

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогодні одним із пріоритетних напрямків розвитку електроенергетики є використання відновлюваних джерел, зокрема, енергії Сонця. Проте суттєвою проблемою тут є висока собівартість електроенергії. Подовження терміну експлуатації фотоелектричних сонячних батарей (ФЕСБ) є одним із головних напрямів зменшення собівартості електроенергії. Наявність дефектів суттєво скорочує термін експлуатації ФЕСБ та зменшує її коефіцієнт корисної дії (ККД). Відомі методи і засоби контролю дефектів ФЕСБ орієнтовані на використання в умовах виробництва для забезпечення поопераційного контролю технологічного ланцюга. При цьому процес експлуатації ФЕСБ, тривалість якого може складати більше двадцяти років, не супроводжується належним контролем. Це спонукає до вдосконалення методів і засобів контролю ФЕСБ для вимірювання їх експлуатаційних характеристик, а також виявлення дефектів і вимірювання їх геометричних параметрів.

Головним джерелом інформації про експлуатаційні параметри та характеристики ФЕСБ є вольт-амперна характеристика (ВАХ), з якої визначають ККД, максимальну потужність, струм короткого замикання, напругу холостого ходу, струм і напругу при максимальній потужності, коефіцієнт форми тощо. Аналіз ВАХ дозволяє також здійснювати контроль дефектів на ранній стадії їх розвитку та прогнозувати деградацію ФЕСБ, що є важливим чинником для забезпечення корекції навантаження та відбору до нього максимальної потужності. При вимірюванні ВАХ основною проблемою є нестабільність вимірюваних параметрів внаслідок нагрівання ФЕСБ при освітлюванні. Так, при збільшенні температури на кожні 10 °С ККД зменшується на 4%. Нагрівання під час вимірювань, зокрема, внаслідок виділення джоулевого тепла, є одним із головних чинників методичної похибки, для зменшення якої розроблені динамічні (імпульсні) методи і засоби вимірювання. Проте відомі засоби вимірювання ВАХ не позбавлені повністю впливу нагрівання ФЕСБ джоулевым теплом, яке генерує вимірювальне коло, оскільки використовують багато-імпульсний метод вимірювання із тривалим сумарним терміном протікання струму. Наведені вище аргументи свідчать про необхідність вдосконалення динамічних методів і засобів вимірювання ВАХ ФЕСБ.

Відомо, що при нагріванні ФЕСБ зворотним темновим струмом прихований дефект є причиною виникнення неоднорідності теплового поля на її поверхні. Вимірювання геометричних параметрів дефекту за тепловим полем методом інфрачервоної термографії (ІЧТ) має значну похибку, причиною якої є, зокрема, нестабільність зворотного струму. Зменшення похибки потребує вдосконалення даного методу. Відомо також, що при протіканні зворотного темнового струму в кремнієвих пластинах ФЕСБ збуджуються електролюмінесцентні дефекти (ЕЛД). Існуючі телевізійні інформаційно-вимірювальні системи (ТІВС) дозволяють вимірювати

геометричні параметри ЕЛД із похибкою, більшою за один піксел. Питання щодо зменшення похибки вимірювання залишається відкритим.

Надане вище свідчить про актуальність теми дисертаційного дослідження, спрямованого на вдосконалення методів і засобів контролю дефектів ФЕСБ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тематика дисертації пов'язана з дослідженнями, які проводились на кафедрі наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» в рамках науково-дослідних робіт: «Дослідження технологій з'єднання прецизійних деталей електронних приладів» (Договір № 232/27-11, № держреєстрації 0112U006802), «Застосування сплайн-функцій при дослідженнях температурного поля на поверхні зонної плавки кремнію» (№ держреєстрації 0112U004379); «Розроблення способу телевізійного контролю якості інфрачервоних матеріалів електронної техніки та нанокристалічних матеріалів» (Договір № 13/27-14, № держреєстрації 0114U005067), «Розробка контролю якості склокристалічних матеріалів з використанням телевізійної вимірювальної системи» (Договір № 28/27-15, № держреєстрації 0115U001576), «Підвищення точності вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей» (№ держреєстрації 0115U001468), де здобувач був виконавцем етапів робіт.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є зменшення похибок вимірювання геометричних розмірів дефектів фотоелектричних сонячних батарей, які виявляються при нагріванні батарей зворотним темновим струмом, а також зменшення похибок вимірювання їх вольт-амперних характеристик.

Поставлена мета досягається шляхом вирішення таких наукових задач:

1. Аналіз методів та засобів контролю дефектів та вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей;
2. Обґрунтування та створення динамічного методу вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей на основі лінійної розгортки струму з метою зменшення похибки за рахунок пониження виділення джоулевого тепла;
3. Розробка математичної моделі динамічного методу вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей із вдосконаленням фільтрації високочастотної складової сигналу;
4. Створення методу нагрівання фотоелектричних сонячних батарей зворотним темновим струмом з метою виявлення на ранній стадії дефектів та вимірювання їх геометричних параметрів на основі застосування інфрачервоної термографії;
5. Вдосконалення методу термографічного контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей для вимірювання коефіцієнту теплопровідності клейових з'єднань сонячних елементів при їх нагріванні зворотним темновим струмом;

6. Вдосконалення методу телевізійного контролю електролюмінісцентних дефектів фотоелектричних сонячних елементів і батарей з метою вимірювання їх геометричних параметрів;

7. Експериментальна перевірка методу та засобу динамічного вимірювання вольт-амперних характеристик, а також методів та засобів термографічного і телевізійного контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей.

Об'єктом дослідження є процес виявлення дефектів та їх вплив на експлуатаційні параметри і характеристики фотоелектричних сонячних батарей.

Предметом дослідження є методи і засоби контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей.

Методи дослідження. В математичній моделі фільтрації високочастотної складової сигналу застосовано метод визначення гладкої статистичної нелінійності об'єкту з довільною динамікою (моделі Гамерштейна та Пухова-Хатіашвілі). При вдосконаленні контролю дефектів методом інфрачервоної термографії при протіканні темного струму використано теоретичну базу пірометрії. У методах досліджень використано математичну статистику при обробці експериментальних результатів.

Для розробки та відлагодження програмного забезпечення використано середовище програмування мікроконтролерів AVR Studio. Для моделювання роботи електронних схем використано пакет Multisim EWB. В якості середовища виконання створених програмних продуктів обрано системи Windows XP SP3 та Windows 7.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Вперше розроблено метод та засіб динамічного вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей на основі лінійної розгортки струму, який відрізняється від аналогів розширеним на 50% діапазоном струму, підвищеною у 10 раз швидкодією, зменшенням у 10 разів виділення джоулевого тепла та зменшенням відносної похибки на 10%.

2. Вперше створено математичну модель динамічного вимірювання вольт-амперних характеристик на основі розкладу за часом в ряд Тейлора струму фотоелектричної сонячної батареї, яка враховує активний опір, індуктивність та ємність у вимірювальному колі та дозволяє проектувати пристрої лінійної розгортки струму із заданими параметрами; вдосконалено модель на основі методів Гамерштейна та Пухова-Хатіашвілі шляхом визначення гладкої статичної нелінійності для апроксимації нею поведінки об'єкту із довільною динамікою, застосування якої дозволяє компенсувати паразитні високочастотні коливання у вимірювальному колі фотоелектричної сонячної батареї.

3. Вперше запропоновано метод нагрівання фотоелектричних сонячних батарей зворотним темновим струмом для контролю їх дефектів на основі інфрачервоної термографії, який дозволяє виявляти і вимірювати геометричні розміри дефектів на ранній стадії розвитку від 100 мкм.

4. Вдосконалено метод інфрачервоної термографії для вимірювання коефіцієнту теплопровідності клейових з'єднань фотоелектричних сонячних батарей при їх нагріванні зворотним темновим струмом із похибкою 5% за умов стаціонарного теплообміну;

5. Вдосконалено метод телевізійного контролю, що дозволило вимірювати геометричні параметри електролюмінісцентних дефектів розміром від 5 мкм для фотоелектричних сонячних елементів і батарей та зменшити похибку вимірювань на 30%.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Розроблено методику динамічного вимірювання вольт-амперних характеристик в умовах лабораторного і природного освітлення.

2. Розроблено методику графічного обчислення теплової потужності дефектів при нагріванні фотоелектричних сонячних батарей зворотним темновим струмом.

3. Розроблено та виготовлено лабораторний стенд для динамічного вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей із діапазоном потужності від 1 до 300 Вт, відносна похибка вимірювання напруги якого не перевищує 1%.

4. Розроблено та виготовлено лабораторний стенд для телевізійного контролю електролюмінісцентних дефектів сонячних елементів та фотоелектричних сонячних батарей, який дозволяє вимірювати геометричні розміри дефектів з роздільною здатністю 2 мкм.

5. Отримано нові експериментальні результати про динаміку розвитку дефектів фотоелектричних сонячних батарей при їх нагріванні зворотним темновим струмом.

6. Розроблено та виготовлено імітатор сонячного випромінювання на основі масиву галоген-вольфрамових ламп, який забезпечує контроль фотоелектричних сонячних батарей із максимальною потужністю 300 Вт.

7. Розроблено програмне забезпечення для імпульсного генератора пристрою лінійної розгортки струму із інтерактивним режимом управління частотою та шпаруватістю імпульсів.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримані здобувачем самостійно. Наукові положення, які винесені на захист, та висновки дисертаційної роботи належать автору.

У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: [1] – обґрунтування вимірювання геометричних розмірів об'єктів із суб-піксельною точністю; [2] – вдосконалення методу інфрачервоної термографії для контролю дефектів сонячних елементів при їх нагріванні зворотним темновим струмом; [3] – вдосконалення телевізійного методу і засобу контролю електролюмінісцентних дефектів фотоелектричних сонячних батарей; [4] – обґрунтування єдиного підходу до візуалізації дефектів сонячних елементів і батарей методами інфрачервоної термографії та телевізійного контролю на основі нагрівання зворотним темновим струмом;

[5] – вдосконалення методу інфрачервоної термографії для контролю дефектів сонячних елементів і батарей на основі стабілізації зворотного темного струму; [6] – вдосконалення математичної моделі сигналу на основі методів Гамерштейна та Пухова-Хатіашвілі, що дозволило відфільтрувати високочастотні паразитні коливання при обробці вольт-амперної характеристики фотоелектричної сонячної батареї; [7] – отримано методом інфрачервоної термографії часову залежність температури на скляній стінці при охолодженні обмеженого нею об'єкту, що дозволило ввести спрощення при розрахунку коефіцієнту теплопровідності різних конструкцій, зокрема, фотоелектричної сонячної батареї; [8] – вдосконалено термографічний метод контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей, що дозволило вимірювати коефіцієнт теплопровідності клейового шару її конструкції; [10] – вдосконалено телевізійний метод контролю електролюмінесцентних дефектів фотоелектричних сонячних батарей; [11] – застосовано пікову потужність при порівняльному аналізі сонячних елементів; [14] – вдосконалено телевізійний мікроскоп для контролю клейових з'єднань сонячних елементів; [15] – обґрунтування комплексного дослідження сонячних елементів телевізійним та осцилографічним методами; [16] – вдосконалено метод інфрачервоної термографії для контролю дефектів сонячних елементів при їх нагріванні зворотним темновим струмом; [17] – розробка еквівалентних схем сонячних елементів із дефектами; [18] – розробка телевізійної інформаційно-вимірювальної системи для контролю електролюмінесцентних дефектів фотоелектричних сонячних батарей; [22] – розрахунок похибки при переході до нового стандарту сонячного випромінювання; [23] – розробка динамічного методу вимірювання вольт-амперної характеристики фотоелектричної сонячної батареї на основі лінійної розгортки струму; [24] – розробка математичної моделі перехідного процесу в колі розгортки струму із врахуванням електричної ємності фотоелектричної сонячної батареї; [25] – обґрунтовано графічний метод розрахунку теплової потужності дефекту фотоелектричної сонячної батареї при протіканні зворотного темного струму.

Апробація результатів дисертації здійснена на 3 міжнародних та 12 всеукраїнських науково-технічних конференціях: «Інтердисциплінарні дослідження в галузях інформаційних технологій, економіки, математики і техніки» (15-а Всеукр. н. конф., 29-30 жовтня 2012 р., Тернопіль), «Наукові дослідження – інструмент вирішення актуальних проблем економіки» (16-а Всеукр. н. конф., 28-29 листопада 2012 р., Тернопіль), «Приладобудування: стан і перспективи» (12-а Міжн. н.-техн. конф. 23-24 квітня 2013 р., Київ), «Актуальні проблеми економіки України: науковий підхід до їх вирішення» (Всеукр. н. конф. 27-28 лютого 2013 р., Тернопіль), «Наукові дослідження: шлях від теоретичного пошуку до практичної реалізації» (Всеукр. н. конф. 28-29 березня 2013 р., Тернопіль), «Сучасна наука – інструмент динамічного розвитку економіки України» (Всеукр. н. конф. 20-21 травня 2013 р., Тернопіль), «Економічна кібернетика – інженерія економік» (Всеукр. н.

конф. 27-28 вересня 2013 р., Тернопіль), «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (Всеукр. н. конф. 30-31 січня 2014 р., Тернопіль), «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (Всеукр. н. конф. 30-31 березня 2014 р., Тернопіль), «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (Всеукр. н. конф. 25-26 квітня 2014 р., Тернопіль), «Приладобудування: стан і перспектив» (13-а Міжн. н.-техн. конф. 23-24 квітня 2014 р., Київ), «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (Всеукр. н. конф. 22-23 грудня 2014 р., Тернопіль), «Приладобудування: стан і перспективи» (14-а Міжн. н.-техн. конф. 22-23 квітня 2015 р., Київ), «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (Всеукр. н. конф. 22-23 квітня 2015 р., Тернопіль), «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (Всеукр. н. конф. 20-21 травня 2015 р., Тернопіль).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано в 25 наукових роботах, серед яких 7 статей у фахових виданнях (в тому числі 4 роботи в іноземних виданнях та 3 у виданнях України, що включені до наукометричних баз даних), 3 патенти України на корисну модель, 15 тез доповідей на науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Основний зміст роботи викладений на 172 сторінках, складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літературних джерел із 156 назв, 75 рисунків та 10 таблиць, а також має 2 додатки на 8 сторінках. Загальний обсяг дисертації складає 180 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі показана актуальність теми, обґрунтована необхідність вдосконалення методів і засобів контролю ФЕСБ, сформульовані мета і задачі дослідження, визначено наукову новизну, практичну цінність та показаний зв'язок роботи з науковими програмами, наведена структура дослідження.

В першому розділі показано, що розвиток технологій ФЕСБ має на меті збільшення їх ККД. Встановлено, що переважну частину (більше 80%) електричної енергії від Сонця отримують від елементів на основі моно- і полікристалічного кремнію. Показано, що причиною зниження ККД ФЕСБ є підвищення температури ФЕСБ. Так, при її підвищенні на кожні 10 градусів ККД падає на 4%. Встановлено, що причиною додаткового виділення тепла є, перш за все, дефекти кремнієвих пластин. Показано, що для забезпечення штатного режиму експлуатації ФЕСБ необхідний контроль їх дефектів, які виявляють методом нагрівання темновим струмом. При нагріванні SE та ФЕСБ прямим і зворотним темновим струмом на їх поверхні формуються температурні поля із характерними неоднорідностями в місцях розташування дефектів. Метод ІЧТ дозволяє за отриманими термограмами виявити дефекти та виміряти їх потужність. Контроль дефектів ФЕСБ в умовах експлуатації

методом інфрачервоної термографії при нагріванні їх темновим струмом досі не застосовувався. Досліджено, що ЕЛД ФЕСБ активуються при протіканні зворотного темного струму і для їх контролю запропоновано ТІВС.

Встановлено, що експлуатаційні параметри і характеристики ФЕСБ отримують із її ВАХ. За наявності дефектів і локального перегріву ВАХ має характерні відмінності, зокрема пологоу форму. В наш час вимірюють ВАХ, як правило, лише при виробництві ФЕСБ. Нами обґрунтовано доцільність даного вимірювання також в процесі експлуатації з метою раннього виявлення дефектів ФЕСБ та корекції навантаження при їх наявності. При вимірюванні ВАХ об'єкт може перегріватись внаслідок опромінення Сонцем або імітатором, внаслідок чого результати вимірювання отримують додаткову методичну похибку. Для зменшення виділення тепла при поглинанні світла об'єктом та стабілізації його температурного режиму застосовують імпульсні (динамічні) методи вимірювання ВАХ. Проте необхідність формування багатоімпульсної серії вимірювальних сигналів в існуючих засобах не дозволяє запобігти зміни температури об'єкту в процесі вимірювання ВАХ. Це спонукає до розробки одноімпульсного методу.

Після активації дефектів зворотним темновим струмом їх легко ідентифікувати за виміряною ВАХ. Таким чином, метод нагрівання ФЕСБ зворотним темновим струмом є основою для ІЧТ дефектів і телевізійного контролю ЕЛД, а також є додатковим для динамічного вимірювання ВАХ. Метою контролю дефектів є подовження терміну безаварійної експлуатації ФЕСБ та зниження витрат на їх технічне обслуговування і ремонт.

Виконано порівняльний аналіз стандартів МЕК 60904-3-2013 та ASTM E891-92. Встановлено, що різниця між інтегральними світимостями Сонця для даних стандартів складає $0,13 \text{ Вт/м}^2$, що в перерахунку на відсотки дорівнює $0,02\%$. В результаті доведена придатність результатів вимірювання в межах дії попереднього стандарту для порівняльного аналізу із результатами, які відповідають новому стандарту (рис. 1).

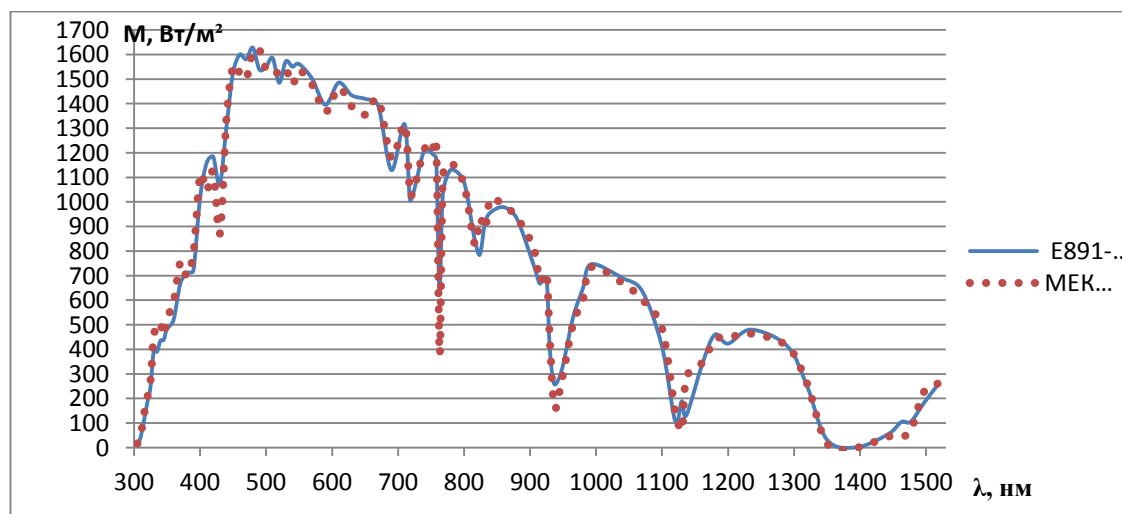


Рисунок 1 – Залежність сонячної світимості від довжини хвиль за стандартом ASTM E891-92 та МЕК 60904-3-2013(показана крапками)

Проведено аналіз методів і засобів вимірювання ВАХ і виявлено їх обмеженість для умов експлуатації ФЕСБ. Показано переваги імпульсних (динамічних) методів вимірювання і доведено необхідність їх вдосконалення.

Для стимуляції дефектів і прояву їх дії запропоновано використати нагрівання ФЕСБ зворотним темновим струмом від зовнішнього джерела живлення (Рис. 2). Показано, що ІЧТ на основі нагрівання зворотним темновим струмом і телевізійний контроль ЕЛД в умовах експлуатації ФЕСБ можуть забезпечити контроль дефектів на ранній стадії їх розвитку.

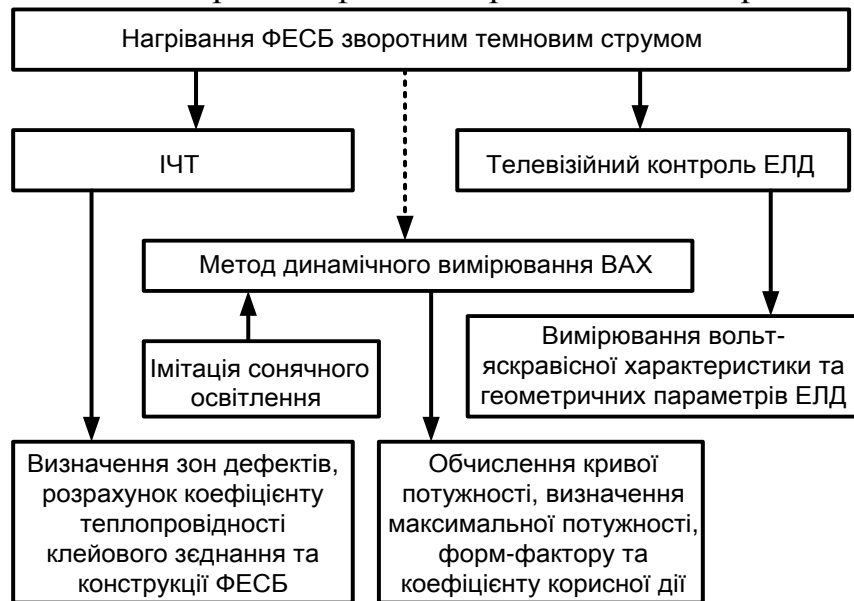
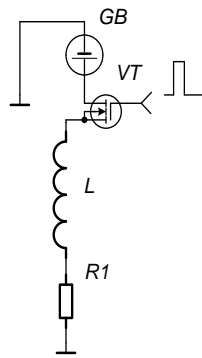


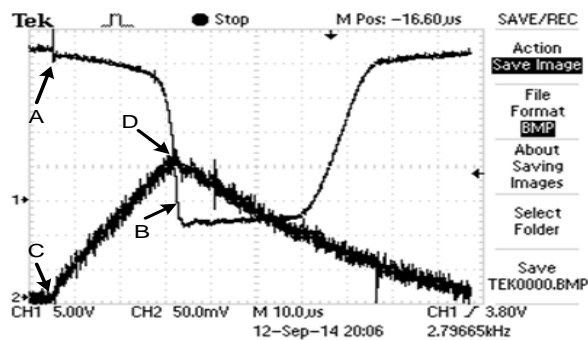
Рисунок 2 – Діаграма застосування методів контролю дефектів ФЕСБ. Показано, що метод динамічного вимірювання ВАХ можна застосовувати із попередньою стимуляцією дефектів нагріванням ФЕСБ.

Другий розділ присвячений вдосконаленню методів контролю дефектів ФЕСБ. Створено математичну модель лінійної розгортки струму яка стала основою нового динамічного методу вимірювання ВАХ. Особливістю методу є здійснення вимірювання лише за один імпульс тривалістю 10 – 20 мкс, що дозволяє називати даний метод одноімпульсним. Суть методу полягає в комутації силовим транзистором послідовного кола із ФЕСБ та котушки індуктивності (Рис.3), струм в якій змінюється лінійно в залежності від часу.

Для незалежного вимірювання струму і експериментальної перевірки лінійності процесу його розгортки до вимірювального кола послідовно із котушкою індуктивності було додано вимірювальний резистор. При осцилографічному контролі отримують ВАХ в координатах струм-напруга з похибкою в 1%. Використання цифрового осцилографу дозволяє записувати ВАХ в його пам'ять в форматі Excel MS Office і потім здійснювати математичну обробку.



а)



б)

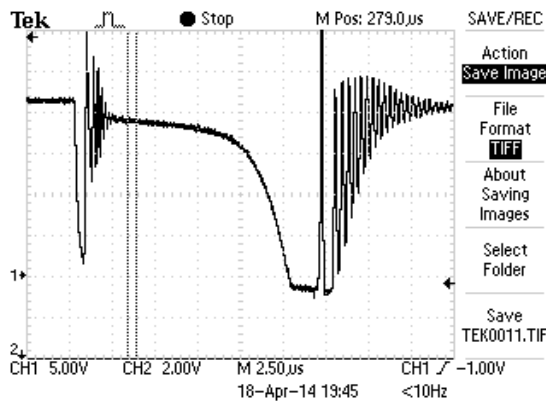
Рисунок 3 а) – Схема кола розгортки: GB – ФЕСБ; L – котушка індуктивності; $R1$ – резистор для вимірювання струму; б) – Осцилограми з екрану Tektronix 1020: CH1 – канал напруги, на колекторі транзистора VT ; CH2 – канал струму; А та В – початок і кінець ВАХ; С та D – початок і кінець розгортки струму

Для аналітичної залежності струму від часу отримали формулу:

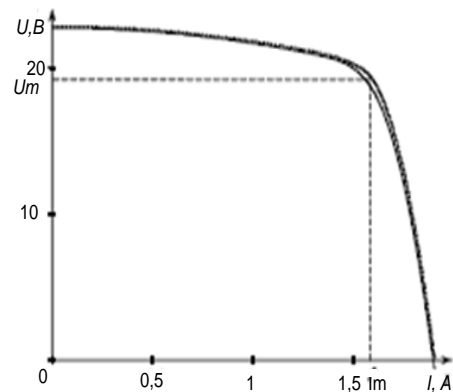
$$I = k(E/E_{1,5}) \cdot I_{кз} \cdot R_{вн} \cdot t/L, \quad (1)$$

де I – струм ФЕСБ, $I_{кз}$ – струм короткого замикання, $R_{вн}$ – внутрішній послідовний опір ФЕСБ, t – час, L – індуктивність; $k(E/E_{1,5})$ – коефіцієнт пропорційності, який лінійно залежить від енергетичної освітленості E ; $E_{1,5}$ – енергетична освітленість 1000 Вт/м^2 (для атмосферної маси AM1,5).

Розроблена модель діє в межах зростання струму від 0 до $I_{кз}$. В колі розгортки можуть виникати високочастотні коливання в діапазоні 1-2 МГц (Рис.4, а), що спотворюють ВАХ.



а)



б)

Рисунок 4 – а) Осцилограма ВАХ ФЕСБ за наявності високочастотних коливань: по осі ординат відкладено напругу, по осі абсцис – струм, який пропорційний до часу; напруга холостого ходу дорівнює $22,0 \text{ В}$; струм короткого замикання дорівнює $1,90 \text{ А}$; б) результат фільтрації ВАХ за вдосконаленими моделями Гамерштейна та Пухова-Хатіашвілі

Для отримання істинної ВАХ на фоні коливань застосовано фільтрацію за вдосконаленими моделями Гамерштейна та Пухова-Хатіашвілі. Суть базової моделі полягає у визначення гладкої статичної нелінійності з довільною динамікою для об'єкту (непараметрична модель). Нами запропоновано апроксимувати непараметричну функцію сплайнами із квази-

фінітних параметрично заданих функцій, які диференційовані на всій множині значень (рис. 4,б). Встановлено, що напруга і струм мають шумову складову та динамічну коливальну складову на початку процесу розряду батареї на резистивно-індуктивне навантаження із систематичною постійною похибкою:

$$\Delta U = E - \frac{E \cdot 1/R_{\text{вн}} + L \cdot di/dt \cdot 1/R_{\text{Д}}}{1/R_{\text{вн}} \cdot 1/R_{\text{Д}}}, \quad (2)$$

де $R_{\text{вн}}$ – внутрішній послідовий опір ФЕСБ; $R_{\text{Д}}$ – додатковий вимірювальний резистор; E – напруга холостого ходу ФЕСБ; $di/dt = \text{const}$.

Доведено, що параметрична модель ВАХ із похибкою 0,5% співпадає із вихідною непараметричною моделлю і має апроксимацію кусково-аналітичними функціями, які на противагу сигнум-функціям є диференційованими і така модель може бути застосована без обмежень в аналітичній формі для алгоритму регулятора потужності електричного навантаження ФЕСБ:

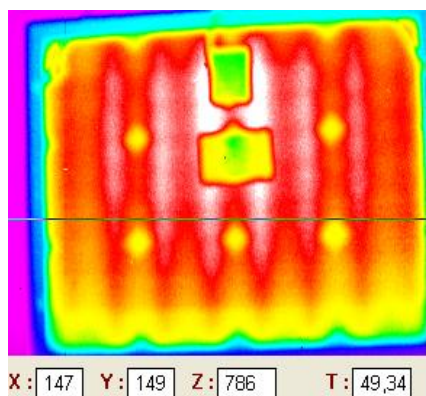
$$U(I) = \eta_1(I) \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 I^2) + \eta_2(I) \cdot (\beta_1 + \beta_2 I + \beta_3 I^2) \quad (3)$$

$$\text{де } \eta_1(I) = \frac{1}{1 + (0,67 \cdot I)^{45}}, \quad \eta_2(I) = \frac{1}{1 + (1,5 \cdot I^{-1})^{45}}, \quad \alpha_1 = 20, \quad \alpha_2 = -1,06,$$

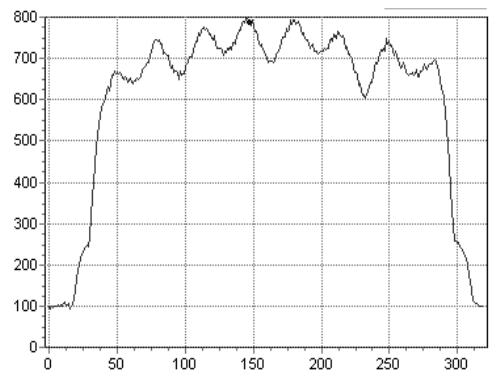
$$\beta_1 = -315, \quad \beta_2 = 432, \quad \beta_3 = -140$$

Розмірності коефіцієнтів: α_2 та β_2 – A^{-2} ; β_3 – A^{-3} ; η_1 та η_2 – В.

В роботі досліджено два методи нагрівання СЕ і ФЕСБ: прямим (Рис. 5) та зворотним темновим струмом. В першому методі дефектний СЕ буде виконувати роль шунта для всіх своїх сусідів, Тип контрольованих при цьому дефектів – паразитні діоди Шотткі. Необхідна напруга для першого методу дорівнює приблизно 0,7 В для одного і 22 В для секції ФЕСБ із 36 послідовно з'єднаних СЕ. Осередки перегріву при прямому темновому струмі мають вигляд періодичних смуг і зосереджені також біля шин живлення та вихідних контактів ФЕСБ (рис. 5).



а)



б)

Рисунок 5: а) – Термограма тильної сторони ФЕСБ потужністю 30 Вт при прямому темновому струмі: напруга 22 В, струм 5 А; б) – Попіксельний розподіл температури по осі Ох

Процес нагрівання переважно прямим темновим струмом (на 99%) був забезпечений подачею змінної напруги 48-52 В. Другим методом, заснованим на протіканні зворотного темного струму, контролюють дефекти типу додаткового шунтового опору (Рис. 6).

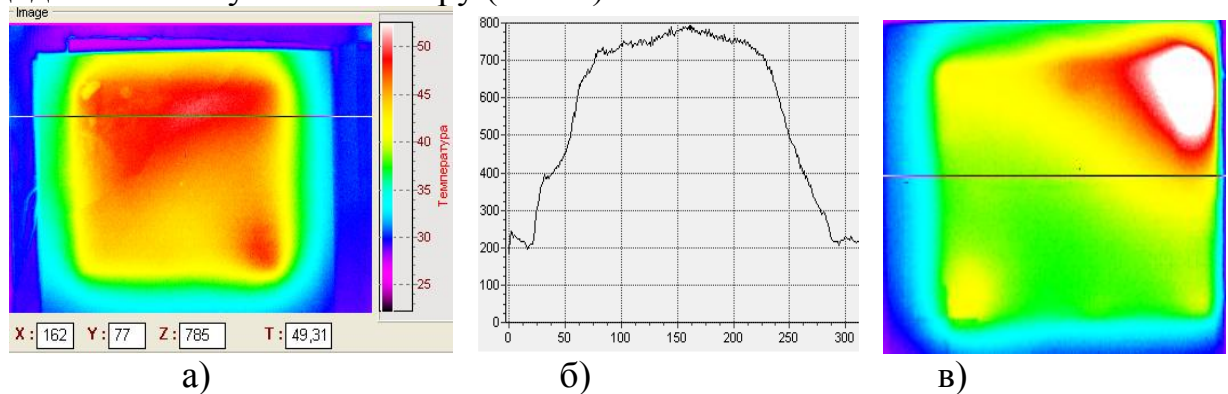


Рисунок 6 а) – Термограма СЕ без дефектів; б) – Попіксельний розподіл температури СЕ без дефектів по осі Ох; в) – Термограма СЕ із температурою в зоні дефекту 72 °С;

Встановлено, що окремий СЕ при нагріванні зворотним темновим струмом потребує потужність 5-6 Вт і напругу 10-30 В в залежності від внутрішнього шунтового опору. При цьому для нагрівання ФЕСБ необхідне джерело живлення потужністю до 400 Вт з постійною напругою до 1000 В.

Експериментально доведено, що тепловий потік в скляних конструкціях, характерних для ФЕСБ, розповсюджується переважно в перпендикулярному до їх площини напрямі за рахунок радіаційної та конвекційної складових. На основі термограм за розробленою методикою розраховують теплову потужність дефекту за радіаційною та конвекційною складовими (Рис. 7).

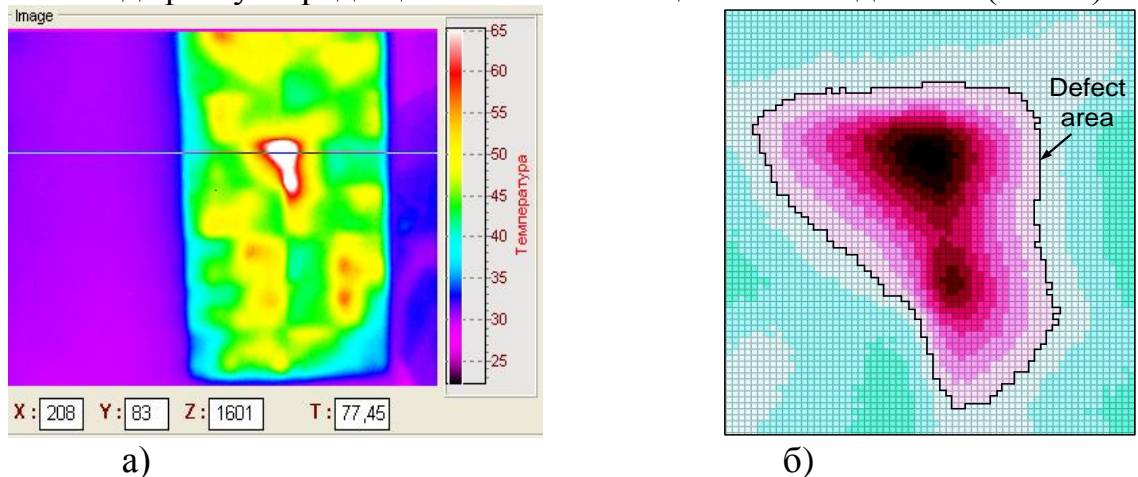


Рисунок 7 а) – Термограма ФЕСБ із полікристалічного кремнію потужністю 60 Вт; б) – Зображення області дефекту на сітці пікселів

Кондуктивною складовою теплообміну нехтували за умови введеного критерію: $L/s > 10$, де L – ширина ФЕСБ, s – її товщина. При цьому необхідний стаціонарний режим теплообміну. Кожний піксел вважали елементарним дефектом із постійною температурою. Похибка розрахунку дорівнює 5%. Режим нагрівання: напруга 700 В, струм 120 мА. Теплова потужність дефекту дорівнює 2,4 Вт.

Математична модель контролю дефектів ФЕСБ методом ІЧТ побудована на основі визначення теплової потужності дефекту, яка дорівнює сумарній потужності усіх пікселів області дефекту:

$$P_{def.} = \sum_{i \in M} [\sigma S \varepsilon (T_{di}^4 - T_1^4) + h_c S (T_{di} - T_1)], \quad (4)$$

де T_{di} - температура i -го пікселя, що належить до множини M пікселів зони дефекту; T_1 - температура повітря; S - площа пікселя; σ - стала Стефана-Больцмана; ε - коефіцієнт чорноти скла; h_c - коефіцієнт конвекції.

Доведено, що метод сплайн-функцій дозволяє визначати геометричні розміри теплового поля дефекту із субпіксельною похибкою.

За результатами дослідження створено метод вимірювання коефіцієнту теплопровідності клейового шару конструкції ФЕСБ на основі ІЧТ, за яким попередньо вимірюють середню температуру лицьової і тильної поверхні нагрітої зворотним темновим струмом ФЕСБ. Метод забезпечує вимірювання із систематичною похибкою не більше 5%.

Метод збудження ЕЛД аналогічний до методу нагрівання зворотним темновим струмом при застосуванні ІЧТ. ЕЛД має структуру діоду Шоттки і тунельний механізм збудження та стає активним за умови прикладення зворотної напруги до СЕ або ФЕСБ. При вдосконаленні телевізійного методу контролю створено фізичну модель ЕЛД (Рис.8).

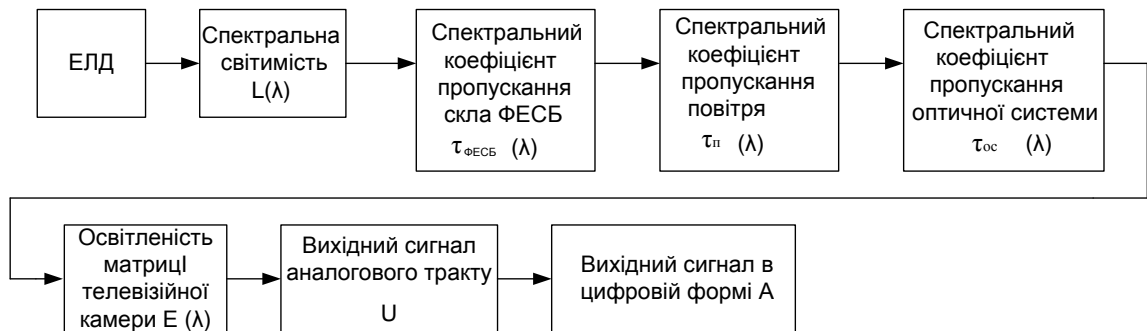


Рис. 8 – Фізична модель телевізійного контролю ЕЛД

Розроблена математична модель телевізійного контролю ЕЛД, за якою отримано залежність амплітуди вихідного сигналу ТЗВ:

$$A = b \tau_c(\lambda) \tau_o(\lambda) (D/f)^2 \cdot k \cdot \exp(-c/U^{0.5}), \quad (5)$$

де D/f – відносний отвір об'єктиву; $L_{ЕЛД} = k \cdot \exp(-c/U^{0.5})$ - яскравість ЕЛД; $\tau_c(\lambda)$ та $\tau_o(\lambda)$ – спектральні коефіцієнти пропускання середовища і оптичної системи; b – коефіцієнт пропорційності; c – константа з розмірністю $V^{0.5}$.

Вихідний сигнал ТІВС пропорційний до яскравості об'єкту і залежить від оптичних параметрів об'єкту за незмінності компонентів ТІВС, що дозволяє вимірювати вольт-яскравісну характеристику ЕЛД.

В третьому розділі представлені результати дослідження засобів контролю дефектів ФЕСБ: розроблені стени динамічного вимірювання ВАХ та телевізійного контролю ЕЛД, а також вдосконалено стенд ІЧТ додаванням до нього каскадного джерела живлення ФЕСБ.

Для генератора імпульсів пристрою лінійної розгортки струму динамічного вимірювання ВАХ ФЕСБ використано 8-розрядний мікроконтролер ATmega16, для якого в середовищі AVR Studio розроблено програмне забезпечення. ВАХ і криву потужності ФЕСБ побудовано за табличними даними, які зберігаються у пам'яті осцилографу, в Exel MS Office (Рис.9). За розрахованою кривою потужності визначають режим максимальної потужності, яку можна передати в коло навантаження при даному рівні енергетичної освітленості.

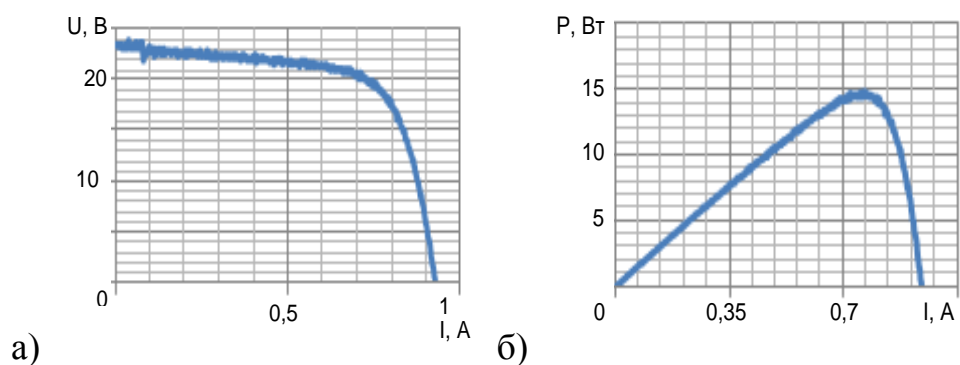


Рисунок 9 а) – Розрахована ВАХ ФЕСБ; б) – Крива потужності для ФЕСБ із номінальною потужністю 30 Вт

Засіб динамічного вимірювання ВАХ ФЕСБ забезпечує зменшення впливу джоулевого тепла на об'єкт вимірювання, яке виділяється в колі навантаження. Навантаженням є послідовний внутрішній опір ФЕСБ і тому під час вимірювання зростає температура кремнієвих пластин, внаслідок чого електричні параметри батареї змінюються. Це призводить до методичної похибки вимірювання. За критерієм зменшення джоулевого тепла розроблений засіб в 10 раз перевищує найближчий аналог. Він дозволяє стабілізувати температурний режим ФЕСБ з похибкою 0,1 К, що, в свою чергу, зменшує похибку вимірювання струму і напруги на 10%.

Використання потужного IGBT – ключа в схемі ЛРС розширює діапазон вимірювання струму на 50% і напруги на 20% у порівнянні із аналогами. Досліджено процес лінійної розгортки струму при паралельному включенні двох транзисторів, що дозволяє зняти обмеження на струм при комутації окремих ФЕСБ або їх масивів. Встановлено, що відносна часова затримка комутації транзисторів менша за 100 нс, що не перевищує 0,1% тривалості лінійної розгортки струму.

Було розроблено стенд для телевізійного контролю ЕЛД ФЕСБ (Рис. 10).

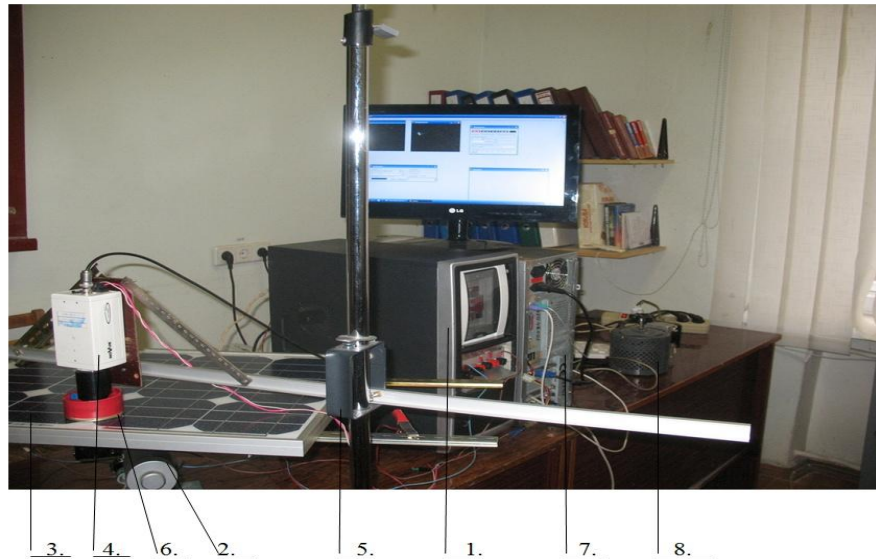


Рисунок 10 – Стенд телевізійного контролю ЕЛД ФЕСБ: 1- каскадне джерело живлення 1000 В; 2 - оптична лава; 3 - сонячна панель; 4 – телевізійна камера NOVUS; 5 – штатив; 6- світло-ізолюючий екран; 7 - ПК із встановленою програмою OWLEYE; 8 - лінійний автотрансформатор

Для активації ЕЛД подавали постійну напругу від 400 В до 1000 В. З'ясовано, що механізм світіння ЕЛД, причиною якого виявився тунельний ефект в структурі метал-напівпровідник, що виникає внаслідок забруднення поверхні пластин алюмінієм під час технологічного процесу виготовлення СЕ і утворює в ньому додатковий внутрішній шунтовий опір.

ТІВС забезпечує вимірювання вольт-яскравісної та ампер-яскравісної характеристик ФЕСБ при збудженні ЕЛД (Рис. 11). Встановлено, що візуально ЕЛД можна спостерігати в діапазоні напруги 600-1000 В, в діапазоні 400-600 В реєстрація ЕЛД можлива за допомогою ТІВС.

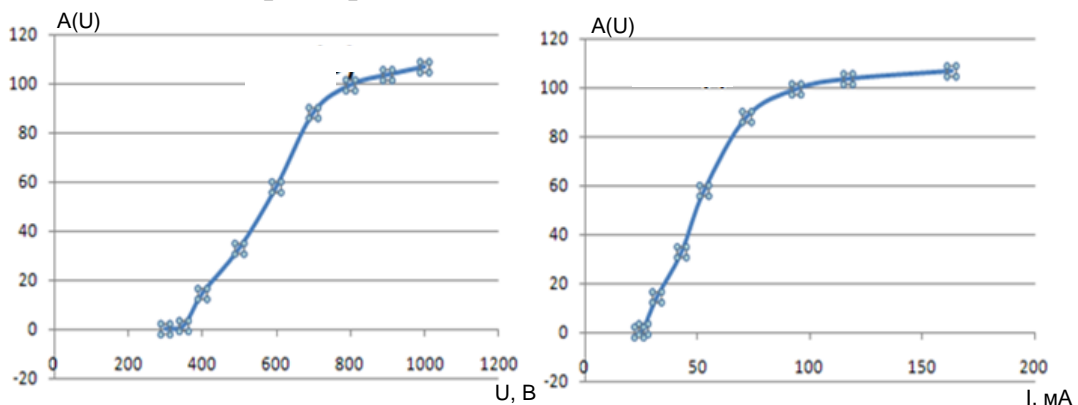


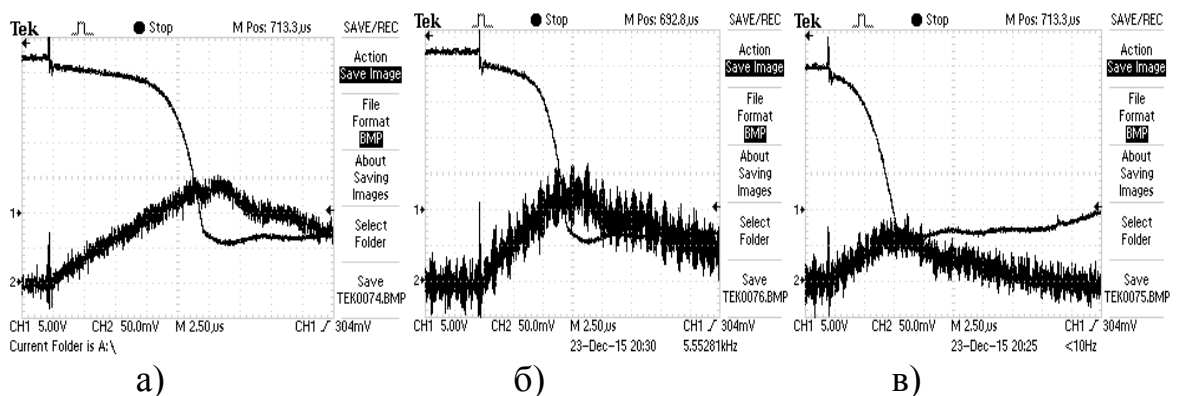
Рисунок 11 – Вольт-яскравісна і ампер-яскравісна характеристики ФЕСБ із ЕЛД: яскравість А надано у відносних одиницях

При вдосконаленні засобу ІЧТ було розроблене каскадне регульоване джерело живлення з вихідною напругою до 1000 В. Це забезпечило стаціонарний режим теплообміну ФЕСБ із оточуючим середовищем і дозволило на основі термограм вимірювати теплові параметри конструкції ФЕСБ, зокрема, коефіцієнт теплопровідності клейового шару.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень контролю дефектів ФЕСБ, які виявляються при їх нагріванні зворотним темновим струмом, із застосуванням ІЧТ та ТЗВ, а також вимірювання ВАХ ФЕСБ динамічним методом на основі лінійної розгортки струму.

Експериментально визначені номінальні величини для котушок індуктивності пристрою лінійної розгортки струму в діапазоні 4-100 мкГн, які підбирають в залежності від номінальної потужності ФЕСБ, а також за вимогами максимального наближення до лінійності струму. Визначено частоту і шпаруватість імпульсів розгортки. Для ФЕСБ потужністю до 10 Вт частота імпульсів дорівнювала 8-10 кГц. Для ФЕСБ 30, 60 та 140 Вт частота дорівнювала 2-3,5 кГц. Шпаруватість для всіх сигналів дорівнювала. Спостережено ефект спотворення прямолінійної розгортки при великому струмі за наявності котушки індуктивності із феритовим осердям. Досліджено ефект збудження високочастотної складової 1,5 МГц в колі розгортки. Експериментально доведено, що причиною виникнення цієї паразитної складової є вплив діоду в колі розгортки. Для придушення завади була розроблена схема без діоду.

Було виконано вимірювання ВАХ ФЕСБ при сонячному освітленні і доведено дієвість розробленого методу для умов експлуатації ФЕСБ. З'ясовано, що результати вимірювань співпадають за умови однакового струму короткого замикання. При цьому вимірювання освітленості люксометром дають розбіжність у 20%. Цей факт можна пояснити відмінністю спектральних характеристик Сонця та імітаційного джерела. Отримано ВАХ ФЕСБ потужністю 30 Вт при повному і частковому затіненні окремих СЕ (Рис. 12).



а) – ВАХ без затінення; б) – ВАХ із затіненням 4-х СЕ на 50% кожний; в) – ВАХ при повному затіненні одного СЕ

Встановлено, що при повному затіненні СЕ максимальна потужність і ККД ФЕСБ зменшуються у 30 раз. При частковому (до 50% площі) одного або кількох СЕ максимальна потужність і ККД зменшуються вдвічі. Експериментально перевірено розроблений метод вимірювання ВАХ при попередньому нагріванні ФЕСБ зворотним темновим струмом, що забезпечило керований режим нагрівання, в результаті чого отримано

температурні залежності ЕХ ФЕСБ. Встановлено, що температура пластин кремнію вища на 3-4 К від температури поверхні скла ФЕСБ. Встановлено, що при збільшенні температури з 20 °С до 60 °С максимальна потужність ФЕСБ зменшується з 15 Вт до 12,3 Вт або на 20 %. Відповідно зменшився і ККД – по 4,5% на кожні 10 градусів нагрівання. Методом комп'ютерного моделювання було досліджено роботу ключа на двох паралельних транзисторах. Комп'ютерну модель було перевірено створенням діючої електронної схеми. Паралельне вмикання кількох IGBT збільшує максимальний вимірювальний струм і дозволяє вимірювати ВАХ цілого масиву ФЕСБ у складі автономної системи електроживлення.

На основі застосування розробленої ТІВС експериментально доведено, що залежність яскравості ЕЛД від напруги має вид: $A \sim \exp(-c/\sqrt{U})$. Встановлено, що відсутність ЕЛД або їх рівномірний розподіл на поверхні СЕ в кількості 1-5 характерний для придатних до експлуатації ФЕСБ найвищого класу А. Нерівномірне розташування ЕЛД або їх велика кількість (Рис. 13) свідчать про невідповідність ЕХ паспорту ФЕСБ. Послідовний опір таких СЕ зменшується з 200-300 Ом у 5-10 раз до 20-50 Ом. Встановлено, що ЕЛД розташовані не тільки біля шин СЕ, але і на віддаленні від них.

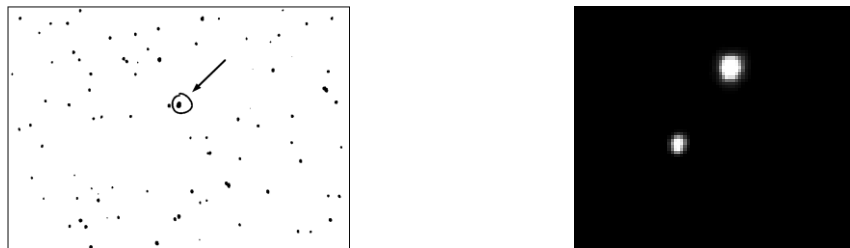


Рисунок 13 а) – Інвертоване зображення ЕЛД дефектного СЕ; б) – збільшене у 100 раз зображення двох ЕЛД

За допомогою ІЧТ та ТІВС встановлено, що ЕЛД належать до осередків СЕ, які перегріваються при протіканні ЗТС, що свідчить про наявність первинних дефектів типу шунта в пластинах кремнію і їх комплексний прояв.

Розраховано коефіцієнт теплопровідності клейового шару експериментальних СЕ, до складу клею в яких додано частку алмазного порошку. Встановлено, що алмазний домішок підвищує теплопередачу СЕ на 15%, що дозволяє зменшити температуру ФЕСБ на 5°С при її нагріванні в умовах експлуатації.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення важливої науково-практичної задачі контролю і зменшення похибки вимірювання геометричних розмірів дефектів фотоелектричних сонячних батарей, а також зменшення похибки вимірювання вольт-амперних характеристик батарей. При цьому отримані такі результати:

1. Встановлено, що існуючі методи та засоби контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей, а також вимірювання їх вольт-амперних характеристик не забезпечують вирішення задачі зменшення похибки

вимірювань геометричних параметрів дефектів і не дозволяють зменшити похибку вимірювання вольт-амперної характеристики внаслідок виділення джоулевого тепла.

2. Обґрунтовано та створено метод динамічного вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей на основі лінійної розгортки струму, який відрізняється від аналогів розширеним на 50% діапазоном струму, підвищеною у 10 раз швидкістю, зменшенням у 10 раз виділенням джоулевого тепла та зменшенням похибки на 10%.

3. Розроблено математичну модель динамічного вимірювання вольт-амперних характеристик на основі розкладу за часом в ряд Тейлора струму фотоелектричної сонячної батареї, яка враховує активний опір, індуктивність та ємність у вимірювальному колі і дозволяє проектувати пристрої лінійної розгортки струму із заданими параметрами; вдосконалено розроблену модель на основі методів Гамерштейна та Пухова-Хатіашвілі шляхом визначення гладкої статичної нелінійності для апроксимації нею поведінки об'єкту із довільною динамікою, застосування якої дозволяє компенсувати паразитні високочастотні коливання у вимірювальному колі фотоелектричної сонячної батареї.

4. Створено метод нагрівання фотоелектричних сонячних батарей зворотним темновим струмом для контролю їх дефектів на основі інфрачервоної термографії, який дозволяє виявляти і вимірювати геометричні розміри дефектів від 100 мкм на ранній стадії розвитку.

5. Вдосконалено метод інфрачервоної термографії для вимірювання коефіцієнту теплопровідності клейових з'єднань фотоелектричних сонячних батарей при їх нагріванні зворотним темновим струмом, який забезпечив зменшення відносної похибки до 5% за умов стаціонарного теплообміну.

6. Вдосконалено метод телевізійного контролю, що дозволило вимірювати геометричні параметри електролюмінесцентних дефектів розміром від 5 мкм для фотоелектричних сонячних елементів і батарей та зменшити похибку вимірювань на 30%.

7. Отримано нові експериментальні результати про динаміку розвитку дефектів при нагріванні фотоелектричних сонячних батарей зворотним темновим струмом, які можуть бути використані в процесі проектування нових засобів контролю, розроблено та виготовлено лабораторні стенди і розроблено відповідні методики:

- для динамічного вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей, що дозволило розширити діапазон їх потужності від 1 до 300 Вт із похибкою вимірювання напруги 1%;

- для телевізійного контролю електролюмінесцентних дефектів фотоелектричних сонячних батарей з похибкою вимірювання геометричних розмірів дефектів 5%.

Результати досліджень впроваджені в Інституті технічної теплофізики НАН України та в НДІ Прикладної електроніки НТУУ «КПІ» для вимірювання

вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей, а також в навчальному процесі НТУУ «КПІ» (підтверджено актами).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ, В ЯКИХ ВИКЛАДЕНО ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Порев В. А. Застосування сплайн-функцій для збільшення швидкості контролю динамічних параметрів зонної плавки [Текст] /В.А. Порев, Ю.А. Агінський, К.М. Божко //Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Приладобудування. – Київ, 2012. – Вип. 44. – С. 58-63. Входить до НМБД РИНЦ. Автору особисто належить обґрунтування можливості вимірювання геометричних розмірів об'єктів із субпіксельною точністю.

2. Божко К. М. Інфрачервона термографія сонячних елементів, нагрітих темновим струмом [Текст] /К. М. Божко, В.І. Дунаєвський, В.Й. Котовський, В.П. Маслов, В.А. Порев //Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Приладобудування. – Київ, 2013. – Вип. 46. – С. 56-63. Входить до НМБД РИНЦ. Автором особисто був вдосконалений метод інфрачервоної термографії для контролю дефектів сонячних елементів на основі їх нагрівання зворотним темновим струмом.

3. Порев В.А. Исследование люминесцирующих дефектов солнечных панелей [Текст] /В.А. Порев, Р.И. Пахалюк, К.М. Божко //Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. – Москва, 2014. –№1. – С. 11-14. Входить до НМБД РИНЦ. Автор особисто вдосконалив телевізійний метод і засіб контролю електролюмінісцентних дефектів фотоелектричних сонячних батарей.

4. Пахалюк Р.І. Візуалізація дефектів кремнієвих фотоелектричних сонячних батарей [Текст] /Р.І. Пахалюк, К.М.Божко //Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. Харків, 2014. – Вип. 40. – С. 3-7. Входить до НМБД World Cat. Автор особисто обґрунтував єдиний підхід до візуалізації дефектів сонячних елементів і батарей методами інфрачервоної термографії та телевізійного контролю на основі нагрівання об'єктів дослідження зворотним темновим струмом.

5. Порев В.А. Термографический контроль солнечных элементов и батарей в режиме стабилизации нагрева темновым током [Текст] /В.А. Порев, В.И. Дунаевский, К.М. Божко //Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. – Москва, 2014. –№2. – С. 57-61. Входить до НМБД РИНЦ. Автор особисто вдосконалив метод інфрачервоної термографії для контролю дефектів сонячних елементів і батарей на основі застосування стабілізації зворотного темного струму при їх нагріванні.

6. Божко К. Применение метода аналитического описания кусочно-аналитических зависимостей [Текст] /К. Божко, А. Сильвестров, А. Скрынник //Bulgarian Journal for Engineering Design. – Sofia, Juli 2014. – №23. – Р. 33-39. Входить до НМБД Scopus. Автор особисто вдосконалив математичну модель сигналу на основі методів Гамерштейна та Пухова-

Хатіашвілі для фільтрації високочастотних складових у вольт-амперній характеристиці фотоелектричної сонячної батареї.

7. Bozhko K. Thermographic modeling of pollution of reservoirs with solutions NaCl [Text] /K. Bozhko, V. Maslov, V. Porev, V. Timofeev, E. Venger, V. Dunaevskiy, V. Kotovskiy, S. Nazarchuk, M. Lysenko //American Journal of Environmental Protection. Vol. 3. – 2014. – №5. – P. 263-266. Входить до НМБД World Cat. Автор особисто отримав методом інфрачервоної термографії часову залежність температури на скляній стінці при охолодженні обмеженого нею об'єкту, що дозволило ввести спрощення при розрахунку коефіцієнту теплопровідності різних конструкцій, зокрема, фотоелектричної сонячної батареї.

8. Патент України на корисну модель № 88447. Спосіб контролю дефектів у сонячних батареях [Текст] /Божко К.М., Маслов В.П., Порєв В.А., Качур Н.В., Мотрич І.С.; заявл. 18.11.2013, оприл. 11.03.2014, Бюл. № 5. Автор особисто вдосконалив термографічний метод контролю дефектів фотоелектричної сонячної батареї, що дозволило вимірювати коефіцієнт теплопровідності клейового шару її конструкції.

9. Патент України на корисну модель №92797. Спосіб контролю дефектів в сонячних батареях [Текст] /Божко К.М.; заявл. 04.02.2014, оприл. 10.09.2014, Бюл. № 17.

10. Патент України на корисну модель №96676. Телевізійний спосіб контролю дефектів у сонячних батареях [Текст] /Божко К.М., Пахалюк Р.І., Порєв В.А., Маслов В.П., Качур Н.В.; заявл. 15.09.2014, оприл. 10.02.2015, Бюл.№3. Автор особисто вдосконалив телевізійний метод контролю електролюмінісцентних дефектів фотоелектричних сонячних батарей.

11. Божко К.М. Пікова потужність як інтегральний параметр для порівняльного аналізу елементів сонячних панелей [Текст] / К.М. Божко, Т.О. Рудик //Інтердисциплінарні дослідження в галузях інформаційних технологій, економіки, математики і техніки: 15-а Всеукр. н. конф., 29-30 жовтня 2012 р.: тези доп. – Тернопіль, 2012. С. 51-52. Автор особисто надав визначення пікової потужності, як основного параметру при порівняльному аналізі сонячних елементів.

12. Божко К.М. Темновий струм сонячних елементів у їх порівняльному аналізі [Текст] / К.М. Божко //Наукові дослідження – інструмент вирішення актуальних проблем економіки: 16-а Всеукр. н. конф. 28-29 листопада 2012 р.: тези доп. – Тернопіль, 2012. С.101-103.

13. Божко К.М. Лабораторний стенд для дослідження сонячних елементів [Текст] / К.М. Божко //Приладобудування: стан і перспективи: 12-а Міжн. н.-техн. конф. 23-24 квітня 2013 р.: тези доп. – Київ, 2013. – С. 137-138.

14. Божко К.М. Застосування телевізійного мікроскопу для дослідження клейових з'єднань оптико-електронних вузлів сонячних панелей [Тест] / К.М. Божко, Р.І. Пахалюк, Т.О. Рудик //Актуальні проблеми економіки України: науковий підхід до їх вирішення: Всеукр. н. конф. 27-28 лютого 2013 р. (вип.

18): тези доп. – Тернопіль, 2013. – С. 61-62. Автор особисто вдосконалив телевізійний мікроскоп для контролю клейових з'єднань сонячних елементів.

15. Божко К.М. Телевізійні та осцилографічні засоби вимірювання в дослідженні сонячних елементів [Текст] / К.М. Божко, О.В. Суліма // Наукові дослідження: шлях від теоретичного пошуку до практичної реалізації: Всеукр. н. конф. 28-29 березня 2013 р. (вип.. 19): тези доп. – Тернопіль, 2013. – С. 78-79. Автор особисто обґрунтував необхідність комплексного дослідження сонячних елементів телевізійним та осцилографічним методами.

16. Божко К.М. Термографічний метод дослідження сонячних елементів при їх нагріванні темновим струмом [Текст] / К.М. Божко, І.В. Морозова // Сучасна наука – інструмент динамічного розвитку економіки України: Всеукр. н. конф. 20-21 травня 2013 р. (вип.. 21): тези доп. – Тернопіль, 2013. – С. 88-89. Автор особисто вдосконалив метод інфрачервоної термографії для контролю дефектів сонячних елементів при їх нагріванні зворотним темновим струмом.

17. Божко К.М. Застосування еквівалентних схем в методах інфрачервоної термографії сонячних елементів [Текст] / К.М. Божко, І.В. Морозова, Н.А. Федченко // Економічна кібернетика – інженерія економіки (вип.. 22): Всеукр. н. конф. 27-28 вересня 2013 р.: тези доп. – Тернопіль, 2013. – С. 5-6. Автор особисто розробив еквівалентні схеми сонячних елементів при наявності в них дефектів.

18. Божко К.М. Стенд для телевізійних досліджень дефектів сонячних батарей [Текст] / К.М. Божко, Т.О. Рудик, Н.А. Федченко // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 1): Всеукр. н. конф. 30-31 січня 2014 р.: тези доп. – Тернопіль, 2014. – С. 68-69. Автор особисто розробив телевізійну інформаційно-вимірювальну систему для дослідження електролюмінісцентних дефектів фотоелектричних сонячних батарей.

19. Божко К.М. Імітатор сонця для потужних сонячних батарей [Текст] / К.М. Божко // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 3): Всеукр. н. конф. 30-31 березня 2014 р.: тези доп. – Тернопіль, 2014. – С. 46-47.

20. Божко К.М. Імпульсне вимірювання вольт-амперної характеристики сонячної батареї [Текст] / К.М. Божко // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 4): Всеукр. н. конф. 25-26 квітня 2014 р.: тези доп. – Тернопіль, 2014. – С. 101-102.

21. Божко К.М. Нагрівання сонячної батареї змінним струмом при її термографічному контролі [Текст] / К.М. Божко // Приладобудування: стан і перспективи: 13-а Міжн. н.-техн. конф. 23-24 квітня 2014 р.: тези доп. – Київ, 2014. – С. 127-128.

22. Божко К.М. Перехід до нового стандарту сонячної енергетичної світимості у вимірюваннях характеристик сонячних батарей [Текст] / К.М. Божко, А.Д. Женілова // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 10): Всеукр. н. конф. 22-23 грудня 2014

р.: тези доп. – Тернопіль, 2014. – С.33-35. Автор особисто обґрунтував розрахунок похибки при переході до нового стандарту сонячного випромінювання.

23. Божко К.М. Імпульсне вимірювання вольт-амперної характеристики фотоелектричної сонячної батареї [Текст] /К.М. Божко, А.Д. Женілова //Приладобудування: стан і перспективи: 14-а Міжн. н.-техн. конф. 22-23 квітня 2015 р.: тези доп. – Київ, 2015. – С.142-143. Автор особисто розробив динамічний метод вимірювання вольт-амперної характеристики фотоелектричної сонячної батареї на основі лінійної розгортки струму.

24. Божко К.М. Модель R,L,C перехідного процесу в колі імпульсного вимірювача характеристик фотоелектричних сонячних батарей [Текст] /К.М. Божко, Т.О. Рудик, Г.С. Гуренок //Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 12): Всеукр. н. конф. 22-23 квітня 2015 р.: тези доп. – Тернопіль, 2015. – С. 106-107. Автор особисто розробив математичну модель перехідного процесу в колі розгортки струму із врахуванням електричної ємності фотоелектричної сонячної батареї.

25. Божко К.М. Графічний розрахунок теплової потужності дефекту типу “hotspot” сонячної батареї [Текст] /К.М. Божко, А.Д. Женілова //Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 13): Всеукр. н. конф. 20 – 21 травня 2015 р.: тези доп. – Тернопіль, 2015. – С.65 – 67. Автор особисто обґрунтував графічний метод розрахунку теплової потужності дефекту фотоелектричної сонячної батареї при його збудженні зворотним темновим струмом.

АНОТАЦІЯ

Божко К.М. Вдосконалення методів та засобів контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, 2016.

Дисертацію присвячено вдосконаленню методів і засобів контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей, які збуджуються при протіканні темнового струму, та зменшенню похибки вимірювання вольт-амперних характеристик сонячних батарей.

Запропоновано метод динамічного вимірювання вольт-амперної характеристики фотоелектричних сонячних батарей на основі лінійної розгортки струму, який відрізняється від аналогів розширеним на 50 % діапазоном струму, підвищеною у 10 раз швидкістю, зменшенням у 10 раз виділенням джоулевого тепла та зменшенням відносної похибки на 10%. Створено математичну модель динамічного вимірювання вольт-амперної характеристики, яка дозволяє проектувати пристрої лінійної розгортки струму із заданими параметрами, а також вдосконалено математичну модель

фільтрації сигналу, застосування якої дозволяє компенсувати високочастотні коливання у вимірювальному колі фотоелектричних сонячних батарей.

Запропоновано метод нагрівання фотоелектричних сонячних батарей зворотним темновим струмом для контролю дефектів на ранній стадії розвитку та вдосконалено метод інфрачервоної термографії для вимірювання коефіцієнту теплопровідності клейових з'єднань, який забезпечив зменшення відносної похибки до 5% при стаціонарному теплообміні. Вдосконалено математичну модель методу телевізійного контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей, застосування якої дозволяє проектувати засоби вимірювання яскравісних і геометричних характеристик електролюмінесцентних дефектів.

Розроблено та виготовлено лабораторні стенди для контролю фотоелектричних сонячних батарей: динамічного вимірювання вольт-амперних характеристик із розширеним діапазоном потужності від 1 до 300 Вт та відносною похибкою вимірювання напруги 1%; телевізійного контролю електролюмінесцентних дефектів, який дозволяє вимірювати геометричні параметри дефектів з похибкою 5%.

Отримані результати впроваджено у технологію вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей при їх експлуатації.

Ключові слова: вимірювання, фотоелектрична сонячна батарея, вольт-амперна характеристика, інфрачервона термографія.

АННОТАЦІЯ

Божко К.М. Совершенствование методов и средств контроля дефектов фотоэлектрических солнечных батарей. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – устройства и методы контроля и состава веществ. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев. 2016.

Диссертация посвящена совершенствованию методов и средств контроля дефектов фотоэлектрических солнечных батарей, которые возбуждаются при протекании темнового тока, и уменьшению погрешности измерения вольт-амперных характеристик солнечных батарей.

Предложен метод динамического измерения вольт-амперной характеристики фотоэлектрических солнечных батарей на основе линейной развертки тока, который отличается от аналогов расширенным на 50% диапазоном тока, повышенным в 10 раз быстродействием, уменьшением в 10 раз выделения джоулевого тепла и уменьшением погрешности на 10%. Создана математическая модель динамического измерения вольт-амперной характеристики, которая позволяет проектировать устройства линейной развертки тока с заданными параметрами, также усовершенствована математическая модель фильтрации сигнала, применение которой позволяет

компенсировать высокочастотные колебания в измерительной цепи фотоэлектрических солнечных батарей.

Предложен метод нагрева фотоэлектрических солнечных батарей обратным темновым током для контроля дефектов на ранней стадии развития и усовершенствован метод инфракрасной термографии для измерения коэффициента теплопроводности клеевых соединений, который обеспечил уменьшение погрешности до 5% при стационарном теплообмене. Усовершенствована математическая модель метода телевизионного контроля дефектов фотоэлектрических солнечных батарей, применение которой позволяет проектировать средства измерения яркостных и геометрических характеристик электролюминесцентных дефектов.

Разработаны и изготовлены лабораторные стенды для контроля фотоэлектрических солнечных батарей: динамического измерения вольт-амперных характеристик с диапазоном мощности от 1 до 300 Вт и относительной погрешностью измерения напряжения 1%; телевизионного контроля электролюминесцентных дефектов, который позволяет измерять геометрические размеры дефектов с погрешностью 5%.

Полученные результаты внедрены в технологию измерения вольт-амперных характеристик фотоэлектрических солнечных батарей при их эксплуатации.

Ключевые слова: измерения, фотоэлектрическая солнечная батарея, вольт-амперная характеристика, инфракрасная термография.

ABSTRACT

Bozhko K. Improvement of methods and means for the control of defects of photovoltaic solar panels.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.11.13 – Devices and methods for control and determination of substance. National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2016.

Dissertation is devoted to the improvement of the methods and means of controlling the defects of photovoltaic solar cells, which are excited by the flow of dark current, and reduce measurement error of current-voltage characteristics of the solar cells.

A method for dynamic measurement of current-voltage characteristics of photovoltaic solar cells based on linear current scanning, which is different from the analog expanded by 50% of the current range, increased 10-fold speed, a decrease of 10 times the release of Joule heat and a decrease in the relative error of 10%. A mathematical model of dynamic measuring current-voltage characteristics, which allows you to design a linear scanning device current with the specified parameters, and improved mathematical model of signal filtering, use of which is to compensate for high-frequency oscillations in the measuring circuit of photovoltaic solar panels.

The method of heating the photovoltaic solar cells reverse dark current for controlling defects at an early stage of development and improved method of infrared thermography to measure the thermal conductivity of the adhesive joints, which provided a reduction of error of up to 5% at steady-state heat transfer. Improved mathematical model method TV control defects of photovoltaic solar panels, the use of which allows the design of measuring brightness and geometrical characteristics of electroluminescent defects.

Designed and manufactured laboratory benches for control of photovoltaic solar cells : Dynamic measuring current-voltage characteristics with a power range from 1 to 300 W and the relative error of voltage measurement 1 % ; TV control electroluminescent defects , which can measure the geometric dimensions of the defects with an accuracy of 5 % .

The results are incorporated in the measurement technology of the current-voltage characteristics of photovoltaic solar panels at their operation .

Keywords: measurement, photovoltaic solar cell, the current-voltage characteristic, infrared thermography.