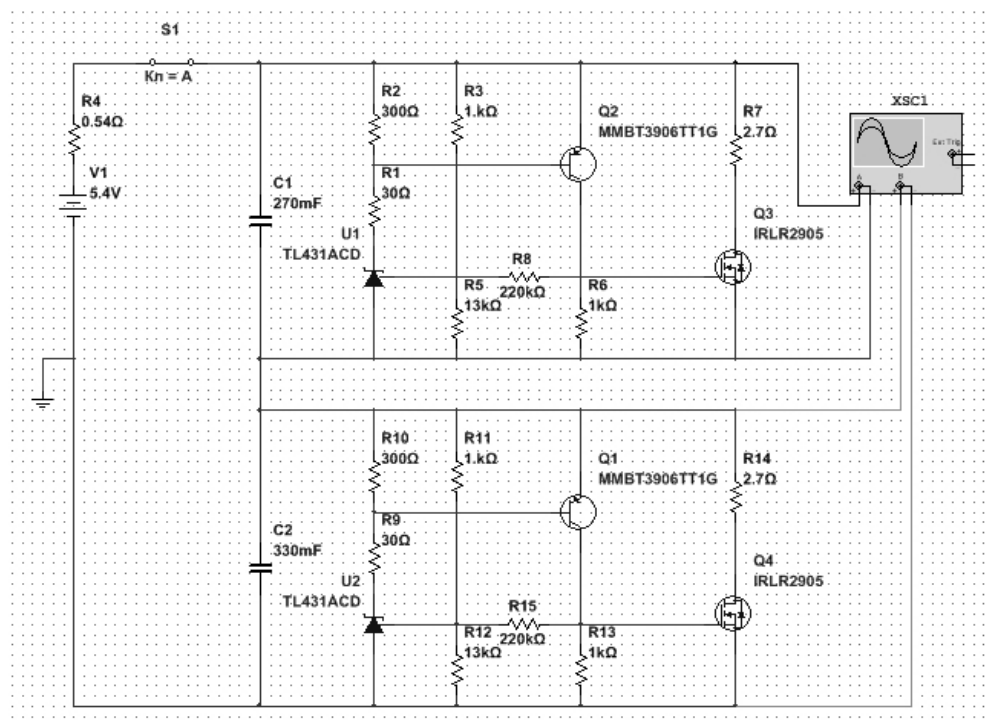


Рис. 4. Схема для моделирования заряда двух последовательно соединенных конденсаторов с использованием активной балансировки

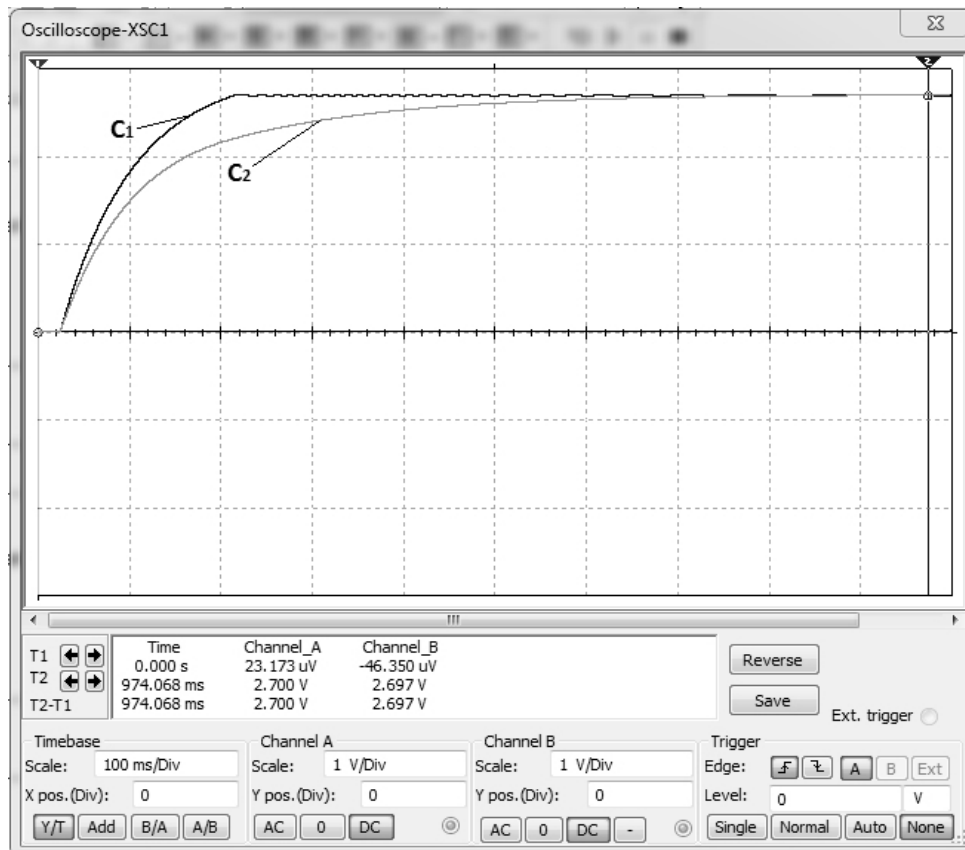


Рис. 5. Осциллограмма напряжений на конденсаторах

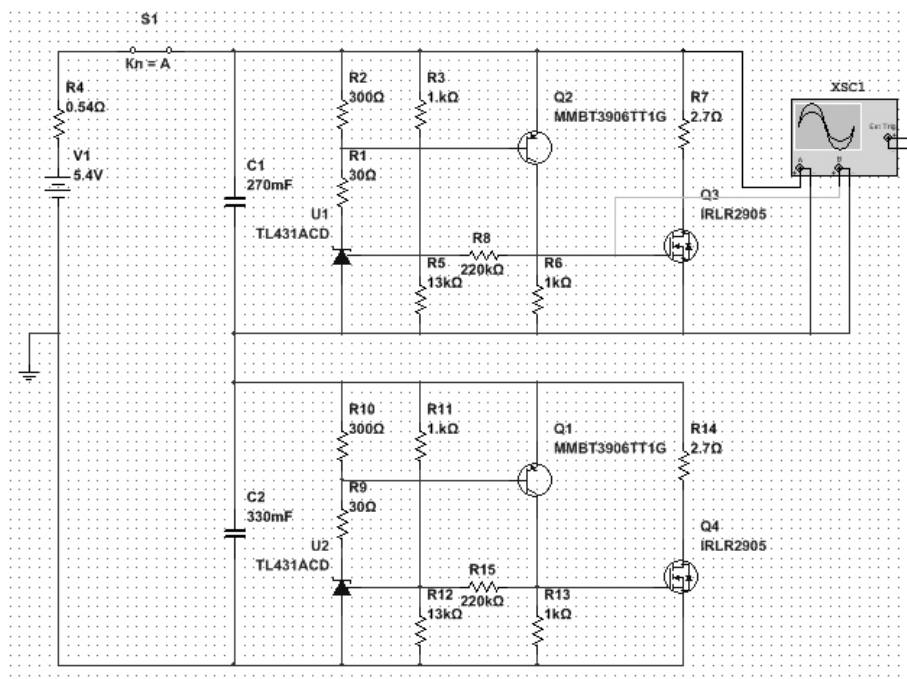


Рис. 6. Схема для наблюдения работы активной балансировки

На рис. 7 приведены осциллограммы напряжения на первом конденсаторе (черный график) и напряжения подаваемого на затвор полевого транзистора (серый график). Из данной осциллограммы видно, что при достижении напряжения 2,7 В полевой транзистор открывается и ток проходит по шунту балан-

сировки, но при достижении напряжения 2,690 В он закрывается, что обуславливается гистерезисом схемы активной балансировки.

Рассмотрим случай, когда необходимый ток балансировки уменьшен в два раза, т. е. сопротивление шунта $R7 = 5,4 \text{ Ом}$ (рис. 8, 9).

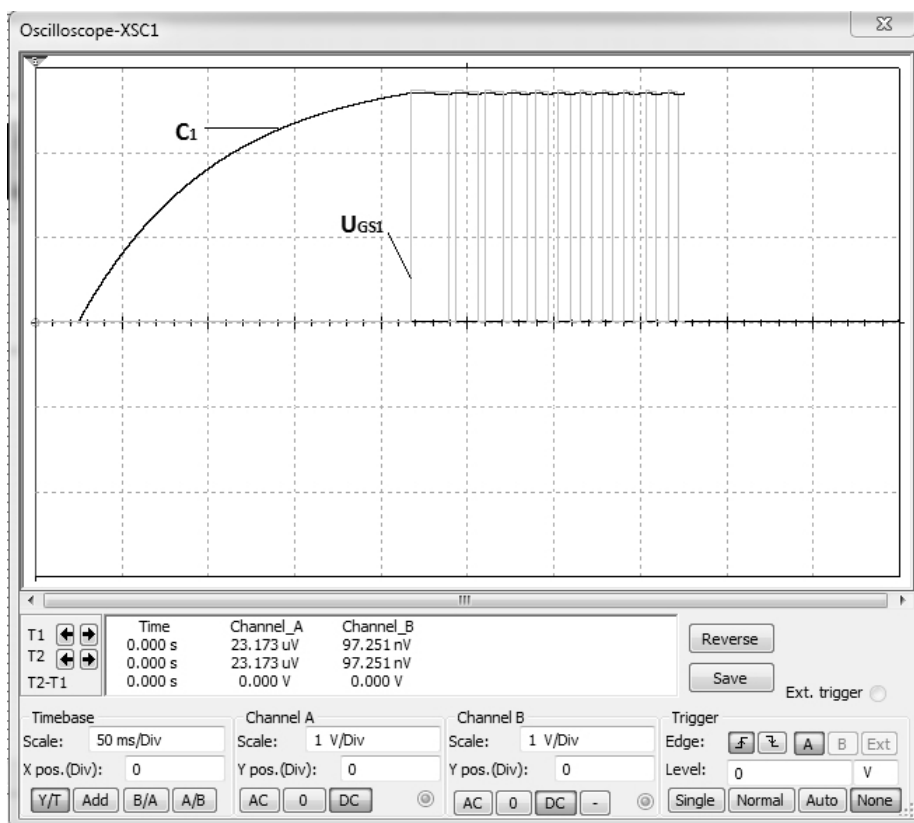


Рис. 7. Осциллограмма напряжений

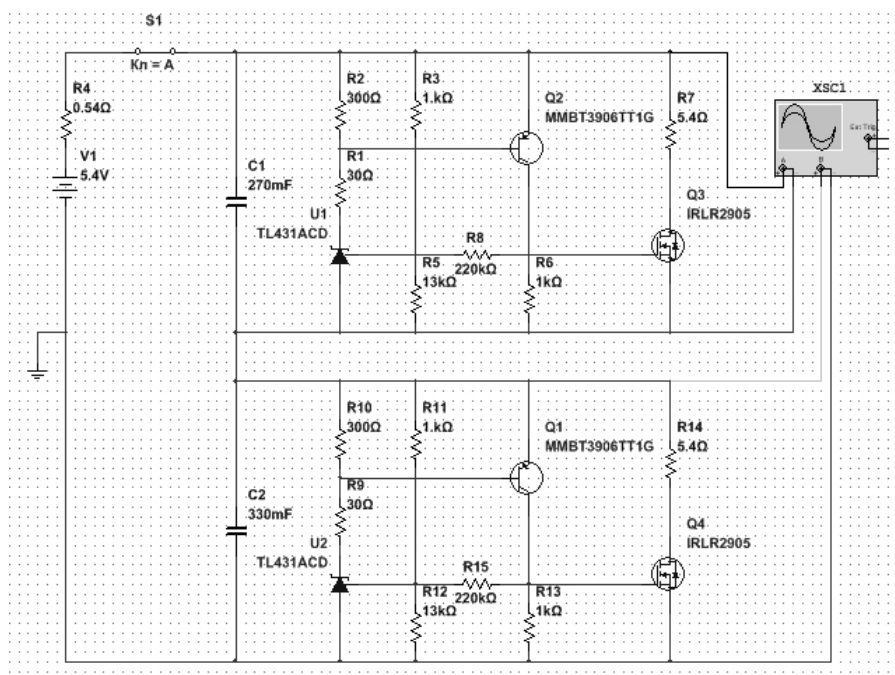


Рис. 8. Схема с недостатком тока балансировки в два раза

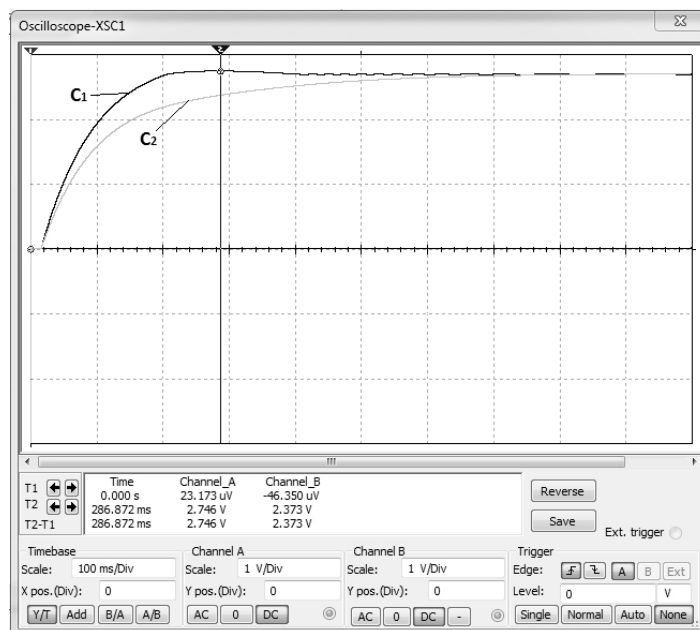


Рис. 9. Осциллограмма напряжений на конденсаторах при недостатке тока балансировки в два раза

На осциллограмме напряжений показан процесс заряда двух конденсаторов $C_1 = 270$ мФ (черный график) и $C_2 = 330$ мФ (серый график) с недостатком тока балансировки в два раза. На кривой заряда первого конденсатора C_1 заметен «горб», который свидетельствует о том, что шунт активной балансировки не справляется со своей задачей. Длительность и высота этого «горба» могут быть достаточно большими, что представляет опасность для конденсатора и модуля в целом.

Заключение

Эффективным решением проблемы ограничения напряжений конденсаторов является применение активной балансировки с током, определяемым максимально допустимым током заряда и разбросом значений емкостей модуля суперконденсаторов. Данный метод балансировки обеспечивает надежную работу модуля при работе как в режиме заряда

большими токами, так и в режиме хранения заряда. Балансировка с учетом приведенных расчетных формул позволяет гарантировать, что напряжение на каждом суперконденсаторе модуля не превысит заданное значение, в результате обеспечивается надежность и безопасность эксплуатации данных изделий.

Библиографические ссылки

1. Desprez P., Barrailh G., Lavaur P., Rael S., Sharif F., Davat B US Patent 6664766. Supercapacitor balancing method and system, 2003.
2. Азупов В. В., Разуваев Ю. Ю., Чайка М. Ю., Чоноров О. Н. Особенности активной балансировки напряжений суперконденсаторов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Воронеж : Изд-во Воронежского государственного технического университета, 2011. – С. 85–88.
3. Балансир для зарядки литиевых аккумуляторов. СМИ Сайт-ПАЯЛЬНИК 1999–2016. – URL: <http://cxem.net/pitanie/5-295.php> (дата обращения: 27.10.2016).

V. A. Starodubtseva, PhD in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU
M. O. Shklyayev, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU

Active Balancing of Super-Capacitors

The decision for one of problems of using the super-capacitors that complicates their application nowadays is examined in this paper.

As is generally known, due to the low nominal tension of super-capacitors, their application takes place at their successive connection. At production of super-capacitors there is some variation of parameters for capacity. In this connection there is a problem of different speed of charging the super-capacitors, namely, there is probability of recharging of a super-capacitor that can cause its hasp. The necessity appears to limit the super-capacitors voltage at charging. For verification of theoretical information the simulation of charging the successively connected super-capacitors is carried out in the Multisim software.

In the paper the key steps of designing the scheme of the device are considered to limit the voltage of super-capacitors that will be the active balancing. The calculation of basic parameters of this balancing is presented. To confirm the serviceability of the proposed scheme, the simulation is carried out for successively connected super-capacitors with application of the developed active balancing. The results of the carried out simulation are described. For demonstrative presentation of the principle of operation of the active balancing at simulation, the oscillograms of voltages for internal circuit nodes are additionally shown out. To prove the importance of the correct calculation of parameters of the scheme, simulation has been carried out for incorrectly chosen parameters of the active balancing. Description and analysis of results of this simulation are given.

The efficiency of solving the problem of charging the successively connected super-capacitors is considered in conclusion. The question of reliability and energy efficiency of applying the modules of super-capacitors is described. The present paper allows for revealing the issue of accelerating the implementation of applying the super-capacitors as energy accumulators.

Keywords: active balancing, super-capacitors, current of balancing, simulation, Multisim.