

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-14>

УДК 621.383.51

БОЖКО Костянтин

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

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

МУШКЕТ Костянтин

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

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

АКТИВНА АНТЕНА У ВИМІРЮВАННЯХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Метою роботи є обґрунтування використання активної антени в методі безконтактного вимірювання електричних параметрів окремих сонячних елементів у складі фотоелектричної сонячної панелі. Основними задачами даного наукового напрямку є розробка, моделювання та експериментальна перевірка активної антени у складі вимірювального тракту системи безконтактного вимірювання шунтового опору і електричної ємності окремих сонячних елементів у складі фотоелектричної сонячної панелі. Алгоритм вимірювання полягає у пропусканні через зовнішні контакти сонячної панелі синусоїдального сигналу від функціонального генератора. Над окремими сонячними елементами при цьому по черзі встановлюють датчик у формі плоскої антени, на якій наводиться синусоїдальний сигнал, що залежить від сумарного шунтового опору попередньо розташованих сонячних елементів. За рівномірністю спадання амплітуди сигналу від антени по мірі наближення її до кінця лінійки сонячних елементів роблять висновок про відмінність шунтового опору елементів відносно один до одного. Розрахунок шунтового опору окремих елементів виконують за рівняннями з теорії електричних кіл. До початку вимірювань окремо визначають шунтовий опір сонячної батареї в цілому. Активна антена із двома окремими секціями дозволяє отримувати підсилений сигнал, що є різницею сигналів від двох сусідніх сонячних елементів. Такий варіант методу прискорює цикл безконтактних вимірювань та підвищує їх точність. Моделювання схеми вимірювання із активною антеною було попередньо проведено в пакеті Multisim11, що прискорило розробку і допомогло визначити оптимальні параметри елементної бази, а також параметри і характеристики вимірювального сигналу.

Ключові слова: активна антена, сонячна панель, сонячний елемент, шунтовий опір, вимірювальний сигнал.

BOGKO Konstantin, MUSHKET Kostiantyn

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ACTIVE ANTENNA IN MEASUREMENTS OF ELECTRICAL PARAMETERS OF SOLAR ELEMENTS

The purpose of the work is to substantiate the use of an active antenna in the method of non-contact measurement of electrical parameters of individual solar cells as part of a photovoltaic solar panel. The main tasks of this scientific direction are the development, modeling and experimental verification of an active antenna as part of the measuring path of the system for non-contact measurement of shunt resistance and electric capacity of individual solar cells as part of a photovoltaic solar panel. The measurement algorithm consists in passing a sinusoidal signal from a functional generator through the external contacts of the solar panel. At the same time, a sensor in the form of a flat antenna is installed one by one above the individual solar cells, on which a sinusoidal signal is applied, which depends on the total shunt resistance of previously located solar cells. Based on the uniformity of the decrease in the signal amplitude from the antenna as it approaches the end of the line of solar cells, a conclusion is made about the difference in the shunt resistance of the cells relative to each other. The calculation of the shunt resistance of individual elements is performed according to the equations from the theory of electric circuits. Before starting the measurements, the shunt resistance of the solar battery as a whole is determined separately. An active antenna with two separate sections allows you to receive an amplified signal, which is the difference between the signals from two adjacent solar cells. This variant of the method speeds up the cycle of non-contact measurements and increases their accuracy. The simulation of the measurement scheme with an active antenna was previously carried out in the Multisim11 package, which accelerated the development and helped to determine the optimal parameters of the element base, as well as the parameters and characteristics of the measurement signal.

Keywords: active antenna, solar panel, solar cell, shunt resistance, measurement signal.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ

ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Безконтактне вимірювання шунтового опору та інших електричних параметрів окремих сонячних елементів, які послідовно об'єднані між собою і мають нерозривну конструкцію у вигляді панелі, на наш погляд є актуальним у таких випадках:

- при необхідності додаткового контролю сонячної панелі перед встановленням її у важкодоступних місцях, зокрема на дахах і фасадах висотних будівель, адже тільки безконтактний метод дозволяє впевнитись у ідентичності параметрів усіх сонячних елементів і запобігти встановлення панелі, в якій може швидко початись процес деградації;
- при прогнозуванні процесу деградації сонячної панелі в умовах експлуатації, ознакою чого є поступове зменшення шунтового опору її елементів.

Безконтактний метод вимірювання шунтового опору на основі антенних датчиків був реалізований на основі осцилографічних вимірювань параметрів імпульсних сигналів [1]. Проте, цифровий осцилограф має велику похибку вимірювання напруги, яка складає до 1,5%. При типовій кількості елементів 24-вольтової сонячної панелі, яка дорівнює 60, різниця амплітуди сигналів від двох сусідніх елементів на антенних датчиках має середню величину, яка наближена до величини похибки осцилографа. За таких умов за результатами вимірювань можливо відокремити лише ті елементи, шунтовий опір яких значно (на 50% і більше) відрізняється від середнього значення. Для зменшення впливу похибки цифрового осцилографа запропоновано безпосередньо вимірювати різницевий сигнал від двох однакових антенних секцій. При цьому антена є активною, оскільки має схему підсилення диференційного сигналу.

Вимірювання електричних параметрів сонячних панелей та сонячних елементів є наразі актуальною задачею. Метою досліджень в цій сфері зокрема є створення так званих інтелектуальних сонячних модулів, тобто панелей, які мають індивідуальну систему вимірювання та діагностики, яка має використовуватись під час повного терміну їх експлуатації. Прикладом досліджень в цьому напрямку є робота українських фахівців [2], в якій теоретично і експериментально доведено, що основою діагностики сонячної панелі під час її експлуатації є вимірювання її вольт-амперної характеристики та розрахунку на її основі електричних параметрів. Сучасному стану досліджень (до 2022 року включно) з вимірювань вольт-амперних характеристик сонячних панелей при їх експлуатації присвячено огляд [3].

Вольт-амперні характеристики окремих сонячних елементів отримують на основі аналізу їх фотолюмінісцентних [4] та електролюмінісцентних [5] зображень і цей метод є наразі основним у безконтактних вимірюваннях. Кореляції між зміною різних електричних параметрів сонячних елементів присвячено роботу [6].

Інший відомий метод безконтактних вимірювань електричних параметрів сонячних елементів – метод електростатичного вольтметра [7,8]. Дослідження останніх років, які присвячено розвитку саме цього методу, наведено в роботі [9].

Для обґрунтування методу безконтактного вимірювання шунтового опору сонячних елементів розглянемо еквівалентну схему сонячного елемента (Рис. 1).

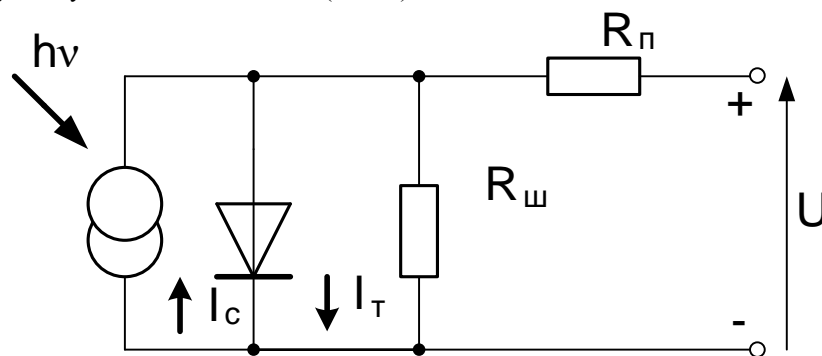


Рис. 1. Еквівалентна схема сонячного елемента: I_c – світловий струм; I_t – темновий струм; $R_{ш}$ – шунтовий опір; R_p – послідовний опір; U – вихідна напруга сонячного елемента

Сонячна панель є конструкцією із послідовного з'єднання певної кількості сонячних елементів. Наприклад, для кремнієвої сонячної панелі з номінальною вихідною напругою 12 В лійка елементів налічує 30 або 36 штук. Із схеми (Рис. 1) впливає важлива роль шунтового опору. У ідеального сонячного елемента опір шунта є нескінченно великим. При зменшенні величини опору шунта через нього починає йти темновий струм I_t і виділяється тепло Джоуля. Внаслідок цього процесу зменшується коефіцієнт корисної дії елементів і панелі в цілому, що є ознакою процесу деградації. Фізичною причиною деградації сонячного елемента є ушкодження структури його поверхневого шару внаслідок виникнення мікро-пробовів під час експлуатації.

Слід зазначити, що еквівалентна схема (Рис.1) не враховує електричну ємність сонячного елемента, яка впливає на його динамічні характеристики, тобто на роботу в режимі змінного сигналу. Якщо на виході сонячного елемента подати змінний вимірювальний сигнал прямокутної імпульсної або синусоїдальної форми, то цей сигнал не пройде через діод, якщо його амплітуда буде меншою за напругу падіння на відкритому діоді. Для кремнію ця напруга приблизно дорівнює 600 мВ. Якщо вимірювальний сигнал подавати на сонячну панель, то умовою для обмеження сигналу є величина напруги у N раз більша, де N – кількість сонячних елементів у панелі. Висновок: сигнал від функціонального генератора із діапазоном амплітуди 0-15 В можна використовувати без додаткових обмежень при виконанні безконтактного вимірювання. Такий режим для сонячної панелі є режимом малого сигналу. Еквівалентна схема для режиму малого сигналу наведена на Рис. 2.

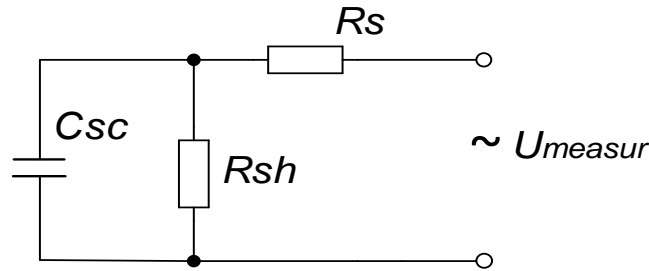


Рис. 2. Еквівалентна схема сонячного елемента в режимі малого сигналу та без освітлення: C_{sc} – ємність сонячного елемента; R_s – послідовний (serial) опір; R_{sh} – шунтовий опір; U_{measur} – напруга вимірювального сигналу від генератора

При подачі вимірювального сигналу на виводи сонячної панелі, сигнал послідовно проходить через усі елементи. По мірі проходження амплітуда сигналу буде ступінчасто спадати від максимуму на виході генератора до нуля. Якщо над сонячними елементами панелі розташувати планарні антени прямокутної форми, то на них буде наводитись такої ж амплітуди, що і на елементі. Антенний струм є малим, тому для виділення сигналу необхідно між антенною і нульовою шиною встановити резистор 1-10 МОм.

Розглянемо коректність методу з точки зору похибки, яка виникає внаслідок нехтування величиною послідовного опору R_s . Умовою такого нехтування є нерівність:

$$R_s \ll R_{sh}; \tag{1}$$

Для якісних сонячних панелей дана умова є дійсною, оскільки їх послідовний опір дорівнює 3-30 Ом, а шунтовий опір складає 3-10 кОм.

Для розрахунку шунтового опору окремих сонячних елементів необхідно спочатку виміряти шунтовий опір панелі.

Вимірювання шунтового опору панелі необхідно виконувати на достатньо низькій частоті вимірювального сигналу, щоб можна було нехтувати ємнісною складовою імпедансу панелі. При типовій ємності панелі 60 нФ на частоті $f = 100$ Гц її реактивний опір розрахуємо за формулою:

$$X_c = 1/2\pi fC; \tag{2}$$

Розраховане значення дорівнює 2,6 Мом, що значно більше типового значення R_{sh} . Таким чином, при вимірюванні шунтового опору панелі виконується умова:

$$X_c \gg R_{sh}; \tag{3}$$

При збільшенні частоти вимірювальний сигнал буде змінювати фазу на таку величину, яку можна виміряти осцилографом. Це надає можливість виміряти імпеданс сонячної панелі і її електричну ємність.

З антенних датчиків сигнал можна подавати безпосередньо на цифровий осцилограф (Рис. 3).

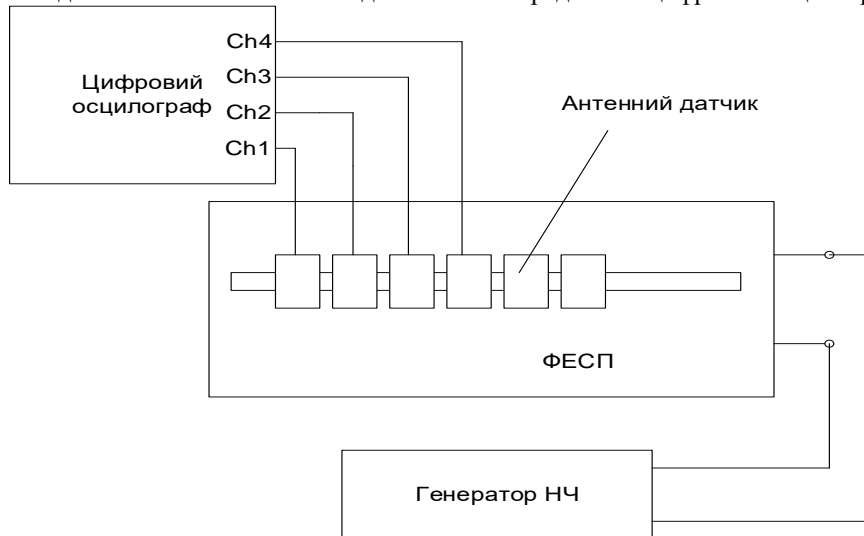


Рис. 3. Структурна схема стенду для безконтактного вимірювання: ФЕСП – фотоелектрична сонячна панель

Як зазначено вище, основним недоліком звичайного безконтактного методу вимірювання шунтового опору сонячних елементів є недостатня роздільна здатність цифрового осцилографа, причиною чого є велика систематична похибка амплітудних вимірювань. Тому розвиток методу потребує використання в якості датчиків активної антени. Для підсилення антенного сигналу авторами обрана схема диференційного підсилювача, входами якого сигнали від двох антен, які розташовують над сусідніми сонячними елементами.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є вдосконалення методу безконтактного вимірювання електричних параметрів окремих сонячних елементів у складі фотоелектричної сонячної панелі на основі використання активної антени.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Запропонований вдосконалений варіант методу безконтактного вимірювання реалізовано в лабораторному стенді (Рис. 4).

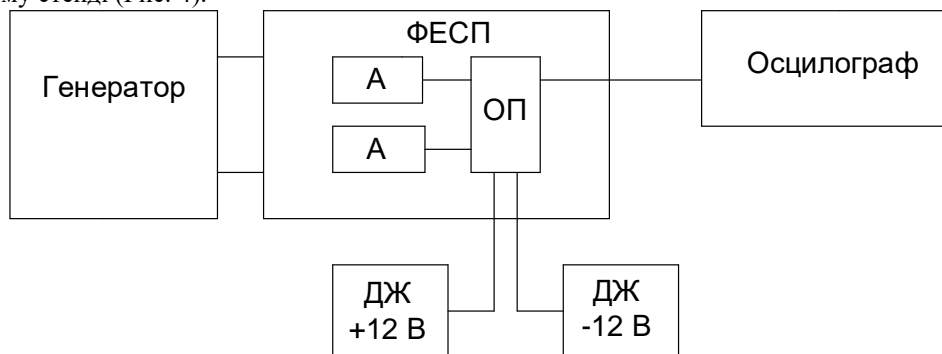


Рис.4. Лабораторний стенд вдосконаленого методу безконтактного вимірювання: А – секція антенного датчика; ДЖ – джерело живлення; ОП – схема на операційному підсилювачі; ФЕСП – фотоелектрична сонячна панель

Для лабораторного стенду були обрані такі прилади:

- цифровий осцилограф Tektronix TDS1002;
- два джерела живлення PS-1502DD;
- функціональний генератор JDS6600.

Дослідження проводили на сонячній панелі 60 Вт, 12 В із полікристалічного кремнію, яка має 36 елементів.

Антенні секції виготовлені із склотекстоліту товщиною 1 мм та з одностороннім вкриттям міддю. Розміри секцій: 30x140 мм.

В якості операційного підсилювача обрано мікросхему LM324N, яка має широке призначення.

Для визначення точних номіналів елементів електричної схеми було проведено моделювання в програмі Multisim 11. В моделі сонячні елементи представлені відповідно до еквівалентної схеми (Рис. 2). При цьому сукупність сонячних елементів до антенного датчика та після нього замінені на еквівалентні резистори та конденсатори.

Величини шунтового опору і електричної ємності сонячних елементів в моделі є типовими для кремнієвих сонячних панелей.

Результати моделювання дозволили також визначити параметри вимірювального сигналу від генератора. Форма сигналу – синусоїда. Результат роботи моделі представлено на Рис. 5.

Відповідно до моделі (Рис. 5) перший канал осцилографа виводить підсилений диференціальний сигнал від двох секцій антенного датчика, його амплітуда складає приблизно 50% від амплітуди сигналу з антени. Таким чином вирішена задача підвищення точності вимірювання шунтового опору, оскільки тут вимірюють підсилену різницю сигналів від двох антен, які розташовані над сусідніми сонячними елементами.

Самі антенні датчики в моделі представлені електричними ємностями, величина яких була розрахована за формулою для плоского конденсатора із двошаровим діелектричним заповненням: склом і склотекстолітом:

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}}; \quad (4)$$

де S – площа пластини конденсатора; d_1 , d_2 – товщина першого та другого шару діелектрика; ϵ_1 та ϵ_2 – діелектрична стала першого та другого шару діелектрика; C – електрична ємність.

За формулою (4) розраховують ємність при розташуванні датчиків на лицьовій стороні сонячної панелі, яка має захисне скло. На тильній стороні скло відсутнє і ємність датчика значно зростає.

Модель побудована для сонячної панелі 270 Вт, 24 В із 60 елементами та датчиками з площею 150 кв. см кожний. Результати моделювання виявилися придатними для побудови універсальної схеми підсилювача, який і був експериментально досліджений на панелі 60 Вт, 12 В.

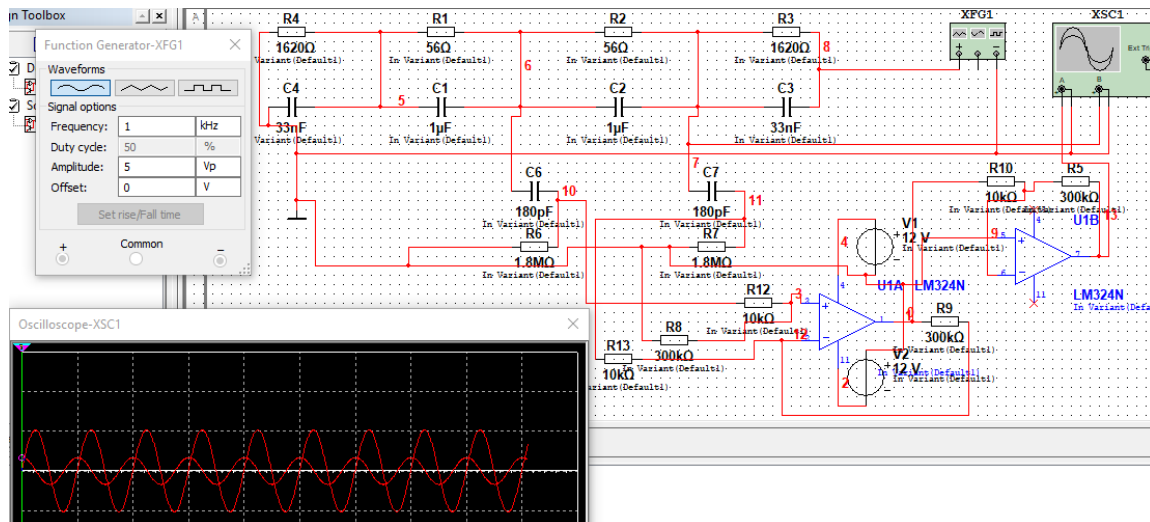


Рис. 5. Модель лабораторного стенду на основі активної антени в програмі Multisim11: розгортка осцилографа – 1мс/поділку; масштаб напруги – 5В/поділку для обох каналів; частота вимірювального сигналу 1 кГц; діюче значення сигналу на виході генератора 5В

При роботі з моделлю з'ясовано важливий факт: величину резистора навантаження для активних антенних датчиків слід значно зменшити у порівнянні із звичайною антеною, а саме з 10 МОм до 1,8 МОм, що і було здійснено практично. Необхідність зменшення величини резистора у схемі підсилювача викликана недостатнім входним опором операційного підсилювача LM324N, що і показало моделювання.

Лабораторний стенд в дії, який було зібрано відповідно до схеми (Рис. 4) наведено на Рис. 6.



Рис. 6. Лабораторний стенд з безконтактного вимірювання шунтового опору сонячних елементів в дії: на задньому плані фото видно тильну сторону сонячної панелі, самі антени датчики в кадрі відсутні

При використанні довгих дротів для з'єднання складових стенду на виході схеми підсилення з'являється імпульсна завада частотою 50 кГц, яка модульована сигналом від датчика. Джерелом завади є імпульсне джерело живлення цифрового осцилографу. При заміні осцилографа на інший завада зникає.

Процес безконтактного вимірювання шунтового опору на лицьовій стороні сонячної панелі за допомогою активної антени наведено на Рис. 7.

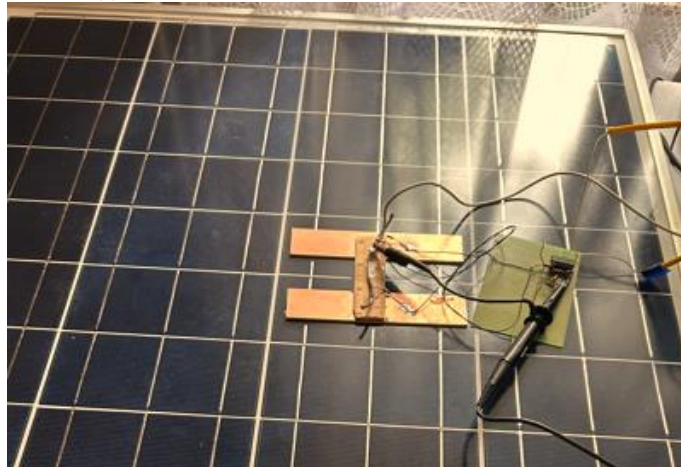


Рис. 7. Процес безконтактного вимірювання шунтового опору сонячних елементів на лицьовій стороні сонячної панелі

Щодо самої електричної схеми підсилювача, то вона має два каскади, перший з яких – диференціальний підсилювач, другий – інвертуючий підсилювач. Розрахунковий коефіцієнт підсилення для кожного із каскадів приблизно дорівнює 30.

Вихідний сигнал активної антени, розташованої на лицьовій стороні сонячної панелі, наведено на Рис. 8.

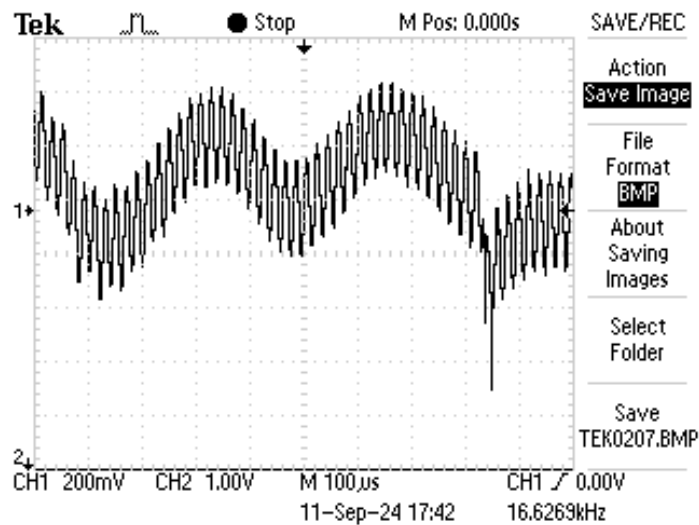


Рис. 8. Осцилограма вихідного сигналу активної антени на фоні завади: частота вимірювального сигналу 2,8 кГц; частота завади 50 кГц

Аналіз осцилограми (Рис. 8) дозволяє визначити амплітуду вихідного сигналу активної антени, яка приблизно складає 250 мВ. Це значення вдсятеро відрізняється від результату моделювання. Для збільшення амплітуди сигналу необхідно додати третій каскад у схемі підсилювача. Для придушення імпульсної високочастотної завади необхідно додати до схеми активний фільтр низьких частот, який слід побудувати на одній секції мікросхеми LM324N.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

В результаті проведених досліджень були вирішені такі наукові і практичні задачі:

- розглянуто сучасний стан основних напрямків досліджень з безконтактних методів вимірювання електричних параметрів сонячних елементів;
- розглянуто базовий метод безконтактного вимірювання шунтового опору сонячних елементів у складі панелі за допомогою антенних датчиків;

- проаналізовано обмеження базового методу і обґрунтовано його розвиток на основі використання активної антени;
- розроблено модель лабораторного стенду для безконтактних вимірювань у програмі Multisim11;
- створено діючий макет активної антени та проведено його випробування у складі лабораторного стенду;
- отримано експериментальні результати, за якими визначені основні недоліки схеми, а саме недостатній коефіцієнт підсилення та недостатня завадостійкість до високочастотних завад;
- запропоновано шляхи покращення діючої схеми активної антени на основі додавання третього каскаду підсилення і активного фільтру низьких частот.

Наступним етапом досліджень, окрім вдосконалення електричної схеми активної антени, є експериментальне визначення шунтового опору кожного із сонячних елементів на різних сонячних панелях та отримання даних щодо режимів і параметрів вимірювального сигналу для кожного із типів панелей.

Література

1. К.М. Божко, К.Я. Мушкет, “Безконтактний метод вимірювання шунтового опору окремих сонячних елементів у складі панелі”, *Технічна інженерія*, №2(92), 2023, с.174-181. DOI: 10.26642/ten-2023-2(92)-174-181.
2. О.Ю. Гаєвський, В.Ю. Іванчук, І.О. Корнієнко, “Система вимірювання параметрів фотоелектричних модулів в реальних умовах експлуатації”, *Відновлювальна енергетика*, №2(57), 2019, с. 32-39. DOI: 10.36296/1819-8058.2019.2(57).32-39.
3. Augusto, A, Killam, S.G. Bowden, H. Wilterdink, “Measuring outdoor I–V characteristics of PV modules and systems”, *Progress in Energy*, Vol.4, 2022, 33 p. DOI: [10.1088/2516-1083/ac851c](https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac851c).
4. J. Liu, A. Melnikov, A. Mandelis, “Contactless measurement of electrical parameters and estimation of current-voltage characteristics of Si solar cells using the illumination intensity dependence of lock-in carrierography (photoluminescence) images”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 114, 2013, 6p. DOI: 10.1063/1.4821120.
5. K.S. Chan at al., “Application of non-contact quantum efficiency measurement for solar cell fabrication process insights”, *Solar Energy*, Vol. 233, 2022, pp. 494-503. DOI: 10.1016/j.solener.2021.12.054.
6. M. Musztyfaga-Staszuk, D. Junicki, P. Panek, “Correlation of Different Electrical Parameters of Solar Cells with Silver Front Electrodes”, *Materials*, Vol. 12, 2019, 12p. DOI: 10.3390/ma12030366.
7. S. Miyajima, K. Nishioka and Y. Hishikawa, "Non-contact Voltage Measurement of Solar Cell with Electrostatic Voltmeter," *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Washington, DC, USA, 2017, pp. 481-483, DOI: 10.1109/PVSC.2017.8366426.
8. J. Hishikawa, K. Yamagoe, T. Onuma, “Non-contact measurement of electric potential of photovoltaic cells in a module and novel characterization technologies”, *Japan Journal of Applied Physics*, Vol.54(8S1), 2015, 08KG05. DOI: 10.7567/JJAP.54.08KG05.
9. M. Greulich at al., “Contactless measurement of current-voltage characteristics for silicon solar cells”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 248, 2022, 111931. DOI: 10.1016/j.solmat.2022.111931.

References

1. K.M. Bozhko, K.Ia. Mushket, “Bezkontaktniy metod vymiryuvannya shuntovoho oporu okremykh soniachnykh elementiv u skladi paneli”, *Tekhnichna inzheneriia*, №2(92), 2023, s.174-181. DOI: 10.26642/ten-2023-2(92)-174-181.
2. O.Iu. Haievskiyi, V.Iu. Ivanchuk, I.O. Korniienko, “Systema vymiryuvannya parametriv fotoelektrychnykh moduliv v realnykh umovakh ekspluatatsii”, *Vidnovliuvalna enerhetyka*, №2(57), 2019, s. 32-39. DOI: 10.36296/1819-8058.2019.2(57).32-39.
3. Augusto, A, Killam, S.G. Bowden, H. Wilterdink, “Measuring outdoor I–V characteristics of PV modules and systems”, *Progress in Energy*, Vol.4, 2022, 33 p. DOI:10.1088/2516-1083/ac851c.
4. J. Liu, A. Melnikov, A. Mandelis, “Contactless measurement of electrical parameters and estimation of current-voltage characteristics of Si solar cells using the illumination intensity dependence of lock-in carrierography (photoluminescence) images”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 114, 2013, 6p. DOI: 10.1063/1.4821120.
5. K.S. Chan at al., “Application of non-contact quantum efficiency measurement for solar cell fabrication process insights”, *Solar Energy*, Vol. 233, 2022, pp. 494-503. DOI: 10.1016/j.solener.2021.12.054.
6. M. Musztyfaga-Staszuk, D. Junicki, P. Panek, “Correlation of Different Electrical Parameters of Solar Cells with Silver Front Electrodes”, *Materials*, Vol. 12, 2019, 12p. DOI: 10.3390/ma12030366.
7. S. Miyajima, K. Nishioka and Y. Hishikawa, "Non-contact Voltage Measurement of Solar Cell with Electrostatic Voltmeter," *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Washington, DC, USA, 2017, pp. 481-483, DOI: 10.1109/PVSC.2017.8366426.
8. J. Hishikawa, K. Yamagoe, T. Onuma, “Non-contact measurement of electric potential of photovoltaic cells in a module and novel characterization technologies”, *Japan Journal of Applied Physics*, Vol.54(8S1), 2015, 08KG05. DOI: 10.7567/JJAP.54.08KG05.
9. M. Greulich at al., “Contactless measurement of current-voltage characteristics for silicon solar cells”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 248, 2022, 111931. DOI: 10.1016/j.solmat.2022.111931.