

**International Ukraine-Poland Seminar**

**Power quality in distribution networks with distributed generation**

**Kiev, July 4-5, 2019**

---

---

DOI: 10.32073/iepl.2019.10

**ЗАСТОСУВАННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ  
ЯКОСТІ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ  
ІЗ СОНЯЧНИМИ ПАНЕЛЯМИ**

**Олександр Горпинич, Олексій Голубятник**

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

Abstract: Experimental setup including photovoltaic source with boost and buck converters, supercapacitors for voltage flicker and deviations smoothing was developed. This setup can be used to register the charge/discharge curves and remaining voltage for supercapacitors as well as the electromagnetic transients, voltages and currents in considered electrical circuit. A Sanwa (Japan) digital multimeter and appropriate PC Link (Japan) software were applied to measure and transfer registered voltages and currents in real-time mode. Measured data can be saved as a CSV file, so it is easily processed on Excel. To verify, approve and confirm the obtained experimental results, a comprehensive and detailed simulation was realized by using of PSCAD software (Canada).

**1. ВСТУП**

В даний час в електричних мережах України спостерігається широке впровадження сонячних панелей як джерел електроенергії для живлення споживачів у сільському господарстві, комунально-побутовому секторі тощо, проте все ще досить актуальною є тема підтримання належної якості напруги в системах електропостачання з фотоелектричними установками, тому що їх робота може супроводжуватися виникненням відхилень та коливань напруги через зміну освітленості. Розповсюдження джерел електроенергії з розподіленою генерацією (сонячні та вітрові електростанції, електростанції з використанням паливних елементів, когенераційні установки та ін.), крім позитивного ефекту, що пов'язаний зі зниженням шкідливих викидів до атмосфери, зниженням втрат електроенергії за рахунок максимального наближення таких джерел до споживачів, підвищенням ступеню резервування тощо, призводить й до низки проблем, спричинених погіршенням якості електроенергії у розподільчій мережі. Наприклад, під'єднання сонячних та вітрових електростанцій до «слабкої» мережі може призвести до погіршення якості напруги у точці загального підключення за рахунок виникнення значних відхилень та коливань напруги, зумовлених змінним

характером генерації активної потужності. Крім того, широке використання сучасних перетворювачів частоти в джерелах електроенергії з розподіленою генерацією призводить до підвищення вмісту вищих гармонік, субгармонік, інтергармонік та високочастотних складових напруги з частотами в декілька кГц в кривій напруги живлення.

Для усунення проблем, пов'язаних з погіршенням якості напруги в електричних мережах з розподіленою генерацією, можна використовувати акумуляторні батареї, потокові електрохімічні батареї, надпровідникові магнітні акумулятори, маховикові накопичувачі електроенергії та суперконденсатори (СК). З практичної точки зору доцільно було б дослідити експериментально ефективність застосування СК як засобів згладжування відхилень напруги в реальній мікромережі (наприклад там, де використовується сонячна панель). СК як гідна заміна акумуляторним батареям стають доступнішими, за рахунок своїх переваг (великий цикл «заряд-розряд», широкий діапазон робочих температур, високий ККД та ін.) їх використання у сфері альтернативної електроенергетики дедалі буде тільки зростати.

## 2. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ЯК ЗАСОБІВ ЗГЛАДЖУВАННЯ ВІДХИЛЕНЬ НАПРУГИ

Наявність хмар спричиняє зміни сонячної радіації, які негативно впливають на якість генерації електроенергії за допомогою сонячних панелей. В якості прикладу на рис. 1 наведена залежність сонячної активності від тривалості світового дня, отримана за допомогою піранометра дослідниками з університету Арістотеля в Салоніках (Греція) [3], [5].

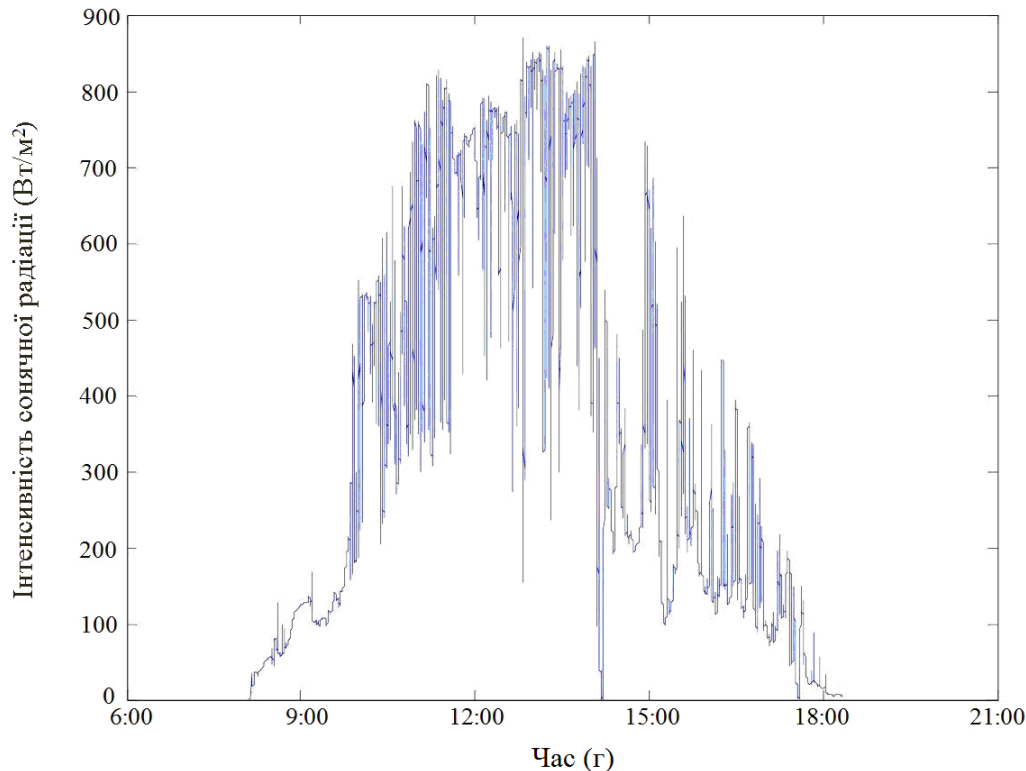


Рисунок 1. Залежність сонячної активності від тривалості світового дня

За результатами досліджень [5] було встановлено, що найбільші зміни сонячної радіації спостерігались 10.09.2016 р., коли їх тривалість досягла 2,4 с (рис. 2).

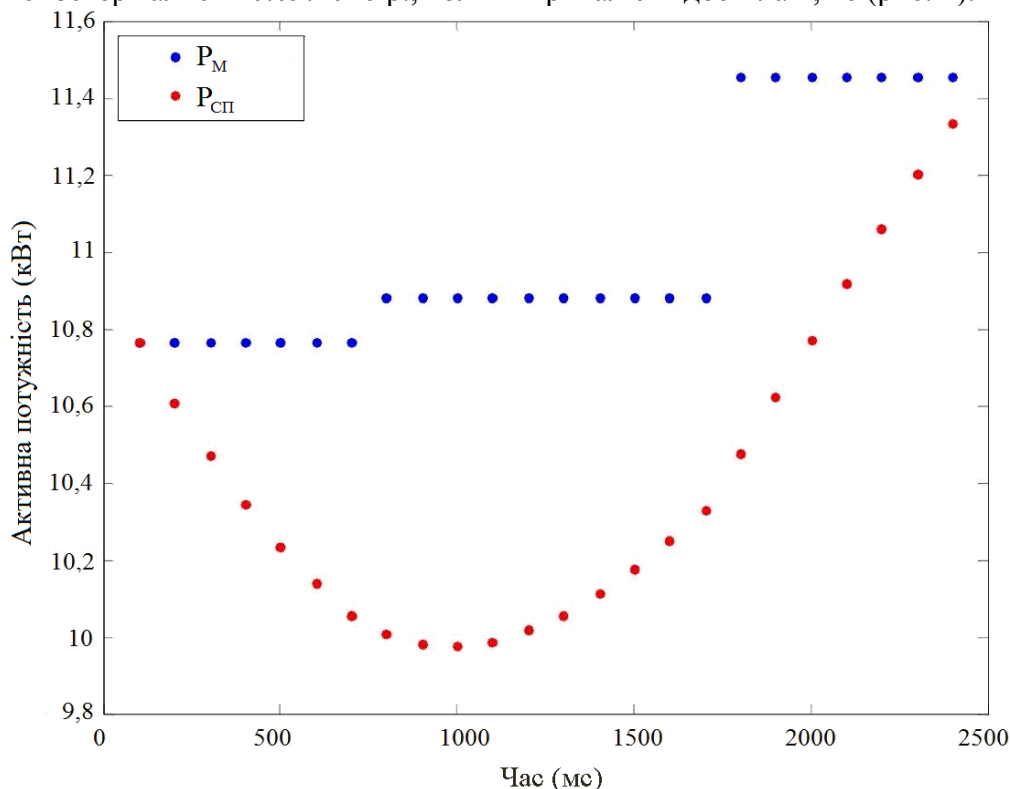


Рисунок 2. Найбільші зміни сонячної радіації тривалістю 2,4 с

На рис. 2 наведені залежності від часу активної потужності, що генерується сонячною панеллю ( $P_{СП}$ ), та активної потужності, що видається до мережі ( $P_M$ ). За наявності засобів згладжування, наприклад, у вигляді СК:

$$P_M = P_{СП} + P_{СК}, \quad (1)$$

де  $P_{СК}$  – складова активної потужності, що забезпечується за рахунок СК.

Метою статті є демонстрація можливостей експериментальної установки для моніторингу та аналізу електромагнітних процесів, які виникають в електричних мережах із сонячними панелями, а також ознайомлення з результатами експериментальних досліджень ефективності застосування СК як засобів згладжування відхилень напруги, які можуть виникнути при роботі сонячних панелей, та з результатами імітаційного моделювання у середовищі PSCAD (Канада).

На кафедрі електроенергетичних комплексів та систем ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» була зібрана експериментальна установка, що складається із сонячної панелі потужністю 10 Вт, суперконденсаторів типу Power Store з номінальною напругою 2,7 В і ємністю 100 Ф, сучасних перетворювачів напруги та цифрового мультиметру Sanwa (Японія), який був підключений до ноутбука шляхом спеціального кабелю, що дозволило в режимі реального часу фіксувати 2-3 вимірювання за секунду, використовуючи програму PC Link (Японія). Зовнішній вигляд експериментальної установки показаний на рис. 3, а зовнішній вигляд суперконденсатора типу Power Store – на рис. 4. Розроблена експериментальна установка використовується

у навчальному процесі ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» під час проведення лабораторних робіт з дисципліни «Альтернативні джерела електроенергії».



Рисунок 3. Зовнішній вигляд експериментальної установки

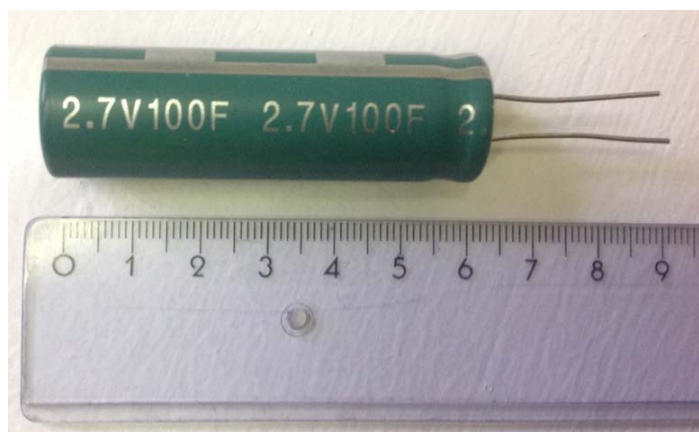


Рисунок 4. Зовнішній вигляд суперконденсатора типу Power Store

Схеми заміщення сонячної панелі та СК наведені на рис. 5, 6 [1], [2], [4].

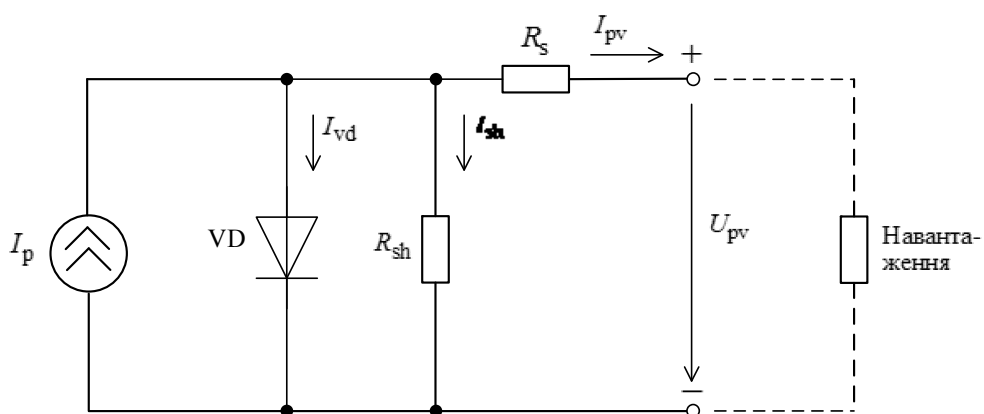


Рисунок 5. Схема заміщення сонячної панелі

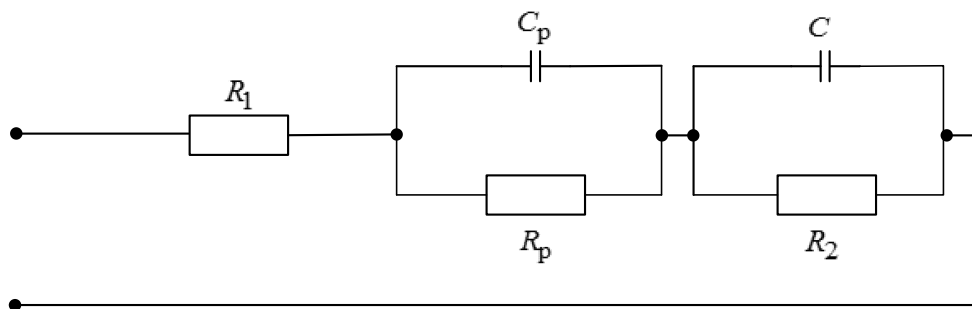


Рисунок 6. Схема заміщення СК

На схемі заміщення сонячної панелі зазначені  $I_p$  – еквівалентне джерело струму;  $R_s$  – послідовний опір, який відображає наявність опору контактів;  $R_{sh}$  – еквівалентний шунтуючий опір, в той час як на схемі заміщення СК  $R_1$  – опір, який характеризує втрати потужності, обумовлені процесами «заряд-розряд»;  $R_2$  – опір, який відображає вплив ефекту саморозряду;  $C$  – ємність, яка характеризує здатність накопичувати заряд (енергію);  $R_p$ ,  $C_p$  – опір та ємність, що відображають швидкоплинні процеси «заряд-розряд», відповідно.

Згідно з результатами досліджень [1], [2], ємність  $C_p$  можна визначити наступним чином:

$$C_p = C/13 \quad (2)$$

Опір  $R_p$  та ємність  $C_p$  пов'язані з постійною часу  $\tau$ , яка відображає час циклів «заряд-розряд», відомим співвідношенням:

$$R_p = \tau/C_p \quad (3)$$

Величину опору  $R_2$ , який відображає вплив ефекту саморозряду, для практичних розрахунків можна прийняти  $R_2 = 18$  кОм [1].

На першому етапі досліджень були виконані вимірювання напруги на СК з метою отримання даних про процеси заряду та розряду. Для реєстрації напруги в режимі реального часу був застосований цифровий мультиметр Sanwa типу PC 510a, який був підключений до ноутбука шляхом спеціального кабелю, що дозволило фіксувати 2-3 вимірювання за секунду, використовуючи програму PC Link. Графіки, які демонструють зміни напруги на СК в процесі заряду та розряду, наведені на рис. 7, 8 (експеримент проводився з використанням чотирьох СК – два паралельно з'єднаних СК були послідовно увімкнені з ще двома паралельно з'єднаними СК з метою узгодження напруг між підвищуючим перетворювачем напруги та СК). На рис. 7 можна побачити, що заряд СК починається з якоїсь навчальної напруги, обумовленої наявністю остаточного заряду (точне значення цієї навчальної напруги за даними експерименту склало 0,12 В). Спад напруги, який виник у 13:36:22 на рис. 8, обумовлений наявністю мінімально припустимої напруги на вході підвищуючого перетворювача напруги та якістю попереднього процесу заряду з точки зору накопиченої ємності.

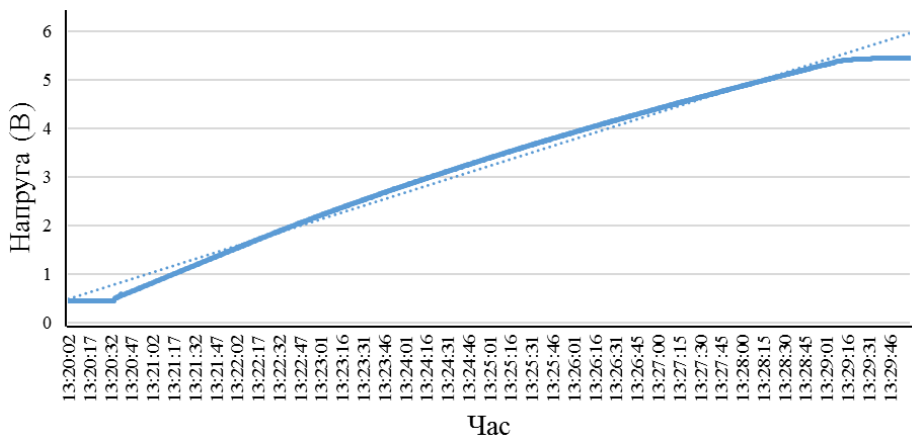


Рисунок 7. Зміна напруги на суперконденсаторах в процесі заряду

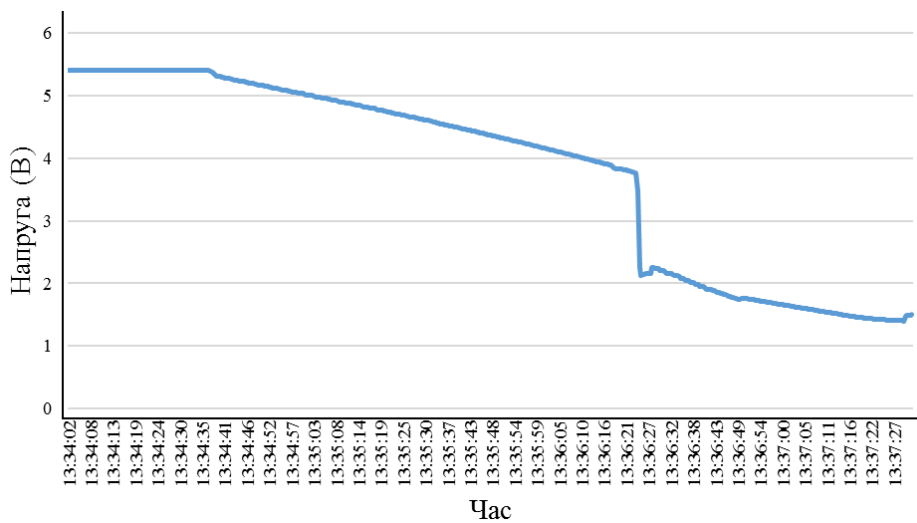


Рисунок 8. Графік, який демонструє зміну напруги на суперконденсаторах в процесі розряду на навантаження у вигляді лампи розжарювання потужністю 4 Вт напругою 12 В

Наступний етапі досліджень передбачав реєстрацію напруг під час змін сонячної радіації. На рис. 9 показана напруга, зареєстрована на виході досліджуваної сонячної панелі під час імітації наявності хмар або інших перешкод, що викликають затемнення. Графік зміни напруги на рис. 9 безпосередньо отриманий за допомогою програми PC Link.

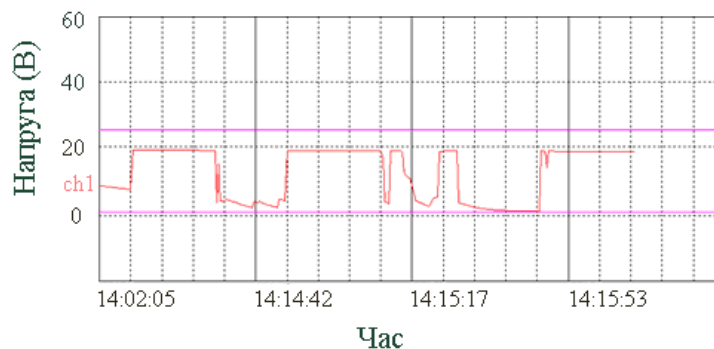


Рисунок 9. Напруга, зареєстрована на виході досліджуваної сонячної панелі під час імітації наявності хмар або інших перешкод, що викликають затемнення

Ефективність застосування суперконденсаторів як засобів згладжування відхилень та коливань напруги, що можуть виникнути під час роботи сонячних панелей, наочно демонструється на рис. 10.

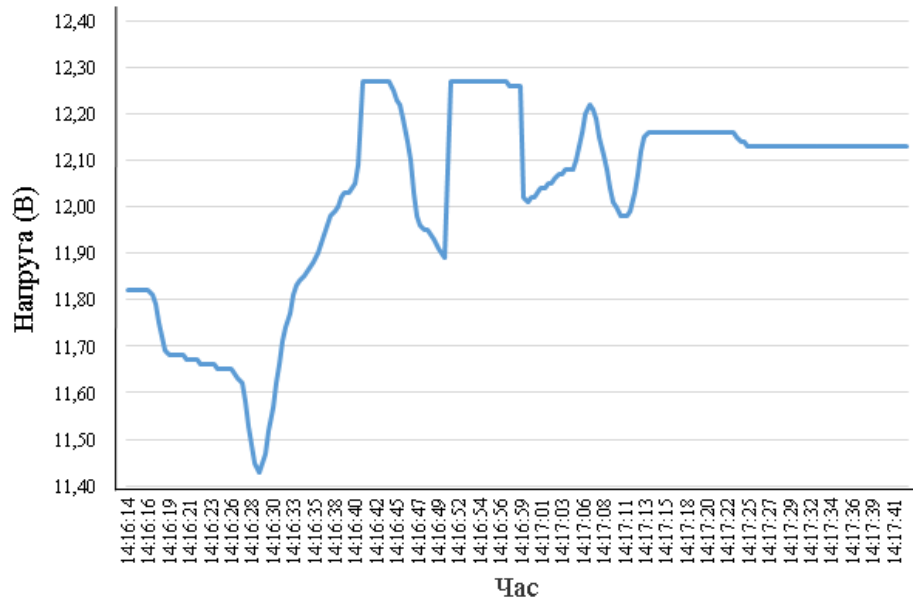


Рисунок 10. Графік зміни напруги у точці підключення навантаження

Наявність суттєвих змін напруги, які виникли за рахунок зміни сонячної радіації через появу хмари, що спостерігаються до 14:17:14 включно, обумовлена тим, що до зазначеного часу суперконденсатори не вмикались. Після зазначеного часу відхилення та коливання напруги не спостерігались, що підтверджує ефективність застосування суперконденсаторів.

З метою підтвердження експериментально отриманих результатів було виконано імітаційне моделювання у середовищі PSCAD (Канада). Зовнішній вигляд імітаційної моделі у середовищі PSCAD, яка розроблена для відображення еквівалентної схеми заміщення суперконденсатора, показаний на рис. 11 [1], [2].

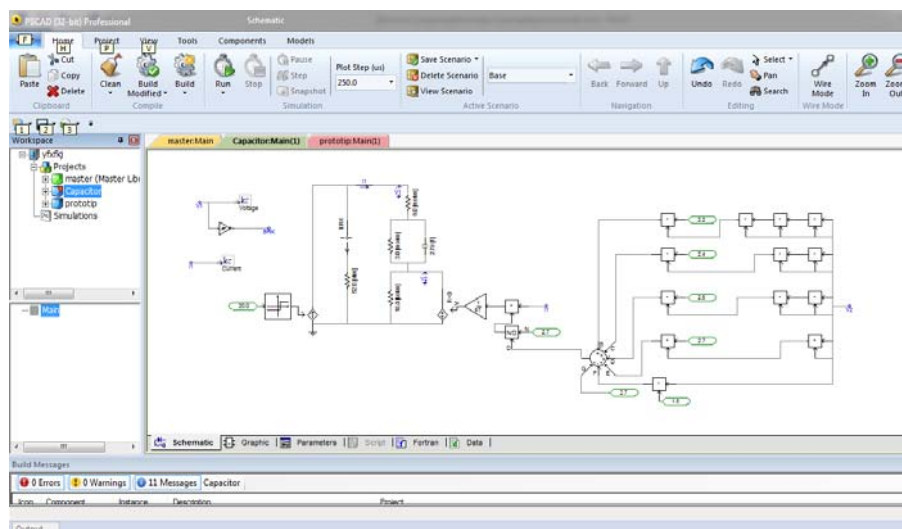


Рисунок 11. Еквівалентна схема заміщення суперконденсатора, створена у середовищі PSCAD



Результати моделювання процесу заряду суперконденсаторів у середовищі PSCAD представлені на рис. 12.

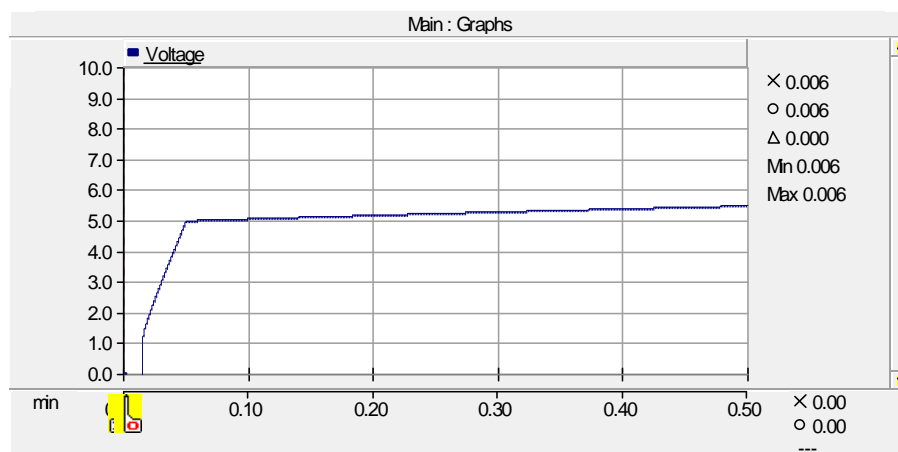


Рисунок 12. Результати моделювання процесу заряду суперконденсаторів у середовищі PSCAD

Таким чином, вдалося дослідити експериментально ефективність застосування СК як засобів згладжування відхилень та коливань напруги, що можуть виникнути під час роботи сонячних панелей, та порівняти результати експериментальних досліджень з результатами імітаційного моделювання у середовищі PSCAD.

### 3. ЛІТЕРАТУРА

1. Johansson P., Andersson B.: Comparison of simulation programs for supercapacitor modelling. M.Sc. thesis, Dept. of Energy and Environment, Div. of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2008
2. Hadartz M., Julander M.: Battery-supercapacitor energy storage, M.Sc. thesis, Dept. of Energy and Environment, Div. of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2008
3. Pegueroles-Queralt J., Bianchi F.D., Gomis-Bellmunt O.: A power smoothing system based on supercapacitors for renewable distributed generation. IEEE Electr. Insulation Magazine, 2015, vol. 62, No. 1, pp. 343-350
4. Rekioua D., Matagne E.: Optimization of photovoltaic power systems: modelization, simulation and control. Springer-Verlag, London, 2012
5. Tragianni S.D., Oureilidis O.K., Demoulias S.C.: Supercapacitor sizing based on comparative study of PV power smoothing methods. 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Heraklion (Greece), August 28-31, 2017

**Доцент кафедри електроенергетичних комплексів та систем, Олександр Горпинич**

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

Адреса: вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, Донецька обл., 87555, Україна

e-mail: gorpinich@ieee.org

**Магістр кафедри електроенергетичних комплексів та систем, Олексій Голубятник**

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

Адреса: вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, Донецька обл., 87555, Україна

e-mail: holubiatnyk.oleksii@gmail.com