

К.М. Божко, к.т.н.  
К.Я. Мушкет, аспірант  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### Безконтактне вимірювання електричних параметрів сонячних елементів

Осцилографічний метод вимірювання електричних параметрів сонячних елементів і панелей дозволяє отримувати результат дії вимірювального сигналу в колі безпосередньо на екрані в формі осцилограм у режимі реального часу. Осцилограф разом із антенним датчиком є основним засобом безконтактного вимірювання електричних параметрів сонячних елементів. Вимірювальний змінний сигнал вводять безпосередньо через виводи сонячної панелі від функціонального генератора, що забезпечує можливість здійснювати процес вимірювання під час її експлуатації. Метою таких вимірювань може бути контроль стану сонячної панелі, а також виявлення на ранній стадії процесів утворення і розвитку дефектів та прогноз її деградації. Отримання прогнозої інформації про стан сонячної панелі дозволяє планувати весь її життєвий цикл і вчасно виводити її з експлуатації. Безконтактний метод вимірювання на основі осцилографу має два види: з антенним датчиком без перетворення сигналу та з активною антеною. В режимі малого сигналу сонячну панель можна представити у вигляді послідовного кола ланок, кожна з яких має паралельне з'єднання ємності та активного опору. Використання саме малого сигналу, амплітуда якого не перевищує напруга відкриття сонячних фотоелементів (діодів) і практично обмежена значенням  $\pm 15$  В. Це дозволяє використовувати під час вимірювань малопотужний функціональний генератор у режимі імпульсної або синусоїдальної напруги без додаткового підсилення сигналу. Робочий діапазон частот при вимірюваннях знаходиться в межах від кількох сотень герц до десяти кілогерц. Антенний метод має походження від методу електростатичного вольтметра, який широко використовують під час високовольтних вимірювань. Тут безконтактний принцип захищає дослідника від небезпеки електричного пробую і ураження його тіла. В сонячній енергетиці безконтактний метод як різновид неруйнівного контролю має на меті проводити дослідження об'єкта без виведення його з експлуатації. Експериментальні дослідження безконтактного методу забезпечили визначення оптимальних параметрів вимірювального сигналу: частота 1500 Гц, амплітуда 3 В. Моделювання схеми вимірювання в середовищі Multisim показало збіг результатів із експериментальними даними з допуском  $\pm 15$  %.

**Ключові слова:** безконтактне вимірювання; фотоелектричний сонячний елемент; сонячна панель; антенний датчик.

**Актуальність теми.** За результатами безконтактних вимірювань можна здійснювати неруйнівний контроль сонячної панелі в процесі її експлуатації в цілому, а також на рівні окремих сонячних елементів в її складі. Отримана в результаті таких вимірювань інформація дозволяє локалізувати сонячні елементи із наявними та прихованими дефектами, виявити в них початок розвитку процесів деградації. Це дозволяє мати оперативну і прогнозу інформацію щодо експлуатаційних параметрів сонячних панелей і завчасно, в плановому порядку, здійснювати їх обслуговування та виведення із ужитку. Створений авторами антенний метод є одним із методів безконтактних вимірювань електричних параметрів сонячних елементів, він є актуальним і потребує дослідження та подальшого розвитку.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** Історію безконтактних вимірювань можна простежити за методами, які винайшли і розвили в техніці високих напруг. Аналогом запропонованого авторами антенного методу вимірювання електричних параметрів сонячних елементів є вживаний у техніці високих напруг метод електростатичного вольтметра та його різновид для змінного струму зі схемою випрямлення сигналу [1]. Такий метод є корисним у тих випадках, коли вимірювальний сигнал має малу потужність, а саме коло є недоступним для утворення гальванічного контакту. Електричний сигнал кола наводить поле на обкладинці вимірювального конденсатора ємністю 5–100 пФ, який розташований поблизу кола, але не має з ним з'єднання. Конденсатор заряджається до напруги, яка є пропорційною до напруги в колі. Якщо сигнал змінний, то його випрямляють діодною схемою. Після цього сигнал надходить до резистивного дільника напруги і далі – до операційного підсилювача із високоімпедансним входом. Таким чином, на виході вимірювача отримують напругу, яка є прямо пропорційною до діючого значення змінної напруги в колі. Високий вхідний опір підсилювача не потребує великого струму на вході, і тому заряду конденсатора вистачає для живлення входу. Одночасно з тим заряд

конденсатора поповнюється під впливом електричного поля кола, і таким чином процес протікання вимірювального струму є стаціонарним.

Якщо розглянути в цілому методи безконтактного вимірювання електричних параметрів сонячних елементів, то їх відповідно до [2] розділяють на чотири групи:

- сонячна фотолюмінесценція (Suns-PL);
- спектрофотометрія (відбитого світла);
- вимірювання зовнішньої квантової ефективності (EQE);
- безконтактне вимірювання послідовного опору при частковому затіненні фотолюмінісцентного зображення.

Усі ці чотири групи методів засновані на використанні оптоелектронних приладів і технологій та візуалізації дефектних зон поверхні сонячних пластин. Вони об'єднані під назвою «Безконтактне вимірювання вольт-амперної характеристики» (Contactless Current-Voltage Measurement).

Вимірювання зовнішньої квантової ефективності забезпечується застосуванням методу електролюмінісцентної спектроскопії. Цей метод разом із методом спектрофотометрії відбитого світла дозволяє виміряти струм короткого замикання сонячного елемента. В той же час сонячна фотолюмінесценція використовується для отримання так званої квазівольт-амперної характеристики (pseudo IV curve) сонячного елемента.

У загальній структурі методів безконтактних вимірювань параметрів сонячних елементів чільне місце займає метод електростатичного вольтметра і його різновид, який був запропонований авторами, – метод антенного датчика, який представлено двома варіантами:

- осцилографічним методом вимірювання шунтового опору сонячних елементів із застосуванням антенного датчика [3];
- методом вимірювання шунтового опору і електричної ємності сонячних елементів на основі активної антени [4].

Перспективним методом безконтактних вимірювань автори вважають комплексний метод, в якому поєднані принцип лінійної розгортки струму [5, 6] і метод антенного датчика, що надає можливість отримувати на екрані осцилографа вольт-амперну характеристику окремого сонячного елемента у складі панелі у формі осцилограми. Осцилограф тут виконує функцію характериографа.

Безконтактному вимірюванню вольт-амперних характеристик сонячних елементів за методом електростатичного вольтметра присвячено роботи [7–9]. Зокрема з'ясовано, що гранична похибка вимірювання напруги окремого сонячного елемента у складі панелі не перевищує 10 мВ, або 2 %, для кремнієвих пластин [7]. Вимірювальний конденсатор розташовують на лицьовій та тильній стороні панелі. Отримання вольт-амперних характеристик сонячних елементів дозволяє виявити їх дефекти та простежити за процесом їх повільної деградації. Метод використовують в умовах експлуатації сонячних панелей.

Зазначимо, що класичний метод електростатичного вольтметра під час вимірювання змінної напруги передбачає використання вібродатчика Кельвіна, в якому пластина конденсатора здійснює коливальний рух відповідно до зміни напруги (за синусоїдою).

На рисунку 1 наведено класифікацію методів безконтактного вимірювання електричних параметрів сонячних елементів.

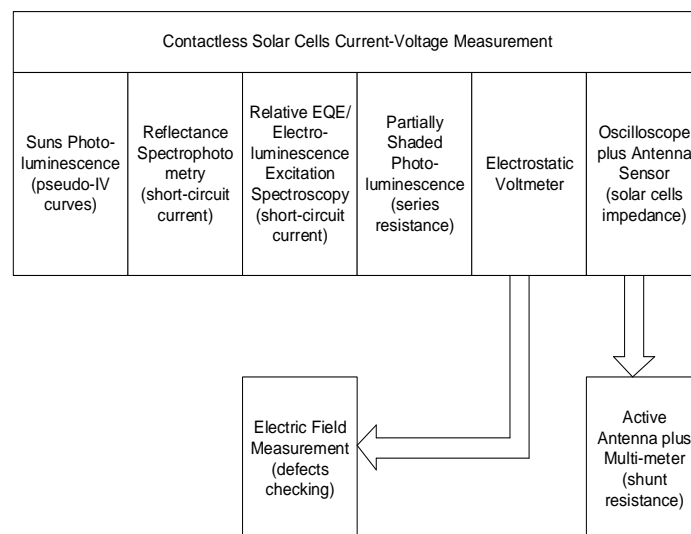


Рис. 1. Класифікація безконтактних методів вимірювання електричних параметрів сонячних елементів: класифікацію доповнено методами на основі антенного датчика [3, 4]

Запропоновано безконтактний метод вимірювання потенціалу поверхні окремих сонячних елементів для виявлення електричного пробую і запобігання виникнення пожежі [10]. Особливістю цього методу є електростатичне вимірювання, тобто метод повторює схему електростатичного вольтметра і працює виключно із постійною напругою.

**Метою статті** є експериментальне дослідження методу безконтактного вимірювання електричних параметрів сонячних елементів на основі антенного датчика та осцилографа.

**Викладення основного матеріалу.** До початку дослідження безконтактного методу було виконано осцилографічне вимірювання імпедансу сонячної панелі. При цьому панель і зовнішній конденсатор утворювали дільник, у верхньому плечі якого знаходилася фотоелектрична сонячна панель, а в нижньому – вимірювальний конденсатор. Через коло проходив синусоїдальний сигнал частотою 1500 Гц від функціонального генератора із розмахом амплітуди 3,24 В. На конденсаторі у 2,23 нФ отримали сигнал з розмахом (Peak to Peak) 2,94 В (рис. 2).

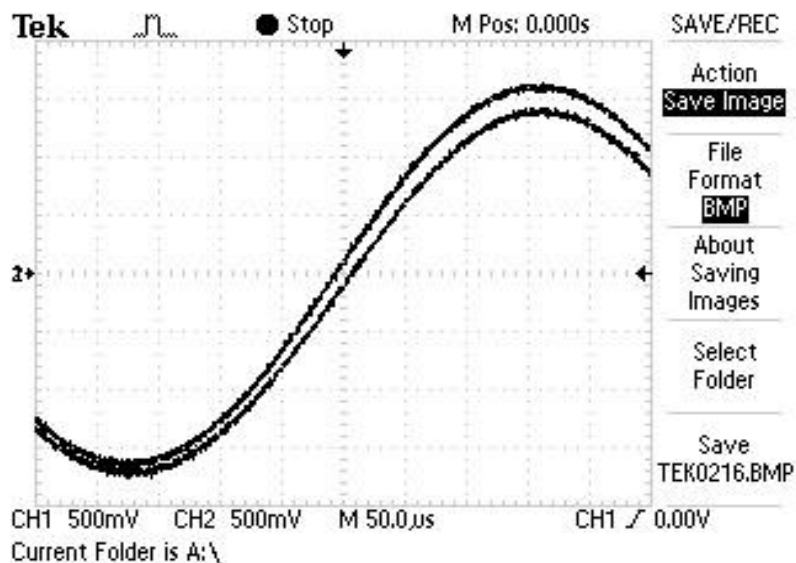


Рис. 2. Вимірювання імпедансу сонячної панелі за допомогою осцилографа: канал 1 – сигнал генератора (більший за амплітудою); канал 2 – сигнал на конденсаторі (нижнє плече дільника)

В нижньому плечі дільника розмах амплітуди дорівнює  $U_C = 2940$  мВ, у верхньому плечі:  $U_Z = 3240 - 2940 = 300$  мВ. Реактивний опір  $X_C$  конденсатора із ємністю  $C$  дорівнює:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}, \quad (1)$$

де  $f$  – частота сигналу.

Розраховане за формулою (1) значення опору конденсатора на частоті 1500 Гц дорівнює 47,6 кОм. Відношення опорів у плечах з малою похибкою наближення ( $< 2\%$ ) дорівнює відношенню напруги, тоді модуль комплексного опору сонячної панелі  $Z$  дорівнює:

$$Z = X_C \frac{U_Z}{U_C}. \quad (2)$$

В результаті розрахунку отримали значення імпедансу (за модулем)  $Z = 47,6 \times 0,102 = 4,86$  кОм.

Імпеданс сонячної панелі утворює коло із послідовним з'єднанням сонячних елементів (Solar Cells), опір кожного із яких відповідно до еквівалентної схеми (рис. 3) має резистивну та ємнісну складову.

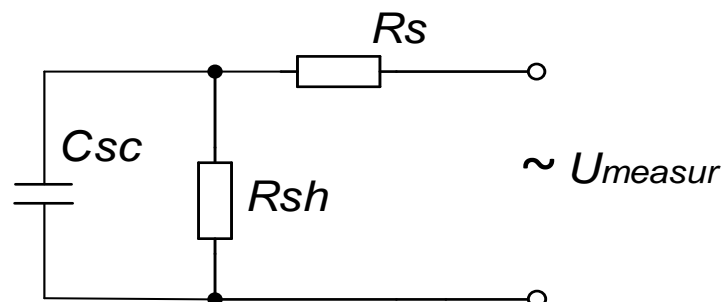


Рис. 3. Еквівалентна схема сонячного елемента, показано комплексний опір сонячного елемента:  $C_{SC}$  – ємність;  $R_S$  – послідовний опір;  $R_{Sh}$  – шунтовий опір;  $U_{measur}$  – вимірювальний сигнал від зовнішнього генератора [4]

Кількість елементів у сонячній панелі задають під час її виготовлення залежно від матеріалу пластин та її номінальної вихідної напруги. Досліджувана авторами панель має 36 сонячних елементів, номінальну напругу 12 В і потужність 60 Вт. Матеріал панелі – полікристалічний кремній. У розрахунках величиною послідовного опору нехтують, оскільки його величина на 2–3 порядки менша від величини шунтового опору.

На рисунку 4 наведено еквівалентну схему сонячної панелі, яка складається із  $N$  елементів і до якої надходить вимірювальний синусоїдальний сигнал від генератора Gen.

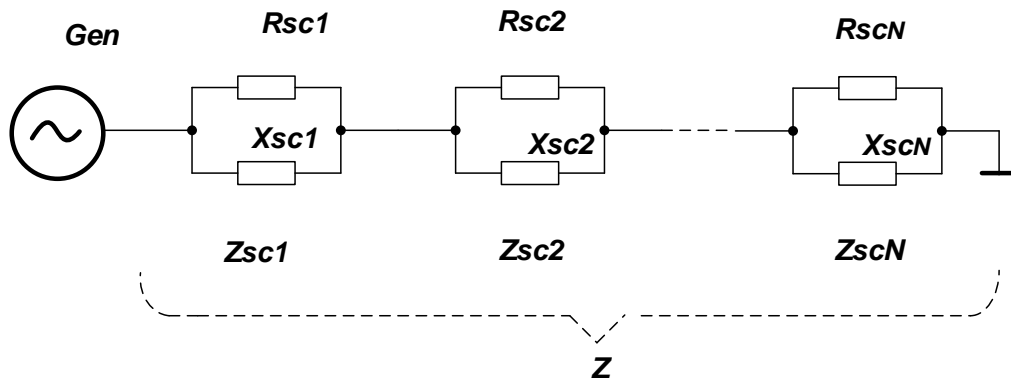


Рис. 4. Еквівалентна схема сонячної панелі:  $N$  – загальна кількість сонячних елементів;  $Rsci$  – активний опір  $i$ -го сонячного елемента;  $Xsci$  – ємнісний (реактивний опір)  $i$ -го сонячного елемента;  $Z$  – імпеданс сонячної панелі; Gen – генератор

Осцилографічне вимірювання різниці фаз надало такий результат: часова затримка  $\Delta t = 12 \pm 0,4$  мкс; різниця фаз  $\Delta\varphi = 6,47$ . Варто зазначити, що такі точні значення були отримані в результаті обробки електронних таблиць Excel відповідних осцилограм (рис. 2).

Оскільки еквівалентне коло сонячної панелі є паралельним, то зручно розраховувати провідності:

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{g^2 + y^2}, \quad (3)$$

де  $g$  – активна провідність;  $y$  – реактивна (ємнісна провідність).

При цьому

$$g = \frac{1}{Z} \cos\Delta\varphi, \quad y = \frac{1}{Z} \sin\Delta\varphi. \quad (4)$$

В результаті розрахунку були отримані такі значення для провідності:

$$\frac{1}{Z} = 205,8 \text{ мкСм}; \quad g = 204,5 \text{ мкСм}; \quad y = 23,2 \text{ мкСм}.$$

Опори мають такі значення:

$$Z = 4860 \text{ Ом}; \quad R = 4896 \text{ Ом}; \quad Xc = 43,1 \text{ кОм}.$$

Із останньої величини на основі формули (1) отримаємо ємність  $C$  сонячної батареї:

$$C = 2,47 \text{ нФ}.$$

Оскільки сонячні елементи в панелі з'єднані послідовно, то електрична ємність одного сонячного елемента  $Csc$  для досліджуваної панелі має бути в 36 разів більшою (якщо елементи однакові за площею і не мають дефектів) – приблизно 90 нФ. Варто зауважити, що електрична ємність панелі суттєво залежить від освітлення. В умовах проведеного експерименту панель була затінена і на її контактах зберігалася невелика остаточна напруга у кілька вольт. Отримання вольт-фарадних характеристик сонячної панелі можливе, як це було щойно доведено, прямим вимірюванням на реактивному (ємнісному) дільнику. Необхідно тільки забезпечити поступове зміння напруги на виводах панелі включенням її на активне змінне навантаження.

Середня величина опору сонячного елемента  $Rsc$  дорівнює  $R/36$ , або 136 Ом.

Вимірювальний стенд для осцилографічних вимірювань параметрів сонячних елементів і панелей на основі антенного датчика наведено на рисунку 5.

Розглянемо вимірювання імпедансу окремого сонячного елемента у складі панелі, для чого антенний датчик був розташований по черзі над двома сусідніми елементами – двадцять другим та двадцять третім (відлік ведуть від виходу генератора).

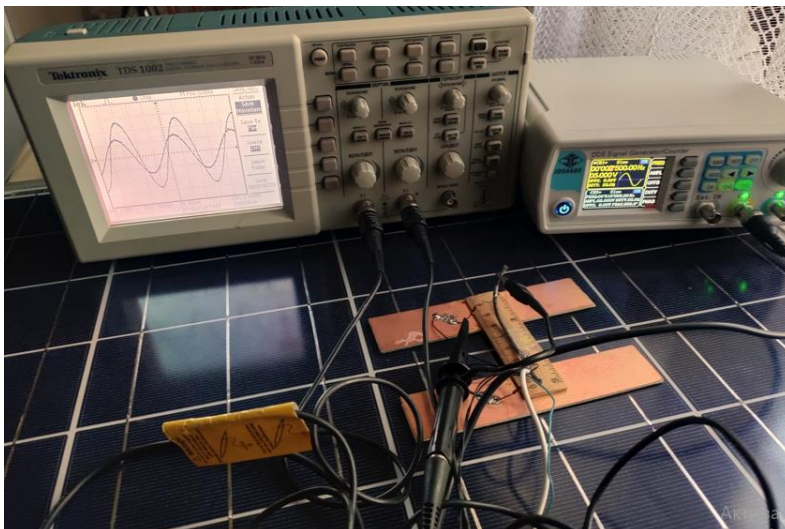


Рис. 5. Лабораторний стенд для безконтактного вимірювання електричних параметрів сонячних елементів на основі антенного датчика: антена знаходиться над 22-м елементом панелі і включена у пасивному режимі, інша антена не задіяна у вимірюваннях

Для визначення оптимального режиму вимірювання було отримано частотну залежність затримки сигналу на антенному датчику відносно сигналу на виході генератора (рис. 6).

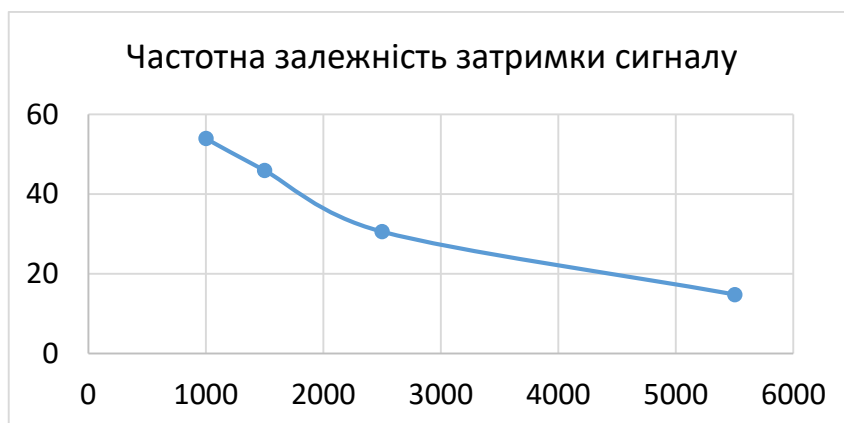


Рис. 6. Затримка сигналу антенного датчика відносно виходу генератора у кутових градусах залежно від частоти, Гц

Із частотної залежності (рис. 6) можна зробити висновок, що найбільшу чутливість вимірювального каналу можна отримати на низьких частотах. Проте на частотах до 1 кГц важко виміряти різницю в амплітуді між сигналами від сусідніх сонячних елементів. Оптимальним для безконтактних вимірювань був визначений частотний діапазон у 1500–2500 Гц.

Для сонячної панелі, яка має 36 елементів, проведено вимірювання антенним датчиком (рис. 7).

В результаті аналізу таблиць Excel осцилограм (рис. 7) визначено часові та кутові затримки сигналів відносно сигналу на виході генератора. Для 22-го елемента затримка на частоті 1500 Гц становить  $44,3 \pm 0,3^\circ$ , а для 23-го елемента –  $51,3 \pm 0,3^\circ$ . Амплітуда сигналу при цьому зменшилася з  $0,60 \pm 0,02$  В до  $0,52 \pm 0,02$  В, або на  $13 \pm 2$  %.

Виконаємо розрахунок для антенного датчика, розташованого спочатку над 22-м сонячним елементом, а потім над 23-м елементом за середніми значеннями їх параметрів.

Лінійка із 22 елементів має активний опір  $22R_{sc} = 22 \cdot 136 = 2992$  Ом і ємність  $C_{sc}/22 = 90/22 = 4,09$  нФ. Залишок елементів від точки локалізації датчика до нульової шини дорівнює 14 елементам. Лінійка із 14 елементів має активний опір  $14R_{sc} = 14 \cdot 136 = 1904$  Ом. Електрична ємність залишку дорівнює  $C_{sc}/14 = 90/14 = 6,43$  нФ.

Лінійка із 23 елементів має активний опір  $23R_{sc} = 23 \cdot 136 = 3128 \text{ Ом}$  і ємність  $C_{sc}/23 = 90/23 = 3,91 \text{ нФ}$ . Залишок елементів від точки локалізації датчика до нульової шини тепер дорівнює 13 елементам. Лінійка із 13 елементів має активний опір  $13R_{sc} = 13 \cdot 136 = 1768 \text{ Ом}$ . Електрична ємність залишку тут дорівнює:  $C_{sc}/13 = 90/13 = 6,92 \text{ нФ}$ .

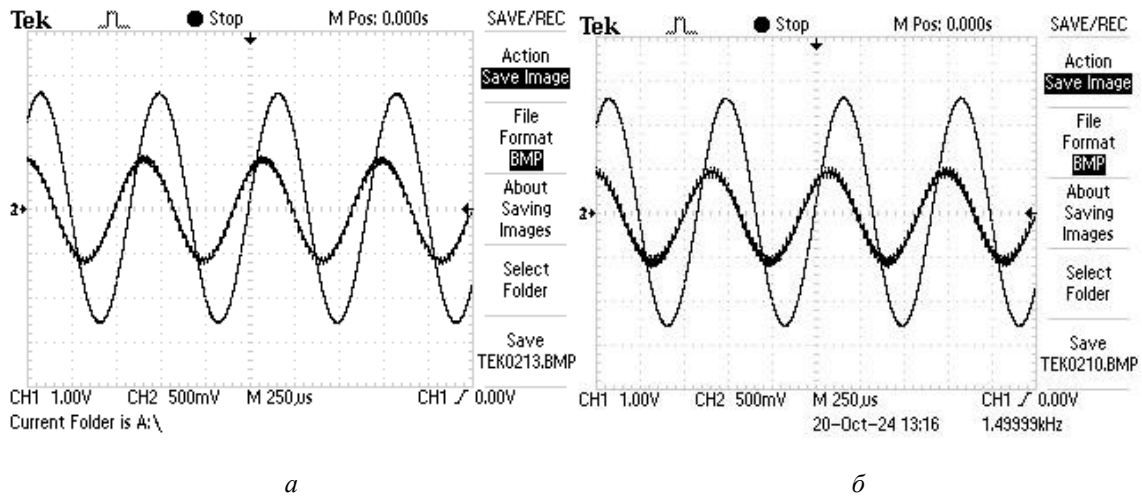


Рис. 7. Сигнали на виході генератора (канал 1) та на антенному датчику (канал 2): а) над 22-м сонячним елементом; б) над 23-м сонячним елементом

Після моделювання схеми з групами сонячних елементів  $22 + 14$  та  $23 + 13$  в середовищі Multisim було отримано осцилограми сигналів, з яких видно, що амплітуда синусоїдального вимірювального сигналу зменшується на величину 50 мВ або на 12,5 % (рис. 8). Це підтверджує вихідну гіпотезу про однорідність сонячних елементів у панелі, оскільки результат моделювання є наближеним до експериментально отриманих осцилограм. Збіг результатів моделювання із експериментальними даними можна оцінити в межах похибки осцилографічного вимірювання – в  $\pm 15 \%$ .

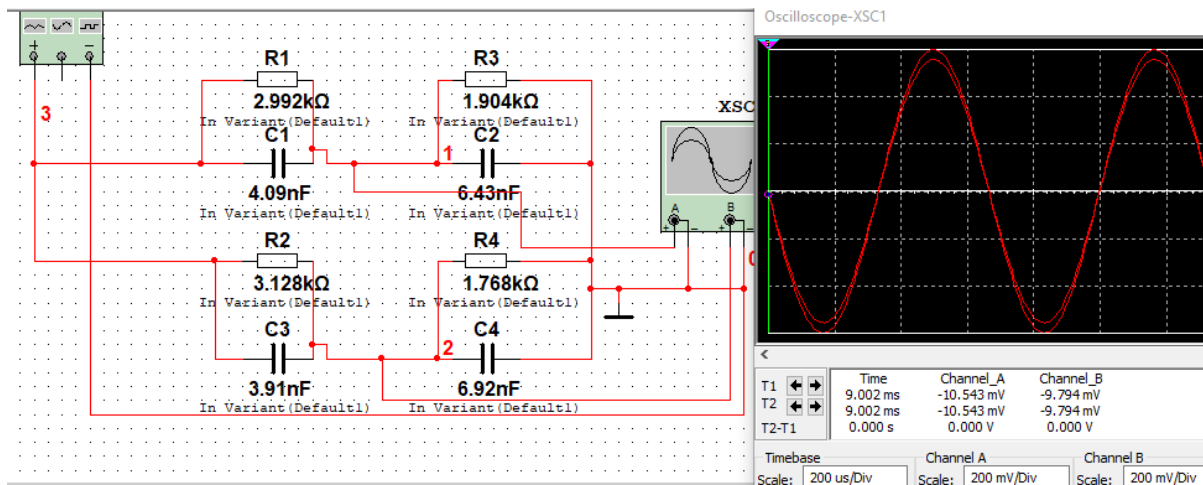


Рис. 8. Моделювання еквівалентного кола кремнієвої сонячної панелі номінальною потужністю 60 Вт та проходження вимірювального сигналу через 22-й (канал А) і 23-й (канал В) сонячні елементи: амплітуда спадає на 50 мВ

Як це можна простежити на осцилограмах (рис. 8), між сигналами обох каналів немає часової затримки (вона відсутня також і при відображенні сигналу від генератора). Таким чином, моделювання сонячної панелі на основі її еквівалентної схеми в Multisim дозволяє здійснювати лише амплітудні вимірювання, які дають достатній збіг із експериментом.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Безконтактні методи вимірювання електричних параметрів сонячних елементів на основі антенного датчика (пасивного та активного) і осцилографа мають певні обмеження за точністю. Так для 8-розрядного цифрового осцилографа систематична похибка має граничне значення 2–3 %, а для 16-розрядного – 0,25 %. З цього факту випливає висновок про необхідність

попередньої аналогової обробки сигналу датчика, що і демонструє метод на основі активної антени. При прямому вимірюванні осцилографом кількість елементів у сонячній панелі має бути обмеженим. Проведені авторами дослідження на кремнієвій панелі із 36 елементами показали, що вимірювання відбувається на межі можливості осцилографа. Для панелей із кількістю елементів 60 і більше необхідно розвивати метод на основі вимірювань сигналів від кожного другого, третього або четвертого елемента, а потім обробляти результати алгоритмами штучного інтелекту, зокрема нечітким моделюванням. Інший напрям розвитку запропонованого методу – це вдосконалення активної антени шляхом її адаптації до параметрів сигналу.

#### Список використаної літератури:

1. Schwab A.J. Hochspannungsmesstechnik (Messgerate und Messverfahren) / A.J. Schwab. – Springer-Verlag, 1969. – 212 p.
2. Contactless measurement of current-voltage characteristics for silicon solar cells / J.M. Greulich, W.Wirtz, H.Höffler and other // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2022. – Vol. 248. DOI: 10.1016/j.solmat.2022.111931.
3. Божко К.М. Безконтактний метод вимірювання шунтового опору окремих сонячних елементів у складі панелі / К.М. Божко, К.Я. Мушкет // *Технічна інженерія*. – 2023. – № 2 (92). – С. 174–181. DOI: 10.26642/ten-2023-2(92)-174-181.
4. Божко К.М. Активна антена у вимірюваннях електричних параметрів сонячних елементів / К.М. Божко, К.Я. Мушкет // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – 2024. – № 3. – С. 100–106. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-79-14.
5. Singl-pulse method for measuring the current-voltage characteristics of solar panels / K.M. Bozhko, N.M. Zashchepkina, M.O. Markin, O.M. Markina // *Archives of Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 99, Issues 1–2. – P. 24–29. DOI: 10.5604/01.3001.0013.5879.
6. Bozhko K. Linear current sweep and measuring the current-voltage characteristics of the solar panels / K.Bozhko, N.Zashchepkina, I.Bozhko // *Actual problems of modern science*. – Bydgoszcz, Poland, 2021. – P. 747–756. DOI: 10.31891/monograph/2021-10-1.
7. Miyajima S. Non-contact Voltage Measurement of Solar Cell with Electrostatic Voltmeter / S.Miyajima, K.Nishioka, Y.Hishikawa // 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). – Washington, DC, USA, 2017. – P. 481–483. DOI: 10.1109/PVSC.2017.8366426.
8. Hishikawa J. Non-contact measurement of electric potential of photovoltaic cells in a module and novel characterization technologies / J.Hishikawa, K.Yamagoe, T.Onuma // *Japan Journal of Applied Physics*. – 2015. – Vol. 54 (8S1). DOI: 10.7567/JJAP.54.08KG05.
9. Raza H.A. Application of non-contact electrostatic voltmeter to identify underperforming modules in grid-connected photovoltaic systems // H.A. Raza, G.Tamizh-Mani // *Solar Energy*. – 2023. – Vol. 252, № 1. – P. 356–362. DOI: 10.1016/j.solener.2023.02.014.
10. Non-Contact Monitoring of Operating Conditions for Solar Cells in a Photovoltaic Module Using a Surface Potential Meter for Detecting the Risk of Fire / R.Shimizu, Y.Ota, A.Nagaoka and other // *MDPI (Applied Science)*. – 2023. – Vol. 13. DOI: 10.3390/app131810391.

#### References:

1. Schwab, A.J. (1969), *Hochspannungsmesstechnik (Messgerate und Messverfahren)*, Springer-Verlag, 212 p.
2. Greulich, J.M., Wirtz, W., Höffler, H. et al. (2022), «Contactless measurement of current-voltage characteristics for silicon solar cells», *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 248, doi: 10.1016/j.solmat.2022.111931.
3. Bozhko, K.M. and Mushket, K.Ia. (2023), «Bezkontaktniy metod vymiryuvannia shuntovoho oporu okremykh soniachnykh elementiv u skladi paneli», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (92), pp. 174–181, doi: 10.26642/ten-2023-2(92)-174-181.
4. Bozhko, K.M. and Mushket, K.Ia. (2024), «Aktivna antena u vymiryuvanniakh elektrychnykh parametriv soniachnykh elementiv», *Vymiryvalna ta obchysluvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*, No. 3, pp. 100–106, doi: 10.31891/2219-9365-2024-79-14.
5. Bozhko, K.M., Zashchepkina, N.M., Markin, M.O. and Markina, O.M. (2019), «Singl-pulse method for measuring the current-voltage characteristics of solar panels», *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 99, Issues 1–2, pp. 24–29, doi: 10.5604/01.3001.0013.5879.
6. Bozhko, K., Zashchepkina, N. and Bozhko, I. (2021), «Linear current sweep and measuring the current-voltage characteristics of the solar panels», *Actual problems of modern science*, Bydgoszcz, Poland, pp. 747–756, doi: 10.31891/monograph/2021-10-1.
7. Miyajima, S., Nishioka, K. and Hishikawa, Y. (2017), «Non-contact Voltage Measurement of Solar Cell with Electrostatic Voltmeter», *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Washington, DC, USA, pp. 481–483, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366426.
8. Hishikawa, J., Yamagoe, K. and Onuma, T. (2015), «Non-contact measurement of electric potential of photovoltaic cells in a module and novel characterization technologies», *Japan Journal of Applied Physics*, Vol. 54 (8S1), doi: 10.7567/JJAP.54.08KG05.
9. Raza, H.A. and Tamizh-Mani, G. (2023), «Application of non-contact electrostatic voltmeter to identify underperforming modules in grid-connected photovoltaic systems», *Solar Energy*, Vol. 252, No. 1, pp. 356–362, doi: 10.1016/j.solener.2023.02.014.

10. Shimizu, R., Ota, Y., Nagaoka, A. et al. (2023), «Non-Contact Monitoring of Operating Conditions for Solar Cells in a Photovoltaic Module Using a Surface Potential Meter for Detecting the Risk of Fire», *MDPI (Applied Science)*, Vol. 13, doi: 10.3390/app131810391.

**Божко** Костянтин Михайлович – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-6347-7442>.

Наукові інтереси:

- фотоелектричні сонячні елементи і панелі;
- коронний розряд;
- забруднення повітря;
- нечіткі моделі.

**Мушкет** Костянтин Ярославович – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0009-0005-9218-5835>.

Наукові інтереси:

- фотоелектричні сонячні елементи і панелі;
- нечіткі моделі.

**Bozhko K.M., Mushket K.Ya.**

#### **Non-contact measurement of electrical parameters of solar elements**

The oscillographic method of measuring the electrical parameters of solar elements and panels allows getting the result of the measurement signal in a circle directly on the screen in the form of waveforms in real time. The oscilloscope, together with the antenna sensor, is the main means of non-contact measurement of the electrical parameters of solar elements. The measuring variable signal is introduced directly through the terminals of the solar panel from the functional generator, which makes it possible to carry out the measurement process during its operation. The purpose of such measurements can be to monitor the state of the solar panel, as well as to identify defects at an early stage and predict their degradation. Getting predictive information about the state of the solar panel allows planning its entire life cycle and decommissioning it in time. The non-contact measurement method based on an oscilloscope has two types: with an antenna sensor without signal conversion and with an active antenna. In low signal mode, the solar panel can be represented as a series circuit of links, each of which has a parallel connection of capacitance and active resistance. The use of a small signal, the amplitude of which does not exceed the opening voltage of solar elements (diodes) and is practically limited to  $\pm 15$  V. This allows using a low-power function generator in pulsed or sinusoidal voltage mode for measurements without additional signal amplification. The operating frequency range for measurements varies with several hundred hertz to ten kilohertz. The antenna method is derived from the electrostatic voltmeter method, which is widely used in high-voltage measurements. Here, the non-contact principle protects the researcher from the danger of electrical breakdown and damage to his body. In the solar energy sector, the contactless method as a type of non-destructive testing aims to conduct research of an object without decommissioning it. Experimental studies of the non-contact method provided determination of the optimal parameters of the measuring signal: frequency 1500 Hz, amplitude 3 V. Modeling of the measurement scheme in a Multisim environment showed that the results coincided with experimental data with a tolerance of  $\pm 15$  %.

**Keywords:** non-contact measurement; photovoltaic solar element; solar panel; antenna sensor.

Стаття надійшла до редакції 14.10.2024.