

УДК 681.2

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-12

Симонюк В. П.¹, Божко К. М.², Мушкет К. Я.²¹Луцький національний технічний університет²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ ЯК ОСНОВА ДИНАМІЧНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ЇЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК

Використання сонячної енергії у вимірювальних технологіях спонукає до пошуку оригінальних схемних рішень. Прикладом цього є застосування мендосинського двигуна, особливістю якого є левітаційний магнітний підвіс та комутація обмоток ротору на основі періодичної зміни освітленості сонячних панелей, розташованих безпосередньо на самому роторі. Аналіз перехідного процесу сонячної панелі надає можливість вимірювання послідовного опору сонячної панелі. Даний метод є альтернативним до методу вимірювання на основі отримання кількох вольт-амперних характеристик при різній освітленості. Розвиток динамічного методу вимірювання електричних параметрів та характеристик сонячних панелей отримав значний і суттєвий поштовх при створенні засобу їх безконтактного вимірювання. Перехідний процес сонячної панелі є основою для динамічного методу вимірювання її електричних параметрів і характеристик. Зокрема, за періодом вільних коливань в колі розгортки струму в початковій фазі режиму короткого замикання вимірюють електричну ємність сонячної панелі, а за декрементом затухання – її послідовний опір.

Ключові слова: Освітленість, мендосинський двигун, сонячна енергія, сонячна панель, перехідні процеси, вільні коливання.

Постановка проблеми. Увага до використання сонячної енергії у вимірювальних технологіях спонукає до пошуку оригінальних схемних рішень, про що свідчить, наприклад, застосування в них мендосинського двигуна, особливістю якого є левітаційний магнітний підвіс та комутація обмоток ротору на основі періодичної зміни освітленості сонячних панелей, розташованих безпосередньо на самому роторі [1].

На основі перехідного процесу в сонячній панелі створено динамічний метод вимірювання, який полягає у періодичному перемиканні сонячної панелі від стану холостого ходу до стану короткого замикання сонячної панелі [2]. Перемикання станів здійснюється швидким електронним ключем на потужному польовому транзисторі. При цьому в колі проходження струму включено котушку індуктивності, яка гальмує процес зростання струму. Параметри схеми розраховані таким чином, щоб розгортка струму відбувалась лінійно з малою похибкою нелінійності розгортки. Цей метод дозволяє в межах одного вимірювального імпульсу отримати вольт-амперну характеристику сонячної панелі. Основним вимірювальним пристроєм тут є цифровий осцилограф. Отримана осцилограма з виходу сонячної панелі відтворює її вольт-амперну характеристику в координатах – струм-напруга. Струм тут прямо пропорційний до часу, тому часова розгортка сигналу на екрані осцилографу є також і розгорткою струму. В результаті осцилограф працює за даних умов в якості характериографу.

При використанні динамічного методу вимірювання на початку режиму короткого замикання в сонячній панелі виникають затухаючі коливання. Коливальний контур утворює власна ємність сонячної панелі та котушка індуктивності пристрою лінійної розгортки струму. Осцилографічне вимірювання періоду коливань та декременту затухання дозволяють визначити величину електричної ємності та послідовного опору сонячної панелі. При зміні освітленості отримують залежність ємності від напруги – вольт-фарадну характеристику сонячної панелі, яка є важливим джерелом інформації про фізичні параметри фото-шару напівпровідникового матеріалу сонячних елементів.

Постановка завдання та аналіз стану. Таким чином, зазначені підходи до реалізації динамічного методу вимірювання дозволяють отримати і якісно обробити вимірювальну інформацію, на основі якої розраховують електричні параметри і отримують характеристики сонячних панелей та елементів. При аналізі сонячних елементів і панелей широко застосовують еквівалентні електричні схеми [3]. Реальний сонячний елемент має електричну ємність, яку при аналізі на основі еквівалентної схеми раніше не враховували.

Основні результати дослідження. Вдосконалена еквівалентна схема сонячної панелі із пристроєм розгортки струму має в своєму складі електричну ємність C . Крім того, до схеми додано послідовний опір сонячної панелі R_s , а замість ідеального джерела напруги включено ідеальне джерело струму I_{sc} . На схемі показано точку контролю, з якою утворює контакт щуп цифрового осцилографу, це шина «плюс» сонячної панелі. Таким чином, дана схема (рис. 1) відтворює метод динамічного вимірювання вольт-амперної характеристики сонячної панелі в режимі лінійної розгортки струму [2].

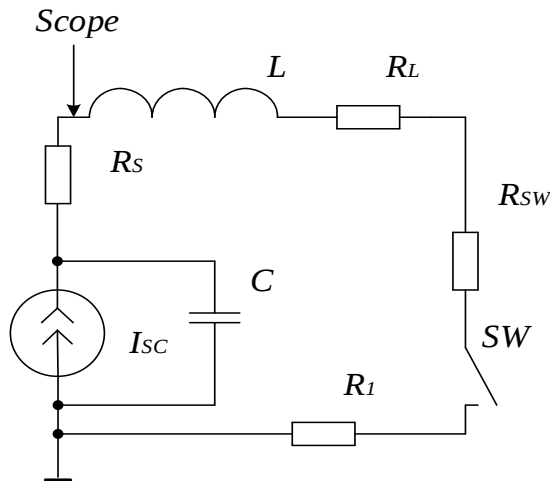


Рисунок 1 – Вдосконалена еквівалентна схема сонячної панелі із пристроєм розгортки струму: I_{sc} – ідеальне джерело струму (має величину струму короткого замикання сонячної панелі); L – індуктивність; R_L – активний опір котушки індуктивності; SW – ключ; R_1 – резистор для вимірювання струму; C – ємність сонячної панелі; R_s – послідовний опір сонячної панелі; *Scope* – вхідний канал осцилографа

В схемі (рис. 1) відсутній шунтовий опір сонячної панелі, оскільки його впливом на процес розгортки струму можна знехтувати. Типова величина шунтового опору – від 2 до 10 кОм, що перевищує на три порядки величину послідовного опору, яка дорівнює звичайно лише 2-15 Ом.

Вдосконалена еквівалентна схема дозволяє пояснити виникнення коливань в колі розгортки струму сонячної панелі при її короткому замиканні наприкінці процесу зростання струму від нуля до I_{sc} . В послідовному коливальному контурі, який складають ємність сонячної панелі C та зовнішня індуктивність виникають затухаючі вільні коливання. Затухання коливань відбувається внаслідок наявності в коливальному контурі активних опорів. Елементи R_s , C , I_{sc} відображають еквівалентну схему самої сонячної панелі в режимі короткого замикання, при цьому ігнорують наявність її шунтового опору внаслідок його малого впливу на коливальний процес (рис. 1). При перехідному процесі від режиму холостого ходу до режиму короткого замикання виникають вільні коливання в послідовному контурі, який утворюють власна ємність і зовнішня індуктивність кола розгортки струму. Коливання виникають одразу після закінчення процесу розгортки струму і потім поступово затухають. Осцилограму напруги сонячної панелі в режимі вільних коливань наведено на (рис. 2). За допомогою вертикального курсору (рис.2) було виміряно період T затухаючих коливань, який склав 118 мкс. Період коливань залежить від ємності та індуктивності контуру:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (1)$$

Ємність C згідно формули (1) дорівнює:

$$C = \frac{T^2}{4\pi^2 L} \quad (2)$$

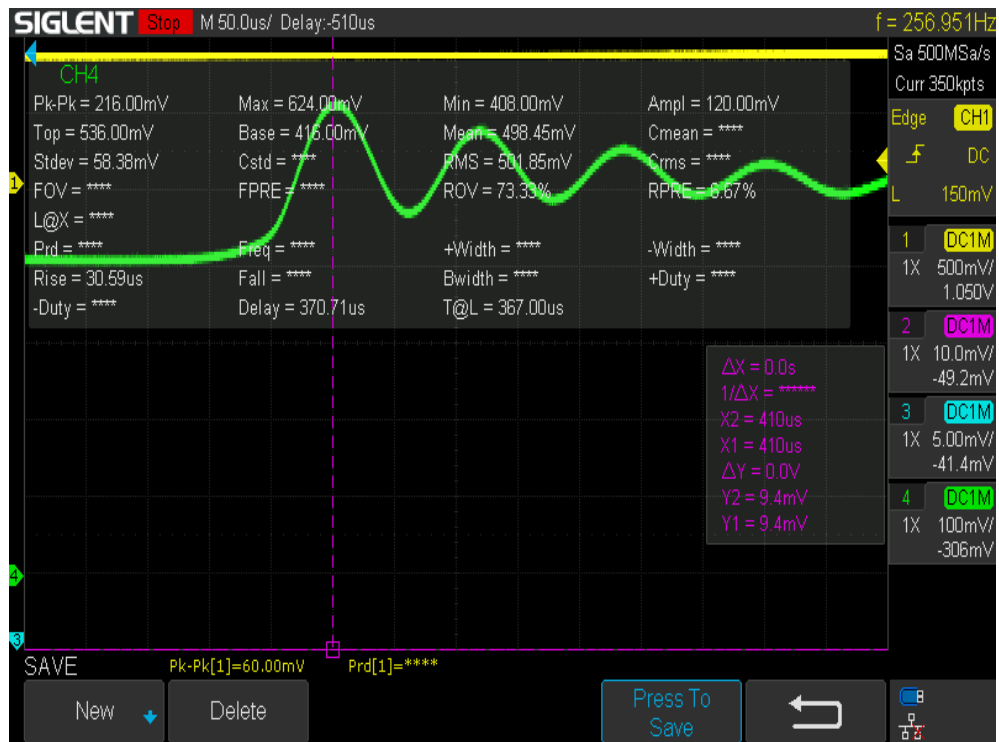


Рисунок 2 – Осцилограма напруги сонячної панелі при її короткому замиканні: сонячна панель має номінальні параметри 12 В, 50 Вт; струм короткого замикання 1,04 А

Відповідно до даних осцилографічного вимірювання (рис. 2) та при використанні котушки індуктивності з $L = 499$ мкГн маємо:

$$C = \frac{118^2 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 499 \cdot 10^{-6}} = 0,707 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 0,707 \text{ мкФ}.$$

Наявність активного опору в коливальному контурі дещо знижує частоту коливань, про що свідчить формула [4] для частоти коливань f^* реального контуру:

$$\omega = 2\pi f^* = \frac{2\pi}{T^*} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}, \quad (3)$$

звідки період коливань T^* дорівнює:

$$T^* = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}. \quad (4)$$

Виконаємо оцінку періоду коливань реального контуру T^* при $R = 4$ Ом, що є типовим значенням для послідовного опору сонячної панелі:

$$T^* = \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{\frac{1}{499 \cdot 10^{-6} \cdot 0,707 \cdot 10^{-6}} - \left(\frac{4}{2 \cdot 499 \cdot 10^{-6}}\right)^2}} = \frac{6,28 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{\frac{1}{352,8} - \frac{1}{62250}}} = 118,3 \cdot 10^{-6} = 118,3 \text{ мкс}.$$

Корекція періоду коливань складала:

$$T^* - T = 0,3 \text{ мкс або } 0,25\%.$$

Із формули (4) знайдемо скореговане значення ємності C^* :

$$C^* = \frac{T^2}{L(4\pi^2 + \frac{T^2 R^2}{4L^2})}. \quad (5)$$

Отримаємо числове значення C^* :

$$C^* = \frac{118^2 \cdot 10^{-12}}{499 \cdot 10^{-6} (4 \cdot 3,14^2 + \frac{118^2 \cdot 10^{-12} \cdot 4^2}{4 \cdot 499^2 \cdot 10^{-12}})} = \frac{27,904 \cdot 10^{-6}}{39,44 + 0,22} = 0,704 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 0,704 \text{ мкФ}.$$

Корекція ємності сонячної батареї дорівнює:

$$C - C^* = 0,707 - 0,704 = 0,003 \text{ мкФ або } 0,4\%.$$

Таким чином, припущення про малість впливу активного опору в коливальному контурі, який утворюють елементи схеми розгортки струму сонячної панелі, на результати вимірювань її електричних параметрів є вірним. Відносна похибка вимірювання при цьому складає долі одного відсотка від вимірювальної величини.

Розглянемо параметри затухання коливань в контурі (рис. 2). Амплітуда коливань U^A в контурі зменшується з часом за експоненціальним законом [4,5]:

$$U^A(t) = U_0^A e^{-\lambda t}, \quad (6)$$

де λ – логарифмічний декремент затухання.

Параметр λ визначають за формулою:

$$\lambda T = \ln\left(\frac{U^A(t_1)}{U^A(t_1 + T)}\right), \quad (7)$$

де $U^A(t_1)$ – амплітуда сигналу, яку виміряли в момент часу t_1 ; $U^A(t_1 + T)$ – амплітуда сигналу по закінченні одного періоду T .

Звернемось знову до осцилограми (рис. 2). Параметри сигналу тут були виміряні вбудованим в осцилограф мультиметром. Зафіксовані такі значення:

- постійна складова 516 мВ;
- амплітуда першого періоду 92 мВ;
- амплітуда другого періоду 68 мВ;
- період коливань 118 мкс.

Застосувавши формулу (7), отримуємо:

$$\lambda T = 0,302, \text{ звідки:} \\ \lambda = 2559 \text{ с.}$$

Логарифмічний декремент затухання визначають за допомогою індуктивності та сумарного опору контуру R_{sum} відповідно до [4]:

$$\lambda = \frac{R_{sum}}{2L}, \quad (8)$$

звідки:

$$R_{sum} = 2L\lambda. \quad (9)$$

Для коливального контуру (рис. 1), активний опір R_{sum} дорівнює:

$$R_{sum} = 2 \cdot 499 \cdot 10^{-6} \cdot 2559 = 2,55 \text{ Ом}$$

Відповідно до еквівалентної схеми (рис. 1) складовими опору R_{sum} є:

- опір котушки R_L ;
- опір ключа R_{SW} ;
- опір для вимірювання струму R_1 ;
- послідовний опір сонячної панелі R_s .

Формула для сумарного опору контуру має вигляд:

$$R_{sum} = R_L + R_{SW} + R_1 + R_s. \quad (10)$$

Перші три з цих компонентів відомі і тоді, використавши формулу (10), отримаємо вираз для послідовного опору сонячної панелі R_s :

$$R_s = R_{sum} - R_L - R_{SW} - R_1, \quad (11)$$

або:

$$R_s = 2,55 - 0,38 - 0,0053 - 0,102 = 2,06 \text{ Ом} \pm 0,010 \text{ Ом}.$$

Таким чином, аналіз перехідного процесу сонячної панелі надає можливість вимірювання послідовного опору сонячної панелі. Даний метод є альтернативним до методу вимірювання на основі отримання кількох вольт-амперних характеристик при різній освітленості [6]. Розвиток динамічного методу вимірювання електричних параметрів та характеристик сонячних панелей отримав значний і суттєвий поштовх при створенні засобу їх безконтактного вимірювання [7].

Висновки. Перехідний процес сонячної панелі є основою для динамічного методу вимірювання її електричних параметрів і характеристик. Зокрема, за періодом вільних коливань в колі розгортки струму в початковій фазі режиму короткого замикання вимірюють електричну ємність сонячної панелі, а за декрементом затухання – її послідовний опір. Аналіз перехідного процесу сонячної панелі надає можливість вимірювання послідовного опору сонячної панелі. Даний метод є альтернативним до методу вимірювання на основі отримання кількох вольт-амперних характеристик при різній освітленості.

Інформаційні джерела

1. . Симонюк В. П., Божко К. М., Пташенчук В. В. Спосіб заміру освітленості із автономним джерелом живлення від сонячної енергії. Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». Луцьк, 2023. №23. С.82-86.
2. Bozhko K. M., Zashchepkina N. M., Markin M. O, Markina O. M. Single-pulse method for measuring the current-voltage characteristics of solar panels. «Archives of Materials Science and Engineering», Volume 99, Issues 1-2, September-October 2019, P. 24-29.
3. Antonio Luque, Steven Hegedus. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering.. 2-nd ed., Wiley India, 2018, 1168 p.
4. Сусь Б. А., Заболотний В. Ф., Мисліцька Н. А. Коливання і хвилі : навчальний посібник. ВІТІ НТУУ «КПІ», 2010. 190 с.
5. Sree Harsha N. R., Anupama Prakash and Kothari D. P. The Foundations of Electric Circuit Theory. IOP Publishing Ltd, 2016, 207 p.
6. Божко К. М., Мушкет К. Я. Безконтактне вимірювання електричних параметрів сонячних елементів. Збірник наукових праць «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». 2024. №2(94), С. 191-198.

Simonyuk V.¹, Bozhko K.², Mushket K.²

¹ Lutsk National Technical University

²National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky"

TRANSIENT PROCESS OF A SOLAR PANEL AS THE BASIS OF A DYNAMIC METHOD FOR MEASURING ITS ELECTRICAL PARAMETERS AND CHARACTERISTICS

The use of solar energy in measurement technologies encourages the search for original circuit solutions. An example of this is the use of the Mendocino motor, a feature of which is levitation magnetic suspension and commutation of the rotor windings based on periodic changes in the illumination of solar panels located directly on the rotor itself. Analysis of the transient process of a solar panel provides the ability to measure the series resistance of a solar panel. This method is an alternative to the measurement method based on obtaining several current-voltage characteristics at different illumination. The development of a dynamic method for measuring the electrical parameters and characteristics of solar panels received a significant and essential boost with the creation of a means of their non-contact measurement. The transient process of a solar panel is the basis for a dynamic method of measuring its electrical parameters and characteristics. In particular, the period of free oscillations in the current sweep circuit in the initial phase of the short-circuit mode measures the electrical capacitance of the solar panel, and the decay decrement measures its series resistance.

Keywords: Illumination, Mendocino engine, solar energy, solar panel, transients, free oscillations.