

Измерения параметров суперконденсаторов на постоянном токе методом циклического заряда и разряда

Ю. Ю. РАЗУБАЕВ

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, e-mail: RazuvaevYY@mail.ru

Рассмотрены метод и автоматизированная установка для измерений емкости, эквивалентного последовательного сопротивления, коэффициента полезного действия и среднего тока утечки суперконденсаторов на постоянном токе.

Ключевые слова: суперконденсатор, емкость, эквивалентное сопротивление, автоматизация измерений.

The article considers method of capacity, equivalent series resistance, efficiency and average leakage current measurement by direct current. Its practical realization in automated measuring apparatus is suggested.

Key words: ultracapacitor, capacity, equivalent series resistance, automation measuring.

Суперконденсаторы (СК) или ионисторы, конденсаторы с двойным электрическим слоем, ультраконденсаторы — относительно новая разновидность электрических конденсаторов, они занимают промежуточное положение между традиционными электролитическими конденсаторами и аккумуляторами по таким параметрам, как удельная энергия и мощность [1]. Емкость современных промышленных образцов достигает тысяч фарад, а разрядные токи тысяч ампер в рабочем диапазоне температур $-40...+65$ °С. Применение СК перспективно на транспорте, в энергетике, бытовой электронике. Наиболее востребованы они на транспорте — в системах зажигания и гибридных автомобилях. За рубежом СК выпускают в промышленных масштабах, а в нашей стране пока существует лишь мелкосерийное производство.

Одна из проблем, с которой сталкиваются отечественные разработчики, измерение параметров СК. Использовать стандартное измерительное оборудование затруднительно ввиду огромных значений емкостей. Крупный иностранный производитель Maxwell Technologies предлагает измерять параметры СК на постоянном токе методом циклического заряда и разряда [2]. Автором статьи разработано несколько автоматизированных измерительных установок, реализующих данный принцип измерений. Ниже представлена методика измерений и экспериментальные результаты.

Теоретическое обоснование методики измерений. Ограничимся рассмотрением простейшей модели СК, включающей емкость C и эквивалентное последовательное сопротивление R_s . Традиционно для измерений параметров конденсаторов используют измерители импеданса. Однако в случае СК этот метод сопряжен с трудностями. На низких частотах импеданс СК оказывается чрезвычайно малым, например, на частоте 10 Гц импеданс конденсатора емкостью всего лишь 1 Ф составляет около 16 мОм. Данный метод, в принципе, позволяет измерить R_s , но C , R_s зависят от частоты. При больших частотах уменьшается как мнимая,

так и действительная составляющие импеданса [3], что можно трактовать как уменьшение C и R_s . Характеристики СК в режиме больших токов могут существенно отличаться от измеренных при маломощном сигнале.

Если предполагается эксплуатация СК в импульсном режиме, то нужно каким-то образом учитывать результаты измерений на сверхнизкой и высокой частотах, поскольку в момент коммутации могут происходить высокочастотные процессы, а в периоды продолжительного заряда или разряда — низкочастотные. Поэтому практичнее оказывается метод измерений на постоянном токе (рис. 1). При известном токе емкость определяется длительностью процесса перезарядки от одного напряжения до другого, а R_s — скачком напряжения при включении и выключении тока.

В [2] предложено измерять C в диапазоне напряжений от $U_{ном}/2$ до $U_{ном}$, а R_s только при выключении тока. При этом результаты первого цикла не берутся в расчет, поскольку СК еще не «активирован». Выбор верхней половины напряжений обусловлен тем, что в этом диапазоне меньше погрешность измерения емкости СК, связанная с ее нелинейностью, а также тем, что в большинстве приложений СК при работе не разряжаются до конца. Рекомендация относитель-

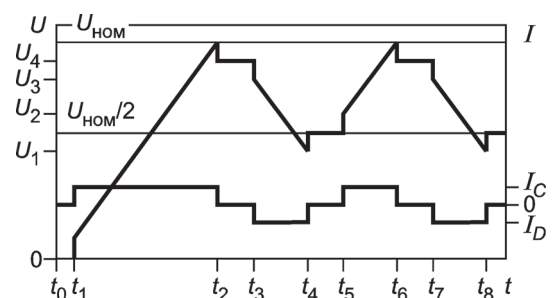


Рис. 1. Изменение напряжения и тока идеального СК в процессе измерения

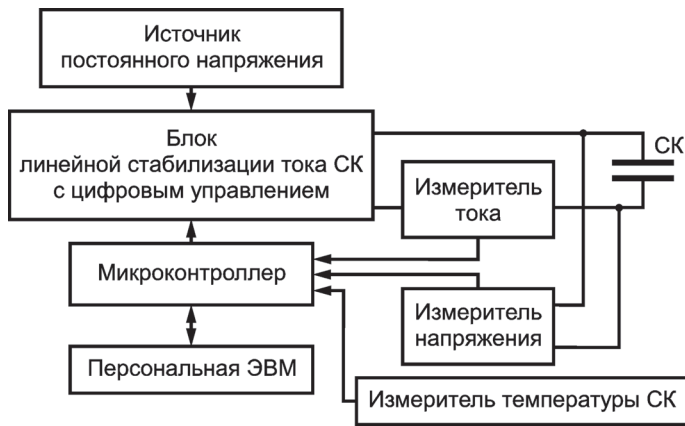


Рис. 2. Структурная схема измерительной установки

но R_3 связана с тем, что на практике ток СК стабилизируется относительно медленно, особенно если используется импульсный источник тока, поэтому измерение R_3 при выключении тока является более точным.

Итак, в соответствии с методикой [2] и рис. 1 можно воспользоваться формулами

$$C_C = I_C(t_6 - t_5)/(U_{\text{ном}} - U_2), \quad C_D = I_D(t_8 - t_7)/(U_3 - U_1); \quad (1)$$

$$R_C = (U_{\text{ном}} - U_4)/I_C, \quad R_D = (U_{\text{ном}}/2 - U_1)/I_D.$$

Следует отметить, что формулы (1) в рамках используемой модели правильнее представить в виде

$$C_C = I_C(t_6 - t_5)/(U_4 - U_{\text{ном}}/2), \quad C_D = I_D(t_8 - t_7)/(U_4 - U_{\text{ном}}/2), \quad (2)$$

что удобнее для практических измерений. Во-первых, в данной упрощенной модели формулы (1), (2) должны давать одинаковые результаты. Во-вторых, при медленном нарастании тока емкость целесообразно измерять после некоторой задержки, исключая из расчета переходный процесс, что можно учесть в (1).

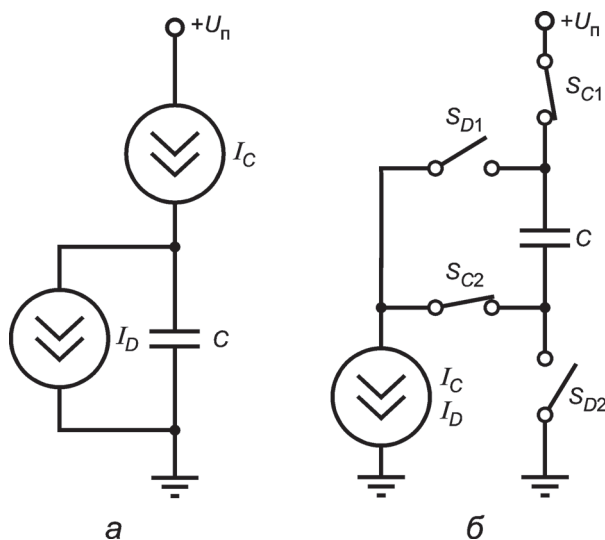


Рис. 3. Варианты реализации блока линейной стабилизации тока:
а — с двумя стабилизаторами, б — с одним стабилизатором

Кроме C и R_3 , методом циклического заряда и разряда постоянным током можно измерить еще два важных параметра: коэффициент полезного действия (КПД) η и средний ток утечки $I_{\text{ут}}$ за цикл (в [2] эти параметры не рассматриваются). При постоянстве тока заряда и разряда энергия, сообщаемая СК и получаемая от него, определяется площадями под соответствующими графиками напряжения на рис. 1:

$$E_C = \int_{t_5}^{t_6} I_C U dt = I_C \int_{t_5}^{t_6} U dt = I_C S_C; \quad E_D = \int_{t_7}^{t_8} I_D U dt = I_D \int_{t_7}^{t_8} U dt = I_D S_D.$$

Отсюда следует, что КПД при равных токах заряда и разряда определяется отношением площадей:

$$\eta = I_D S_D / (I_C S_C) = S_D / S_C |_{I_D = I_C}. \quad (6)$$

До сих пор ток утечки СК пренебрегали. В [2] предлагается два метода измерений саморазряда СК, каждый из которых требует выдержки времени около 3 сут. Ток утечки можно оценить и методом циклического перезаряда постоянным током, если полагать, что этот ток вычитается из зарядного и складывается с разрядным, а заряд СК за полный цикл не изменяется:

$$(I_C - I_{\text{ут}})T_C = (I_D + I_{\text{ут}})T_D;$$

$$I_{\text{ут}} = (I_C T_C - I_D T_D) / (T_C + T_D) = (Q_C - Q_D) / (T_C + T_D),$$

где T_C , T_D — соответственно длительности заряда и разряда; Q_C , Q_D — заряды соответственно, сообщенный конденсатору при заряде и полученный от него при разряде.

Автоматизированное измерение параметров СК. Рассмотренную методику измерений можно реализовать с помощью устройства, структурная схема которого представлена на рис. 2. По команде ЭВМ микроконтроллер включает заряд или разряд СК заданным током до заданного напряжения и считывает результаты измерений. Для заряда и разряда СК удобно использовать линейные стабилизаторы тока, поскольку их проектирование проще по сравнению с импульсными, они не создают пульсации тока и дополнительные электромагнитные помехи. Можно применить два линейных стабилизатора — один для заряда, другой для разряда или один стабилизатор с блоком электронных ключей для попеременной коммутации цепей заряда и разряда. Первый вариант, изображенный на рис. 3, а, проще в управлении, но сложнее в разработке, поскольку зарядный стабилизатор I_C имеет общий потенциал с положительным электродом СК, напряжение на котором относительно земли изменяется по мере изменения заряда. Кроме того, два стабилизатора на практике не могут быть идентичными, поэтому ток заряда может не совпадать с током разряда при одинаковых заданных значениях. Второй вариант, изображенный на рис. 3, б, сложнее в управлении, но проще в разработке. Используется заземленный стабилизатор и электронные ключи, работающие попарно в противофазе. Так как для заряда и разряда СК используется один и тот же стабилизатор, токи заряда и разряда могут совпадать с большей точностью. Несомненный недостаток этого варианта в том, что стабилизатор будет рассеивать мощность и при заряде, и при разряде, для чего потребуется более мощный транзистор.

В любом из рассмотренных вариантов на линейном стабилизаторе падает некоторое напряжение. Если оно окажется меньше критического значения $U_{кр}$, ток также уменьшится. Поэтому напряжение на СК должно находиться в диапазоне от $U_{кр}$ до $U_n - U_{кр}$, где U_n — напряжение источника питания. Для контроля тока СК в схеме предусмотрен измеритель тока.

Для точного измерения напряжения СК требуется подключить к измерительной установке с помощью четырех проводов: одна пара — силовые, другая — измерительные (дифференциальный сигнал). Измерительные провода должны подсоединяться как можно ближе к выводам СК, иначе R_3 будет содержать дополнительное сопротивление отрезков силовых проводов.

Дополнительную сложность представляет тот факт, что параметры СК могут изменяться во времени. Это может быть связано не только с электрохимическими реакциями, но и с изменением температуры как окружающей среды, так и СК при нагреве в процессе измерения. Поэтому предусмотрено измерение температуры СК.

Обработка результатов измерений. На рис. 4 представлены графики напряжения и тока опытного образца СК, полученные с помощью разработанной автоматизированной измерительной установки, в программе которой пользователь задает токи, напряжение заряда и разряда СК, количество циклов. Хотя приведенные зависимости далеки от идеальных, тем не менее, кривые на рис. 4 отражают характерные особенности поведения СК в процессе измерений. Наблюдаются скачки напряжения при включении и выключении тока, обусловленные R_3 . Электрохимические реакции приводят к специфическим эффектам: после выключения зарядного тока напряжение на СК изменяется скачком и продолжает медленно уменьшаться, а после выключения тока разряда напряжение на СК скачком возрастает и продолжает медленно увеличиваться. Указанные эффекты мешают измерению R_3 , поскольку затрудняют определение конечных точек скачков напряжения. На рис. 4 отмечены начальные и конечные точки, которые программа выделила автоматически.

В разработанной программе предусмотрено введение паузы между фазами заряда и разряда. При этом возникают вопросы: требуется ли выдерживать большую паузу для установления равновесного напряжения СК, будут ли в этом случае результаты измерений более точными. К сожалению, основной проблемой является отсутствие эталонов СК и эталонных измерительных приборов. В практической работе автор использовал заявленные производителем параметры импортных СК, которые имеют погрешность до 20 %, что связано с погрешностями не только измерений и технологии производства СК, но также дрейфом параметров.

Зависимости $U(t)$ на рис. 4 отражают влияние нелинейности емкости, причем зарядная часть искривлена больше разрядной. В рамках используемой модели

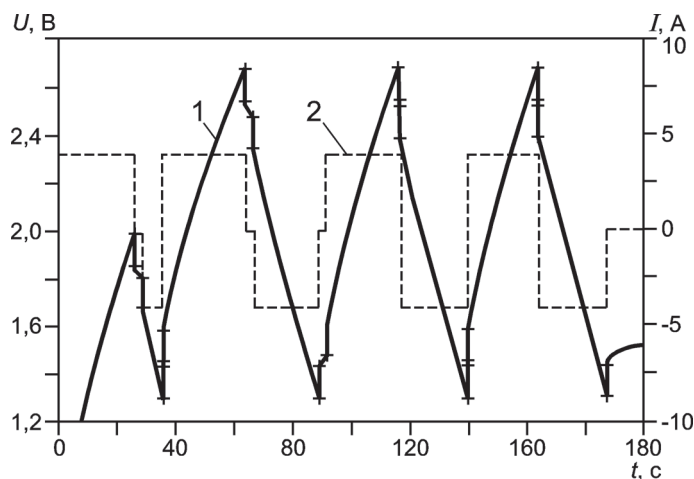


Рис. 4. Графики напряжения 1 и тока 2 СК, полученные экспериментально

нелинейность емкости не рассматривается, однако нелинейность кривых влияет на измеряемое значение КПД, поэтому его можно рассматривать как самостоятельный параметр, а не производный от R_3 .

В процессе измерений разработанная программа формирует таблицу результатов, каждая строка которой соответствует полному циклу заряда и разряда. Последние две строки содержат соответственно среднее и относительное среднее квадратическое отклонение измеренных значений. Параметры СК изменяются от цикла к циклу, при этом имеется тенденция уменьшения значений C , R_3 и $I_{ут}$ с сопутствующим этому увеличением КПД. Напомним, что в качестве примера рассмотрены результаты измерений параметров опытного образца СК. У импортных промышленных образцов СК характеристики стабильнее. Первый цикл, как и в [2], дает результаты с наибольшими отклонениями. Таким

Результаты измерений параметров опытного образца СК

C_C , Ф	C_D , Ф	R_C , МОм	R_D , МОм	E_C , Дж	E_D , Дж	Q_C , Кл	Q_D , Кл	η , %	$I_{ут}$, мА
89,7	78,9	34,75	33,50	218,11	153,33	98,46	85,34	70,3	285,52
84,0	79,5	34,25	33,25	204,13	155,56	92,16	86,46	76,21	127,55
83,0	79,5	34,00	33,00	202,01	156,37	91,30	86,88	77,41	99,14
82,7	79,5	33,75	32,75	201,51	156,82	91,10	87,04	77,82	91,25
82,3	79,5	33,5	32,75	200,97	156,72	90,88	86,98	77,98	87,50
82,0	79,4	34,25	32,75	200,33	156,82	90,59	86,98	78,28	81,46
81,8	79,1	33,00	32,50	199,79	156,87	90,34	86,98	78,52	75,80
81,6	78,9	33,00	32,50	199,43	156,85	90,18	86,91	78,65	73,73
81,5	79,1	32,50	32,50	199,15	156,69	90,02	86,82	78,68	73,39
81,1	78,8	32,50	32,50	198,43	156,54	89,73	86,72	78,89	68,19
81,1	78,6	32,50	32,50	198,09	156,63	89,54	86,72	79,07	63,91
Среднее значение									
82,8	79,2	33,46	32,75	201,99	156,29	91,30	86,71	77,44	102,43
Относительное среднее квадратическое отклонение, %									
2,82	0,43	2,29	1,03	2,65	0,64	2,61	0,53	3,08	58,9

образом, обработка результатов измерений представляет нетривиальную задачу. Первые циклы всегда нужно исключать из статистики, последующие требуют дополнительного анализа. Однако явно недостаточно анализировать только средние значения параметров СК и дисперсию, требуется исследовать их температурный дрейф, что позволит судить о стабильности, определять номинальные значения и возможные отклонения.

Обсуждение результатов. Как было отмечено, основная специфика СК заключается в изменении их параметров в процессе измерений. Рассматриваемая методика на практике позволяет решать одновременно две задачи: тренировки СК и измерения их параметров. При тренировке сначала СК поляризуют, выдерживая под постоянным напряжением несколько часов, после чего можно отбраковать СК со слишком большими $I_{\text{ут}}$ [2]; затем их циклически заряжают и разряжают. В процессе тренировки происходят электрохимические реакции, и параметры СК постепенно выходят на номинальные значения. По завершении этого этапа возможна отбраковка и сортировка СК по параметрам. Сортировка по группам с наиболее близкими параметрами необходима для создания суперконденсаторных модулей, которые содержат N последовательно соединенных конденсаторов. Номинальное напряжение модуля может быть в N раз больше, чем у отдельного СК, однако при этом в N раз уменьшается емкость и возникает проблема выравнивания или ограничения напряжений на СК [4—6].

Заключение. Для разработки и производства СК, а также систем на их основе необходимо иметь возможность измерять параметры, контролировать качество [4]. Подробно рассмотрена методика измерений параметров СК на постоянном токе методом циклического заряда и разряда. В [2] данным методом предлагается измерять только C и R_s , но оказывается можно измерять еще КПД и средний ток утечки. Методика теоретически обоснована и практически реализуема. Автором разработано и изготовлено четыре автоматизированных измерительных установки: две с рабочими токами до 150 А, которые требуются для измерений параметров мощных СК емкостями до 2000 Ф, и две — до 10 А, что достаточно для конденсаторов емкостями не более 200 Ф. Описан принцип работы этих установок, рассмотрены и про-

анализированы экспериментальные результаты. Измерение параметров СК имеет специфику. Важно понимать, что электрохимические процессы и изменение температуры влияют на результаты измерений, их достоверность и точность.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК»), контракт № 12128p/20823 от 29.07.2013 г.

Л и т е р а т у р а

1. **Беляков А. И.** Электрохимические суперконденсаторы: текущее состояние и проблемы развития // Электрохимическая энергетика. 2006. Т. 6. № 3. С. 146—149.
2. **Maxwell Technologies.** Maxwell Technologies' Test Procedures for Capacitance, ESR, Leakage Current and Self-Discharge Characterizations of Ultracapacitors // Application Note. 2009. [Электрон. ресурс]. http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/applicationnote_maxwelltestprocedures.pdf (дата обращения 15.01.2015 г.)
3. **Деспотули А., Андреева А.** Суперконденсаторы для электроники (Ч. 1) // Современная электроника. 2006. № 5. С. 10—14.
4. **Бобрешов А. М., Разуваев Ю. Ю., Чайка М. Ю., Агунов В. К.** Разработка электронных систем для отечественных суперконденсаторных модулей // Радиолокация, навигация, связь: Материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2013. Т. 2. С. 1307—1313.
5. **Агунов В. В., Разуваев Ю. Ю., Чайка М. Ю., Чопоров О. Н.** Особенности активной балансировки напряжений суперконденсаторов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 10. С. 85—88.
6. **Разуваев Ю. Ю., Чайка М. Ю., Агунов В. В., Горшков В. С., Силютин Д. Е.** Методы балансировки напряжений суперконденсаторных элементов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 7—2. С. 101—105.

Дата принятия 12.03.2015 г.