

УДК 621.317.73

В.В. МАРТИНЮК, М.Л. ЕПЕЛЬФЕЛЬД
Хмельницький національний університет

ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО СУПЕРКОНДЕНСАТОРА

Наведені результати моделювання роботи суперконденсатора Boostcap® 650 Ф при його підключенні до експериментального макету. Отримана повна теплова характеристика суперконденсатора.

The supercapacitor modeling results are shown for Boostcap® 650 F during his connection to the experimental model. The complete thermal characteristic of supercapacitor is obtained.

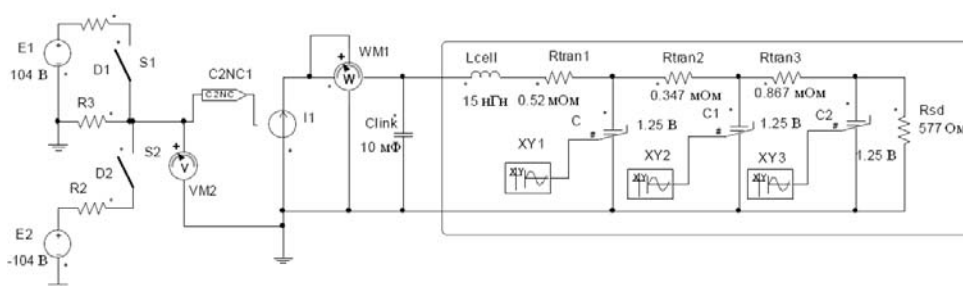
Вступ

Останнім часом значна увага сконцентрована на суперконденсаторах. В їх розвитку відбувається значний прогрес. Такі широко відомі компанії як «Maxwell», «Siemens Matsushita» («EPCOS»), «NEC», «Tokin» займаються дослідженням та виготовленням електрохімічних конденсаторів із подвійним електричним шаром. Проте досі проблема температурних властивостей суперконденсатора є недостатньо вивченою. Проводяться певні дослідження у даному напрямі, наприклад, у роботі [1] показано дослідження залежностей ємності та еквівалентного послідовного опору від температури методом електрохімічної імпедансної спектроскопії. У [2] досліджується теплова характеристика суперконденсатора. Вплив температурних змін на цикли заряду та розряду суперконденсатора, який встановлюється в пересувних пристроях чи автомобілях, розглянуто в [3]. У роботі [4] показаний вплив температурних коливань на ефекти старіння суперконденсатора.

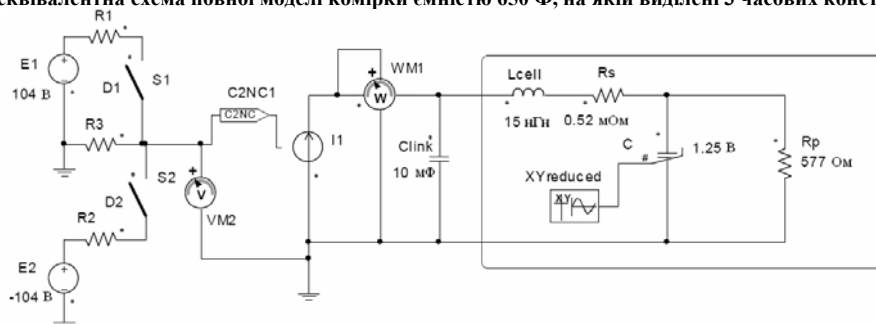
Температура, при якій працює суперконденсатор, грає важливу роль при визначенні його терміну служби, кількості циклів заряду-розряду [1]. При роботі за межами визначеного температурного діапазону можливий швидкий вихід з ладу суперконденсатора. Тому створення математичних моделей для дослідження температурних властивостей суперконденсаторів є досить важливою задачею. Це дозволить виробникам надавати дані, які приблизно оцінюють термін служби суперконденсаторів для умов, що відрізняються від рекомендованих у специфікаціях (номінальна напруга, температура тощо). Такі дані дозволять значно зменшити витрати часу та матеріальних ресурсів, пов'язані із достроковим виходом з ладу суперконденсаторів.

Еквівалентна схема суперконденсатора для моделювання

Тестування проводилось на комірці ємністю 650 Ф і в моделюванні використовувалась повна та спрощена моделі, показані на рис. 1. Тестування цієї комірки займає приблизно 2 год при діючому значенні струму 90 А. Температура навколишнього середовища становила 26° С.



а) еквівалентна схема повної моделі комірки ємністю 650 Ф, на якій виділені 3 часових константи



б) еквівалентна схема спрощеної моделі: $R_s = ESR_{dc}$ (вимірювання за методом міжнародної електротехнічної комісії, МЕК) і $C(U) = \sum C_i(U)$
Рис. 1. Повна та скорочена еквівалентні схеми заміщення суперконденсатора

На рис. 1 зображено суперконденсатор, який під'єднується до джерела струму із часовим керуванням. Амплітуда цього джерела визначається джерелами напруги E1 та E2 (показаний випадок для коефіцієнту режиму роботи 70%). Імпульсна синхронізація під час заряду задається перемикачем S1, а при розряді – S2. Як видно із рис. 1 спрощена модель має номінальну індуктивність комірки (однакову для спрощеної та повної моделей), але для повної моделі $R_S=R_{tran1}$. Ємність в спрощеній моделі – це величина, яка може бути виміряна в лабораторних умовах для нелінійної поведінки у всьому робочому діапазоні напруги. Детально визначення ємності розглянуто в роботі [2].

Комутація перемикачів керування на рис. 1 та їх електричне з'єднання з блоком живлення досягається завдяки програмним машинним станам, зображеним на рис. 2. Лічильник циклів відслідковує число половинних циклів, прикладених до моделі суперконденсатора.

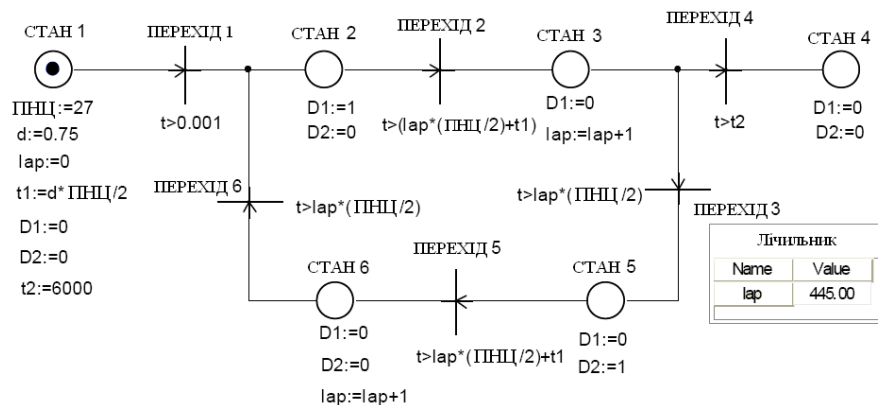


Рис. 2. Машинні стани, що керують формою струму суперконденсатора для різних коефіцієнтів режиму роботи, контрольні сигнали D1 і D2 керують програмованими перемикачами S1 і S2, для встановленого коефіцієнта режиму роботи, d

Опитування повинно проводитись, коли параметри контролера встановлені в положення «1». Коефіцієнт режиму роботи (d) і тривалість (t₁) широтно-імпульсної модуляції (PWM) не потребують пояснення.

Змінний період напівциклу (ПНЦ) на рис. 2 показує час через стан 2 + стан 3, чи, стан 5 + стан 6 для заряду чи розряду напівциклів відповідно.

Для задання періоду напівциклу, ПНЦ, необхідно знати середнє значення ємності <c(u)> в діапазоні зміни напруги. В показаних випадках початковий стан суперконденсаторів, U_{c0}=1,25 В такий:

$$Q = C_0 \cdot (U_{max} - U_{min}) = 604 \cdot (2,75 - 1,25) = 906 \text{ (Кл)},$$

$$Q = I_{pk} \cdot t,$$

$$t_1 = d \left(\frac{\text{ПНЦ}}{2} \right) = \frac{Q}{I_{pk}} = \frac{906}{142,8} \Big|_{d=40\%} = 6,344 \text{ (с)},$$

$$\Rightarrow \text{ПНЦ} = \frac{2t_1}{d} \Big|_{d=40\%} = 31,72 \text{ (с)}.$$

Далі, повна тривалість проходження струму встановлюється з використанням параметру t₂ в машині станів. Перехід Т4 вірний, коли час проходження рівний t₂, точка стану 4 встановлена і обидва програмовані перемикачі S1 і S2 встановлені в 0 (OFF, вимкнені).

Моделювання над інтервалом охолодження встановлене всередині симулятора як кінцевий час. У даному випадку час проходження t₁ = 6000 с, а час роботи симулятора встановлений до 9600 с (2,7 год). Таблиця 1 підсумовує параметри комірки ємністю 650 Ф.

Таблиця 1

Ультраконденсатор Boostcap® 650Ф; 2,7 В– параметри використані для теплової оцінки

Ємність при 2,2В	ESR _{dc} (значення МЕК) при T ₀ =значення	Тепловий опір	Теплова ємність	Теплова постійна часу
604 Ф	0,34 мОм при T ₀ =26° С	6,8° С/Вт	188,57 Дж/°С	1282,3 с (21,37 хв)

Теплова математична модель

Теплова модель комірки, ємністю 650 Ф, зображена на рис. 3. Температура навколишнього середовища встановлена 299 К (273+26°С) з джерелом нагріву, яке керується суматором внутрішніх втрат моделі електричної еквівалентної схеми.

Температура комірки вимірюється за допомогою температурного зонду (у вигляді символу термометра). Виявляється, що коефіцієнт режиму роботи має мінімальний вплив або не впливає на результуючий повний тепловий відгук, особливо при температурній рівновазі. Відмінністю повного теплового відгуку є наявність теплових скачків на кожному зарядному чи розрядному імпульсі.

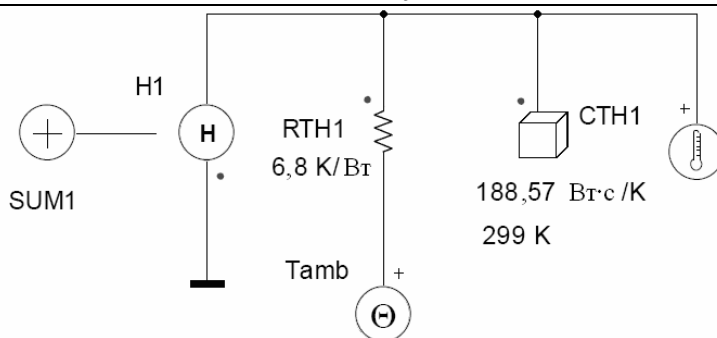
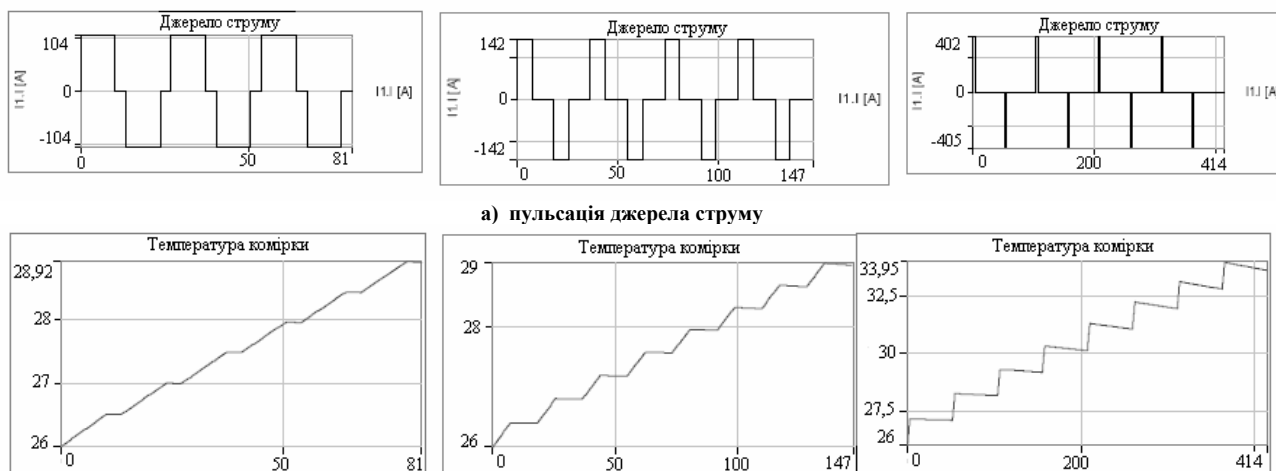


Рис. 3. Теплова модель комірки, ємністю 650 Ф

Рисунок 4 узагальнює поведінку моделі на початковій стадії для різних коефіцієнтів режиму роботи, але всі вони характеризуються середньоквадратичним значенням струму 90 А. Теплові скачки, показані на рис. 4б, пов'язані з характером пульсації струму на рис. 4а.



б) зростання температури при діючому значенні струму 90 А і коефіцієнтах режиму роботи 75%, 40%, 5% відповідно

Рис. 4. Пульсація джерела струму та початковий підйом температури в залежності від коефіцієнту режиму роботи

При коефіцієнті режиму роботи, що становить 75%, скачки помірно стають крутішими, а потім ще крутішими для 40% і нарешті, для 5% – дуже гострими.

Результати досліджень

В результаті моделювання отримана повна теплова характеристика (рис. 5) для випадків, коли $d=40\%$ при діючому значенні струму 90 А.

Теплова модель була перевірена для всіх коефіцієнтів режиму роботи у випадку діючого значення струму 90 А. Температура рівноваги при $t = 6000$ с (тобто після чотирьох теплових постійних часу) показує хорошу відповідність з виміряною в лабораторії характеристикою.

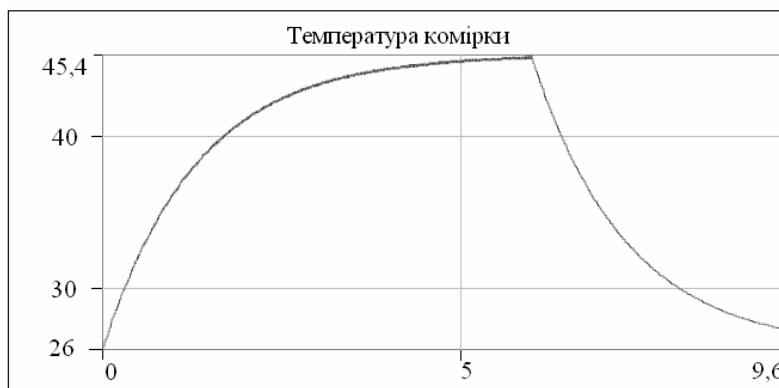


Рис. 5. Повна теплова характеристика для збудження діючого значення струму 90 А при коефіцієнті режиму роботи 40% для 650-ти фарадної комірки без повітряного охолодження. Часова вісь у тисячах секунд, пульсація закінчується при $t = 6000$ с, моделювання зупиняється при $t = 9600$ с

Цікавий характер має температурна характеристика для коефіцієнту режиму роботи 5% (рис. 6). Тут еквівалентний послідовний опір моделі комірки має вище значення, що представляє ефекти старіння. Дане

моделювання ($t_1 = 3000$ с і $t_2 = 5000$ с) займає орієнтовно половину тривалості випадку на рис. 5, через те, що центральний процесор комп'ютера потребує багато часу. На рис. 4б для $d=5\%$ легко помітні тимчасові хвильові ефекти, які стають більш явними при наближенні температури рівноваги (рис. 6).

Таблиця 2

Порівняння теоретичних та експериментальних даних моделювання

Час (с)	Моделювана температура, °С	Виміряна температура, °С
0	26	26
500	32,2	32,7
1000	36,4	37,5
1500	39,2	40,3
2000	41	42,5
3000	43,5	44,5
4000	44,5	45,4
5000	45	45,8
6000	45,3	45,9
7000	35	35,4
9600	27	28

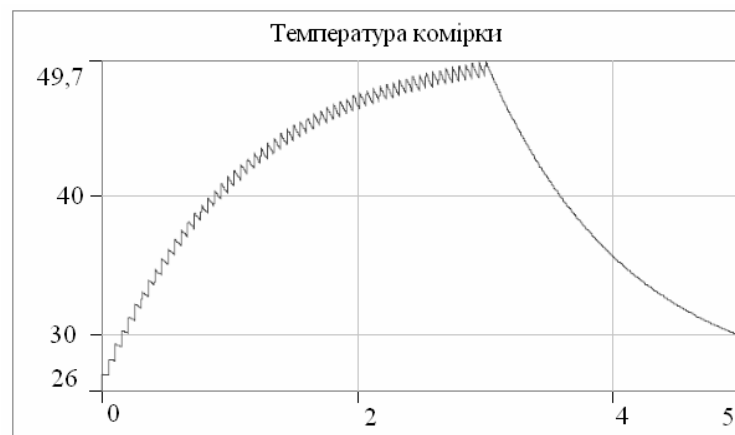


Рис. 6. Повна теплова характеристика для випадку діючого значення струму 90 А при коефіцієнті режиму роботи 5%

Подібна теплова поведінка очікується, коли комірки об'єднуються в модулі і для випадку примусового повітряного охолодження чи рідинного охолодження. У випадках примусового охолодження тепловий опір, показаний на рис. 3б, буде відповідно нижчим.

Висновки

1. В результаті розробки теплової моделі суперконденсатора встановлені теплові скачки, що залежать від імпульсів струму, створюваних джерелом струму із часовим керуванням.
2. Коефіцієнт режиму роботи має мінімальний вплив або не впливає на результуючий повний тепловий відгук, особливо при температурній рівновазі навколишнього середовища та комірки.
3. Отриману теплову модель можна використовувати і при примусовому повітряному охолодженні чи рідинному охолодженні, а також при об'єднанні комірок в модулі.
4. При підвищеному значенні еквівалентного послідовного опору (при $d=5\%$) на графіку теплової характеристики спостерігається хвилеподібний характер теплової характеристики. Дане явище представляє ефекти старіння.
5. Перспективним є створення комп'ютерного вирішення даної математичної моделі. При цьому можливий розрахунок теплової характеристики в залежності від коефіцієнту режиму роботи, наприклад, безпосередньо в бортових комп'ютерах автомобілів. Це також зменшує час дослідження теплової моделі.

Література

1. R. Kötz, M. Hahn, R. Gallay. Temperature behavior and impedance fundamentals of supercapacitors, - Journal of Power Sources 154 (550-555), 2006, Switzerland.
2. Dr. John M. Miller, VP Systems Applications Integration, Maxwell Technologies, Inc., Dr. Uday Deshpande, Director Power Engineering, Maxwell Technologies, Inc. Ultracapacitor Technology: State-of-Technology and Application to Active Parallel Energy Storage Systems. – The 17 International Seminar on Double Layer Capacitors and Hybrid Energy Storage Devices. – Florida, USA, 2007.
3. Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature / H. Gualous, D. Bouquain, A. Berthon, J.M. Kauffmann.– Journal of Power Sources 123 (86-93), France, 2003.
4. Oliver Bohlen, Julia Kowal, Dirk Uwe Sauer. Ageing behaviour of electrochemical double layer

Надійшла 6.3.2009 р.

УДК 621. 38

О.В. ОСАДЧУК, В.П. ДЕУНДЯК, М.В. ДЕУНДЯК
Вінницький національний технічний університет**ОПТИКО-ЧАСТОТНИЙ ТЕМПЕРАТУРНИЙ СЕНСОР**

В статті розглянуто стан, проблеми і перспективи розвитку вимірювання та контролю температури в різних галузях господарства, науки і техніки. Запропоновано засоби для задоволення цієї потреби, а саме оптико-частотний сенсор для виміру температури, що має високі технічно-експлуатаційні характеристики, що і дозволяє його використання в різних галузях народного господарства.

Вступ

Потреба в швидкому безконтактному вимірюванні та контролюванні температури невпинно зростає. Основними засобами для задоволення цієї потреби є оптико-електронні прилади для виміру температури, що об'єднують широкий клас пристроїв. Саме тому метою проведених досліджень є визначення основних параметрів та характеристик оптико-частотного сенсора для виміру температури.

Важливим різновидом сенсорів є сенсори температури, адже багато процесів регулюється відповідно до значення температури. Використання температурних сенсорів, як правило, ґрунтується на вимірюванні залежності електричного опору від температури, за виключенням сенсорів на основі термопар, де виникає електрорушійна сила (ЕРС), пропорційна напрузі.

Для виміру температури в даний час використовуються напівпровідникові або мікроелектронні сенсори, що виконані у вигляді мікросхем, інфрачервоні сенсори, термометри опору, термістори, термопари.

Використання досягнень сучасної мікроелектронної технології привело до значних успіхів у створенні різноманітних пристроїв контролю і управління. Проте часто отримання високих метрологічних характеристик апаратури досягається за рахунок підвищення її складності, габаритів, маси і вартості. Для подальшого суттєвого підвищення якості первинних перетворювачів необхідно використовувати нові фізичні явища і пошук нових принципів реалізації пристроїв, які відзначаються багатофункціональністю, малою споживаною потужністю, стабільністю характеристик, високою чутливістю, підвищеною швидкодією і надійністю. Отже, проблемою, що вирішується в даній статті є дослідження нового приладу для вимірювання температури – оптико-частотного температурного сенсора температури, що дозволяє ефективно вирішити завдання дистанційного вимірювання температури.

Дослідження роботи та характеристик оптико-частотного сенсора температури

Принцип дії оптико-частотного температурного сенсора ґрунтується дії зміни температури, що приймається температурним давачем ІРА – Е420S1 фірми Murata (фотоелектричний, інфрачервоний давач), таким чином змінюється вихідна напруга на давачеві, що приводить до зміни ємнісної складової повного опору на електродах емітер-затвор біполярного та двозатворного польового МДН транзисторів, що викликає зміну резонансної частоти коливального контуру (рис. 1). Пропонований пристрій складається з давача температури та перетворювача напруга-частота.

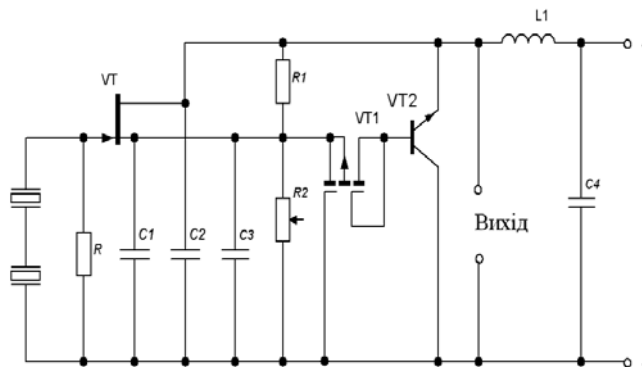


Рис. 1. Електрична схема оптико-частотного температурного сенсора

В момент часу, коли зміна температури відсутня, тоді вимірювання не відбуваються. В момент часу, коли на електродах емітер-затвор біполярного та двозатворного польового метал-діелектрик-напівпровідник (МДН) транзисторів виникає від'ємний опір, який приводить до виникнення електричних коливань в контурі (контур утворений паралельним включенням повного опору з ємнісним характером на електродах