

Національна академія наук України
Інститут відновлюваної енергетики

МАТЯХ СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 681.3.01; 620.91

ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ПРОЦЕСІВ
ПЕРЕНОСУ ЗАРЯДІВ В ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ЕНЕРГІЇ

Спеціальність 05.14.08 – перетворювання відновлюваних видів енергії

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Київ 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України,
Резцов Віктор Федорович,
Інститут відновлюваної енергетики НАН України, заступник директора з наукової роботи.

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор,
Смирнов Володимир Сергійович,
Державний університет телекомунікацій МОН України, завідувач кафедри «Радіоелектронні системи»;

– кандидат технічних наук, доцент
Будько Василь Іванович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» МОН України, заступник завідувача кафедри відновлюваних джерел енергії.

Захист відбудеться « _____ » _____ 2016 року о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.249.01 в Інституті відновлюваної енергетики НАН України за адресою: 02094, м. Київ-94, вул. Червоногвардійська, 20 а. Тел. 206-28-09.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту відновлюваної енергетики НАН України (02094, м. Київ-94, вул. Червоногвардійська, 20а).

Автореферат розісланий « _____ » _____ 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Т. В. Суржик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним із перспективних напрямів розвитку світової відновлюваної енергетики в даний час є виробництво електричної енергії за рахунок використання сонячного фотоелектричного обладнання, що знімає ряд проблем, пов'язаних із вичерпанням органічних енергоресурсів та вимогами екологічної безпеки. Нерівномірність сонячних енергетичних потоків спричиняє ускладнення в процесі їх використання і не завжди відповідає сучасним вимогам щодо енергопостачання споживачів. Проблема підвищення енергоефективності фотоелектричних систем електроживлення вирішується різними методами, в першу чергу за рахунок підвищення коефіцієнтів перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію та застосування електрохімічних акумуляторів для резервного електрозабезпечення споживачів у періоди зменшення інтенсивності або відсутності сонячного випромінювання.

Розвиток сонячної енергетики в Україні потребує створення сучасної техніки та технологій, що, в свою чергу, обумовлює проведення фундаментальних наукових досліджень для отримання інформації про розподіл електричних, теплових та енергетичних параметрів, у тому числі в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії. Якісний і кількісний опис процесів перетворення енергії на основі адекватних моделей фізичних процесів значно сприяє здешевленню розробки технологій виробництва електротехнічних і енергетичних пристроїв сонячної фотоенергетики. При цьому часто принципово неможливим є отримання інформації про перебіг процесів технічними експериментальними засобами. Тому для отримання даних в енергетиці широко використовується моделювання процесів перетворення енергії. Вивчення нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії, які є базовими для визначення електричних та енергетичних характеристик, із застосуванням методів чисельно-аналітичного моделювання дозволяє підвищити рівень як фундаментальних, так і прикладних досліджень у галузі фотоенергетики.

Таким чином, розробка та використання методів чисельно-аналітичного моделювання нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії із застосуванням сучасного програмного забезпечення є актуальною задачею, розв'язання якої сприятиме вирішенню задачі підвищення стійкості енергетичних систем на основі фотоелектричних джерел живлення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукова робота за темою дисертації виконана у відповідності з планами наукових досліджень Інституту відновлюваної енергетики НАН України, що проводились згідно Постанов бюро Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН за темами «Дослідити особливості процесів перетворення сонячної енергії в сонячних колекторах і фотобатареях з інтенсифікацією процесів енергообміну та розробити практичні рекомендації щодо удосконалення їх схем та конструкцій з метою підвищення енергоефективності» (шифр «Сонце», № ДР 0104U003593), «Розробити системний метод дослідження динаміки взаємопов'язаних

електродинамічних, теплових, гідродинамічних та механічних нелінійних процесів перетворення енергії відновлюваних та нетрадиційних джерел на основі принципів синергетики» (шифр «Синергетика», № ДР 0107U001065), «Розробити фізико-технічні засади підвищення енергоефективності систем сонячного енергопостачання на основі використання принципу концентрації сонячного випромінювання, раціонального вибору теплоносіїв та функціональних матеріалів» (шифр «Сонце-1», № ДР 0108U000418), «Розробити системний метод дослідження динаміки взаємопов'язаних електродинамічних, теплових, гідродинамічних та механічних нелінійних процесів перетворення енергії відновлюваних та нетрадиційних джерел на основі принципів синергетики» (шифр «Синергетика-А», № ДР 0112U000648), «Дослідити електродинамічні, теплові та енергетичні процеси в комбінованих системах перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну та теплову енергію (шифр «Сонце-2», № ДР 0113U000931).

У перерахованих НДР автор брав безпосередню участь, як виконавець: ним обґрунтовано задачі дослідження, розроблено науково-прикладні методи чисельно-аналітичного моделювання нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних і електрохімічних перетворювачах енергії та програмне забезпечення для практичної реалізації чисельних експериментів систем фотоелектричного електропостачання.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методів чисельно-аналітичного моделювання нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії для реалізації багатоваріантних чисельних експериментів.

Для досягнення поставленої мети в дисертації вирішено наступні задачі:

- дослідження стійкості нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії на основі синергетичної теорії аналізу в напрямку визначення можливості виникнення малих збурень концентрації та характеру їх розвитку у часі;
- обґрунтування можливості застосування для аналізу стійкості процесів переносу зарядів наближення амбіполярної дифузії;
- дослідження стійкості процесів переносу зарядів та визначення характеру просторової і часової зміни збурень у наближенні амбіполярної дифузії;
- розробка методу виконання багатоваріантних чисельних експериментів по визначенню просторово-часового розподілу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії при довільних, у тому числі суттєво неоднорідних та розривних по просторових координатах початкових розподілах концентрації зарядів;
- дослідження за допомогою багатоваріантних чисельних експериментів характеристики кінцевого профілю функції розподілу концентрації зарядів в режимі стабілізації при великих значеннях часу;
- розробка адаптивного чисельного алгоритму із використанням повністю нерівномірних сіток для забезпечення стійкості розрахунків при проведенні чисельних експериментів, оптимізації використання розрахункових ресурсів та можливості проведення розрахунків з наперед заданою точністю;

– розробка методу переходу від внутрішніх локально-розподілених у просторі параметрів фотоелектричних та електрохімічних перетворювачів (концентрації зарядів, температури тощо) до усереднених по об'єму параметрів, що дасть можливість визначити їх вплив на режими функціонування фотоелектричних та електрохімічних перетворювачів в системах електропостачання.

Об'єктом дослідження є фотоелектричні та електрохімічні перетворювачі енергії.

Предметом дослідження є процеси переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних процесах, які визначають електричні, теплові та енергетичні характеристики фотоелектричних та електрохімічних перетворювачів енергії для реалізації багатоваріантних чисельних експериментів.

Методи дослідження. Досягнення поставленої в роботі мети було реалізовано з використанням:

– методів математичного моделювання нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії із застосуванням сучасних чисельних методів;

– синергетичного підходу для аналізу процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії та теорії стійкості систем, що описуються нелінійними диференціальними рівняннями у часткових похідних;

– методів векторного аналізу для переходу від внутрішніх параметрів розподілу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах до інтегральних параметрів системи, у яку включено перетворювач.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

– вперше для аналізу стійкості процесів електромасопереносу в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії застосовано синергетичну теорію, що дозволяє визначати умови виникнення нестійких режимів при перетворюванні енергії, від яких залежить надійність та ресурс функціонування обладнання при наявності природних джерел збурень;

– розвинуто комбінований метод виконання чисельних експериментів з визначення просторово-часового розподілу зарядів в процесах електро-масопереносу зарядів в фото- та електрохімічних перетворювачах, особливістю якого є використання чисельних алгоритмів методу скінченних різниць із змінним просторовим кроком сіток на кожному часовому інтервалі, що дало можливість скоротити на порядок час виконання чисельних експериментів при забезпеченні стійкості обчислювань при заданій точності;

– вперше для задач аналізу розподілу концентрації зарядів та температури в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах на основі застосування теореми з векторного аналізу про дивергенцію встановлено зв'язки між середніми за об'ємом значеннями із зовнішніми електричними та тепловими параметрами.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані в дисертації теоретичні результати мають вагоме практичне значення, суть якого полягає у розробці комп'ютерного програмного комплексу, який дозволяє виконувати багатоваріантні чисельні експерименти. Визначено, що застосування розробленого

адаптивного чисельного алгоритму має переваги перед іншими, оскільки при однаковій точності результату кількість просторових вузлів зменшується у декілька разів, що призводить до такого ж зменшення розмірності систем алгебраїчних рівнянь і суттєвого зменшення часу виконання чисельних експериментів.

Виконано побудову технології аналізу формування просторово-неоднорідних структур при взаємодії сонячного випромінювання з активними поверхнями фотоелектричних та електрохімічних перетворювачів енергії, розвинуто аналітичні та чисельні методи формування структур в процесі електромасопереносу, які використовуються в Інституті відновлюваної енергетики НАН України при виконанні НДР з фундаментальних досліджень, а також в учбових закладах м. Києва: Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» та Національному університеті харчових технологій України.

Особистий внесок здобувача. Всі результати дисертаційної роботи отримано автором особисто. Роботи [8 - 17, 19] написані автором самостійно. В друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: в [1 - 4] – проектна модель та реалізація програмного забезпечення; в [5] – алгоритм чисельного методу; в [6, 7] – аналіз стійкості до малих збурень; в [18] – аналіз електротеплового стану фотобатарей, в [20] – застосування теореми про дивергенцію для аналітичних розрахунків усередненої температури фотобатарей.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на: міжнародних науково-практичних конференціях «Відновлювана енергетика XXI століття» в смт. Миколаївка, АР Крим, Україна (19 - 23 вересня 2005р., 11 - 15 вересня 2006 р., 17 - 21 вересня 2007р., 15 - 19 вересня 2008р., 14 - 18 вересня 2009р., 13 - 17 вересня 2010р., 17 - 21 вересня 2007р., 12 - 16 вересня 2011р., 10 - 14 вересня 2012р., 16 - 20 вересня 2013р.) та міжнародних науково-практичних конференціях «Відновлювана енергетика XXI століття» в м. Києві, Україна (16 - 17 вересня 2014р. і 28 - 29 травня 2015р.)

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображено в 20 публікаціях: 8 статей у фахових наукових виданнях, затверджених МОН України, 1 стаття у міжнародному науково-технічному виданні, 11 наукових праць у вигляді тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг дисертації становить 163 сторінки, з них 144 сторінки основного тексту, 3 таблиці, 44 рисунки, додаток і перелік використаних джерел (121 найменування).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність виконаної роботи, сформульовано мету і основні задачі наукового дослідження, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладено наукову новизну, практичне значення та реалізацію основних результатів дисертації, наведено відомості про їх апробацію та публікації.

У *першому розділі* проведено аналітичний огляд стану досліджень за темою дисертації. Теоретична модель сонячного елемента виходить із рівнянь фізики

твердого тіла, тому представлено опис предметної області наукових досліджень та дослідження нелінійних процесів просторового розподілу зарядів у робочих проміжках елементів фотоелектричних та електрохімічних перетворювачів енергії, що визначають їх робочі фізичні параметри. Оскільки експериментальне визначення цих характеристик є достатньо утрудненим, а в деяких випадках і неможливим, визначено, що чисельне моделювання процесів переносу зарядів є найбільш ефективним при проведенні наукових досліджень елементної бази фотоелектричних та електрохімічних перетворювачів енергії. На основі представленого огляду чисельних методів розв'язання диференціальних рівнянь із подальшим аналізом для математичної постановки задачі як оптимальний вибрано метод скінченних різниць із використанням неявного шаблону і повністю нерівномірних каркасів точок у розрахунковій області у якості основи для розробки адаптивного алгоритму розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних, якими описуються процеси.

За результатами аналізу досліджень визначено наукові напрямки дослідження. Таких напрямків чотири – розробка методології чисельного моделювання нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії; розробка узагальнених теоретичних основ стійкості систем на основі фотоелектричних та електрохімічних перетворювачів енергії; проектування та розробка програмного комплексу чисельного розрахунку; розробка аналітичних методів переходу від внутрішніх локально-розподілених у просторі параметрів розподілу заряджених частинок в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах до інтегральних параметрів системи, у яку включено перетворювач.

У *другому розділі* виконано аналіз стійкості процесів переносу зарядів в фотоелектричних і електрохімічних перетворювачах з нелійними параметрами переносу, аналіз стійкості по відношенню до збурень типу розшарування при однорідному незбуреному стані, постановку математичної моделі чисельного розрахунку в наближенні амбіполярної дифузії та аналіз на стійкість системи рівнянь, вибір методу контролю похибки та вибору кроків сітки адаптивного методу, аналіз застосування методу скінченних різниць для заміни неперервної функції розподілу зарядів дискретним точковим каркасом.

Початковим етапом визначення методу моделювання нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних і електрохімічних перетворювачах є дослідження нестійкостей для отримання загальної і частинної похідних функцій розподілу зарядів. Для опису нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії застосовано синергетичну теорію, яка дає можливість вийти на нове тлумачення ефекту розвитку нестійкостей в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії.

Дослідження показують, що значним фактором впливу на електрофізичні параметри процесів переносу зарядів є зміни температури. Але оскільки процеси розподілу носіїв заряду відбуваються значно швидше, ніж зміна температурного поля, то при моделюванні процесів переносу зарядів температуру можна розглядати як стаціонарну з відповідними їй значеннями електрофізичних параметрів.

При нелінійній залежності параметрів переносу зарядів у фотоелектричних і електрохімічних перетворювачах (коефіцієнтів дифузії і рухливості) модель переносу негативних зарядів (з індексом “-”) і позитивних зарядів (з індексом “+”) може бути представлена наступною системою рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_-}{\partial t} - \nabla \cdot (D_- \nabla N_-) - \nabla \cdot (\mu_- N_- \vec{E}) &= F_-(N_-, N_+), \\ \frac{\partial N_+}{\partial t} - \nabla \cdot (D_+ \nabla N_+) + \nabla \cdot (\mu_+ N_+ \vec{E}) &= F_+(N_-, N_+), \\ \nabla \cdot \vec{E} &= 4\pi e(N_- - N_+), \end{aligned} \quad (1)$$

де N_-, N_+ – об’ємні концентрації зарядів; t – час; \vec{E} – напруженість електричного поля; F_-, F_+ – нелінійні функції об’ємних джерел зарядів, зумовлених процесами іонізації та рекомбінації; D_-, D_+ – коефіцієнти дифузії зарядів, що пов’язані з рухливостями μ_-, μ_+ співвідношеннями Ейнштейна, відповідно до яких $D_- \sim \mu_-$, $D_+ \sim \mu_+$; e – заряд електрона.

При аналізі стійкості системи (1) по відношенню до малих збурень видно, що задача містить параметри, які залежать від збурень $\delta \vec{E}$, пропорційних співвідношенням $\vec{E}_0 \cdot \delta \vec{E}$, $\nabla(\vec{E}_0 \cdot \delta \vec{E})$. З іншого боку, згідно третього рівняння в системі (1), збурення $\delta \vec{E}$ пов’язані зі збуреннями $\delta N_-, \delta N_+$ співвідношенням:

$$i(\vec{k} \cdot \delta \vec{E}) = 4\pi e(\delta N_- - \delta N_+), \quad i^2 = -1, \quad (2)$$

де \vec{k} – хвильовий вектор, який визначає просторову структуру збурень.

З цієї причини надалі обмежуємося більш простим випадком аналізу збурень типу розшарування вздовж осі z ($\vec{k} = (0, 0, k_z)$) при однорідному незбуреному стані ($\vec{E}_0 = (0, 0, E_{0z})$, $(E_{0z} = \text{const})$), який дозволяє отримати дисперсійне рівняння другого порядку у вигляді

$$a\omega^2 + b\omega + c = 0 \quad (3)$$

з дійсним коефіцієнтом a і комплексними коефіцієнтами b, c .

Як правило, комплексність коефіцієнтів дисперсійного рівняння зумовлює і комплексність коренів дисперсійного рівняння ω , що призводить до експоненціально-синусоїдальної зміни збурень у часі. Очевидно, що експоненціально-синусоїдальна зміна збурень можлива і у тому випадку, коли коефіцієнти b, c в дисперсійному рівнянні є дійсними. Така ситуація має місце для “нульового” незбуреного стану ($N_{-0} = 0, N_{+0} = 0, E_{0z} = 0$). У цьому випадку рівняння для збурень $\delta N_-, \delta N_+$ виявляються такими, що не залежать від збурень δE_z .

Розглянуто метод чисельного моделювання двовимірного переносу зарядів в електрохімічних та фотоелектричних перетворювачах енергії у наближенні амбіполярної дифузії. У двовимірному випадку систему електродифузійних рівнянь, враховуючи наближення амбіполярної дифузії, можна звести до вигляду нелінійного диференціального рівняння у частинних похідних з відповідними крайовими та початковими умовами:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 u}{\partial \xi_1^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial \xi_2^2} + v_1 \frac{\partial u}{\partial \xi_1} + v_2 \frac{\partial u}{\partial \xi_2} = \varphi(u - u^3); \quad (4)$$

$$u(\xi_1 = 0, \xi_2) = u_{01}, \quad u(\xi_1, \xi_2 = 0) = u_{10}; \quad (5)$$

$$u(\xi_1 = \delta, \xi_2) = u_{\delta 1}, \quad u(\xi_1, \xi_2 = \delta) = u_{1\delta};$$

$$u(\tau = 0) = u^*(\xi_1, \xi_2). \quad (6)$$

Рівняння (4)-(6) для зручності розрахунків задане в безрозмірних змінних і, користуючись розробленим чисельним методом, в результаті розв'язку задачі можна швидко отримати необхідні значення концентрації зарядів від часу та двовимірної просторової координати.

Порядок розв'язування задачі є наступним:

- формулювання різницевих рівнянь методу змінних напрямків;
- розв'язування нелінійних різницевих рівнянь, в тому числі із застосуванням:
 - методу контролю похибки та вибору кроків сітки;
 - методу побудови змінної нерівномірної сітки;
 - адаптивного алгоритму розв'язування задачі;
- використання методу розв'язування систем лінеаризованих рівнянь;
- використання методу інтерполяції розв'язку задачі.

Адаптивні методи в залежності від поведінки розв'язку автоматично вибирають розмір кроку по усіх аргументах, тобто забезпечують пошук невідомої функції на змінній по простору та часу сітці. Це дозволяє контролювати похибку та отримати розв'язок за мінімальний машинний час.

Таким чином, при моделюванні процесів переносу заряду в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах адаптивні алгоритми мають істотні переваги перед алгоритмами з фіксованими сітками, оскільки при однаковій точності результату кількість просторових вузлів зменшується у декілька разів, що приводить до такого ж зменшення розмірності систем алгебраїчних рівнянь з відповідним зменшенням часу розрахунків.

У *третьому розділі* представлено моделювання нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії за допомогою адаптивного алгоритму, який складається з алгоритму неявного методу з повністю нерівномірною сіткою, методу розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь, методу розв'язання систем нелінійних алгебраїчних трансцендентних рівнянь, алгоритму побудови повністю нерівномірної сітки, алгоритму інтерполяції сіткових каркасів. Визначено аналітичні залежності між внутрішніми параметрами об'єкту моделювання та інтегральними параметрами системи, а також спосіб розрахунку усередненої температури фотоелектричних батарей у випадку залежності електрофізичних параметрів переносу зарядів від температури.

Розроблений адаптивний алгоритм розв'язання двовимірної задачі нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії методом змінних напрямків з повністю нерівномірною сіткою матиме наступну схему.

При відомих значеннях функції $U(x, y, t)$ для $t = t_k$ на нерівномірній сітці з кроками $h_{1,i}$ по змінній x ; $h_{2,j}$ по змінній y та кроком τ по змінній t . Для переходу на наступний часовий шар $t_{k+1} = t_k + \tau$ необхідно виконати такі дії:

- 1) обчислити за обраною різницевою схемою з кроками $h_{1,i}$, $h_{2,j}$, τ значення $u_{h_1, h_2, \tau}$ для кожного вузла $(k+1)$ -го шару;
- 2) обчислити з кроками $\frac{h_{1,i}}{2}$, $h_{2,j}$, τ значення $u_{\frac{h_1}{2}, h_2, \tau}$;
- 3) обчислити з кроками $h_{1,i}$, $\frac{h_{2,j}}{2}$, τ значення $u_{h_1, \frac{h_2}{2}, \tau}$;
- 4) обчислити з кроками h_1 , h_2 , $\frac{\tau}{2}$ значення $u_{h_1, h_2, \frac{\tau}{2}}$, застосувавши різницевий метод двічі;
- 5) для кожного вузла обчислити похибку e_{ij} , вибрати найбільшу з них – e ;
- 6) обчислити коефіцієнт α зміни часового кроку;
- 7) для кожного вузла обчислити коефіцієнт β_{ij} зміни просторового кроку. Якщо $e_{ij} > e_{don}$ та $h_{1,i} > h_{min}$ або $h_{1,i+1} > h_{min}$, то β_{ij} зменшити вдвічі та сформувавши прикмету відмови. Знайти для кожного вузла x_i мінімальне значення β_{ij} ;
- 8) сформувавши нову нерівномірну сітку в напрямку ОХ на $(k+1)$ -му шарі;
- 9) для кожного вузла обчислити коефіцієнт γ_{ij} та сформувавши нову нерівномірну сітку по напрямку ОУ аналогічно попередньому;
- 10) якщо $e \leq e_{don}$ або $e > e_{don}$ при мінімальних значеннях кроків, то крок приймається та уточнюється результат функції. На $(k+1)$ -му шарі створюється опорна функція для нової сітки. Прийняти $k = k+1$;
- 11) якщо $e > e_{don}$ та кроки не мінімальні, то результати анулюються, крок τ зменшується вдвічі, на k -му шарі створюється нова опорна функція з ущільненою сіткою;
- 12) якщо модельний час не перевищує кінцеве значення, перейти на п.1.

Типовий приклад результатів розрахунків наведений на рис. 1 – 4.

Результати розрахунків дають функцію розподілу концентрації зарядів в часі і просторі та є складними для розрахунку інтегральних параметрів об'єкта-моделі або впливу процесу формування структур на ці інтегральні параметри. Для встановлення зв'язків між локальними та інтегральними параметрами в роботі використано теорему про дивергенцію.

Суть такого підходу полягає в наступному. Вихідна система рівнянь (1) трансформується до дивергентної форми

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_-}{\partial t} - \nabla \cdot (D_- \nabla N_- - \mu_- N_- \vec{E}) &= F_-(N_-, N_+), \\ \frac{\partial N_+}{\partial t} - \nabla \cdot (D_+ \nabla N_+ + \mu_+ N_+ \vec{E}) &= F_+(N_-, N_+). \end{aligned} \quad (7)$$

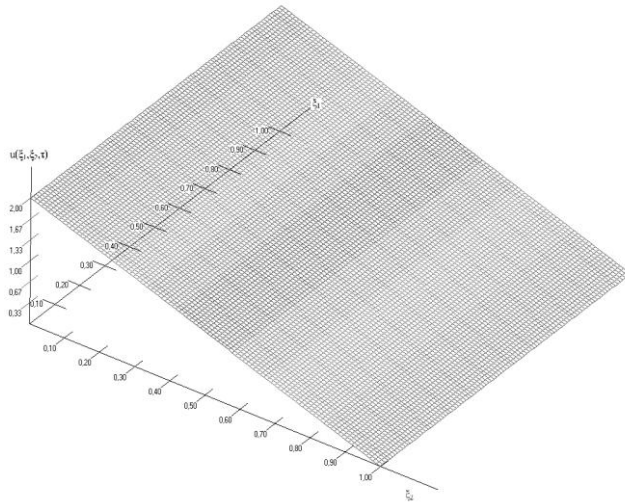


Рис. 1. Тривимірний графік початкового неоднорідного розподілу концентрації зарядів при нелінійній амбіполярній дифузії у плоскому шарі із початкового лінійного розподілу при $\varphi = 9$, $\tau = 0$ у відносних координатах. Сітка приведена до рівномірної.

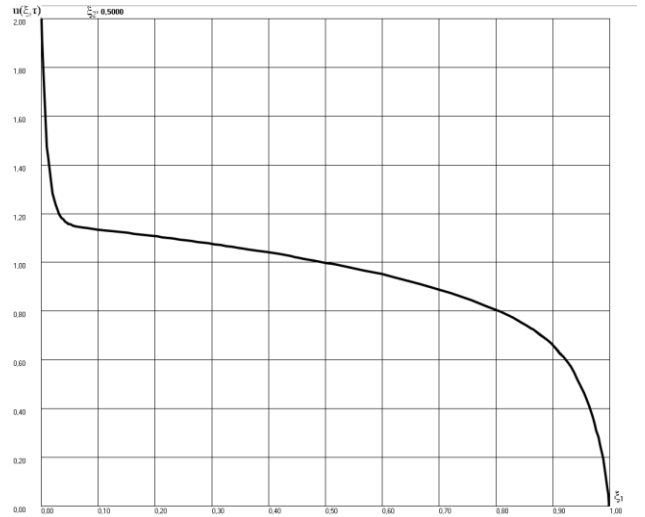


Рис. 2. Графік проекції по координаті ξ_1 проміжного розподілу концентрації зарядів при нелінійній амбіполярній дифузії у плоскому шарі при $\varphi = 9$, $\tau = 0,3$.

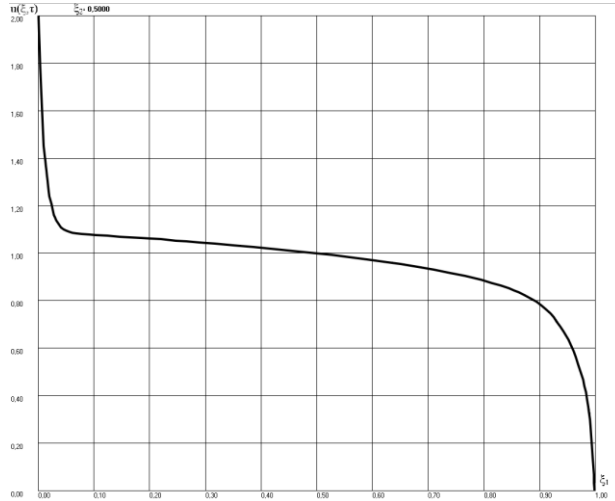


Рис. 3. Графік проекції по координаті ξ_1 встановленого розподілу концентрації зарядів при нелінійній амбіполярній дифузії у плоскому шарі при $\varphi = 9$, $\tau \rightarrow \infty$.

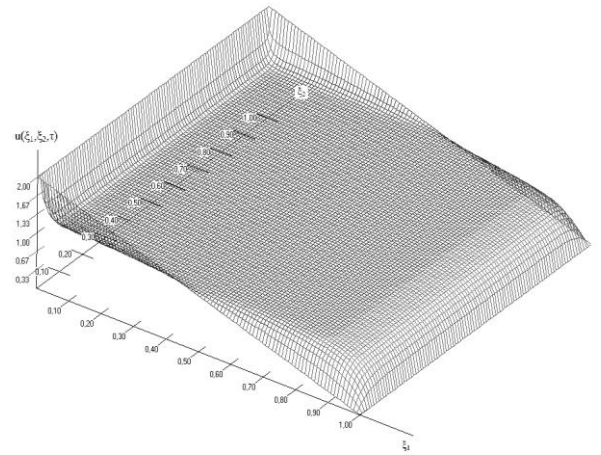


Рис. 4. Тривимірний графік встановленого неоднорідного розподілу концентрації зарядів при нелінійній амбіполярній дифузії у плоскому шарі із початкового лінійного розподілу при $\varphi = 9$, $\tau \rightarrow \infty$ у відносних координатах. Сітка приведена до рівномірної.

З урахуванням того, що

$$\begin{aligned}\delta_- &= D_- \nabla N_- + \mu_- N_- \vec{E}, \\ \delta_+ &= D_+ \nabla N_+ + \mu_+ N_+ \vec{E},\end{aligned}\quad (8)$$

де δ_-, δ_+ – повні щільності струмів для негативних та позитивних зарядів. В свою чергу система (7) з урахуванням (8) також приводиться до дивергентної форми. Після чого, застосувавши теорему векторного аналізу про дивергенцію, отримуємо:

$$\begin{aligned}\frac{\partial N_{-cp}}{\partial t} &= \frac{\int_V F_- dV}{V} + \frac{\oint_S \vec{\delta}_- \cdot d\vec{S}}{V}, \\ \frac{\partial N_{+cp}}{\partial t} &= \frac{\int_V F_+ dV}{V} + \frac{\oint_S \vec{\delta}_+ \cdot d\vec{S}}{V},\end{aligned}$$

де N_{-cp}, N_{+cp} – середні значення концентрації заряду зі знаками «-» та «+». Інтеграли по замкненій поверхні S : $\oint_S \vec{\delta}_- \cdot d\vec{S} = I_-$, $\oint_S \vec{\delta}_+ \cdot d\vec{S} = I_+$.

Тут I_-, I_+ – інтегральні струми на поверхні об'єкту дослідження, які дають можливість інтегрально оцінити різницю між іонізацією та рекомбінацією, а також розрахунково зв'язати загальний інтегральний параметр (електричний струм) з внутрішніми розподілом зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії, а також вплив збурень на інтегральні параметри системи.

Враховуючи малу відносну товщину напівпровідникових елементів, з яких складається фотоелектроперетворювач, можна вважати розподіл температурного поля всередині цих елементів рівномірним та визначити значення середньооб'ємної температури і характер її зміни для визначення залежності електрофізичних параметрів переносу зарядів від температури. Для цього розроблено метод аналітичного розрахунку усередненої температури батареї, що ґрунтується на застосуванні теореми про дивергенцію для рівняння нестационарної теплопровідності з об'ємним тепловиділенням:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} - \nabla \cdot \{\lambda \nabla T\} = q_v, \quad (9)$$

де $\nabla \cdot$ – оператор дивергенції; ∇T – градієнт температури T у фотоелектроперетворювачі; ρ, c_p, λ – відповідно густина, питома ізобарна теплоємність і коефіцієнт теплопровідності фотоелектроперетворювача; τ – час; q_v – густина об'ємного омичного тепловиділення внаслідок перетворення сонячного випромінювання.

Застосування теореми про дивергенцію призводить рівняння (9) до наступного звичайного диференціального рівняння для середньої за об'ємом V температури

$$T_{cp}^- = V^{-1} \int_V T dV \quad \text{при } \rho c_p = \text{const:}$$

$$\rho c_p \frac{dT_{cp}}{d\tau} = \frac{Q_+}{V} - \frac{Q_-}{V}, \quad (10)$$

де $Q_+ = \int_S \vec{P} \cdot d\vec{S}$ – інтегральна густина потужності сонячного випромінювання, що падає по нормалі до поверхні S ; $Q_- = \int_S \vec{q} \cdot d\vec{S}$ – густина потужності теплової енергії, що відводиться від поверхні батареї фотоперетворювачів.

Інтегрування рівняння (10) дозволяє визначити характер зміни середньооб'ємної температури при збільшенні та зменшенні густини енергії сонячного випромінювання протягом дня, а також значення усталеної температури T_{cp} за умови $Q_+ = Q_-$ (при $\frac{dT_{cp}}{d\tau} = 0$). Це надає також можливість за заданої температури довкілля (охолоджуючого середовища) вибрати раціональні умови відбору тепла для пониження температури фотоелектричної батареї з метою підвищення коефіцієнта корисної дії перетворення енергії, а також врахувати температурний вплив на електрофізичні властивості матеріалу фотоперетворювача при проведенні чисельних розрахунків.

У випадку фотоелектричних та електрохімічних перетворювачів енергії температурний режим цих пристроїв залежить як від внутрішніх джерел тепловиділення, так і в значній мірі залежить від зовнішніх умов (інтенсивності сонячної радіації, температури оточуючого середовища, умов теплообміну фотобатарей та електрохімічних акумуляторів із зовнішнім середовищем тощо).

На рис. 5 показані криві зміни середньоарифметичної температури горизонтальних рядів фотоперетворювачів сонячних батарей, побудовані за даними експериментальних досліджень.

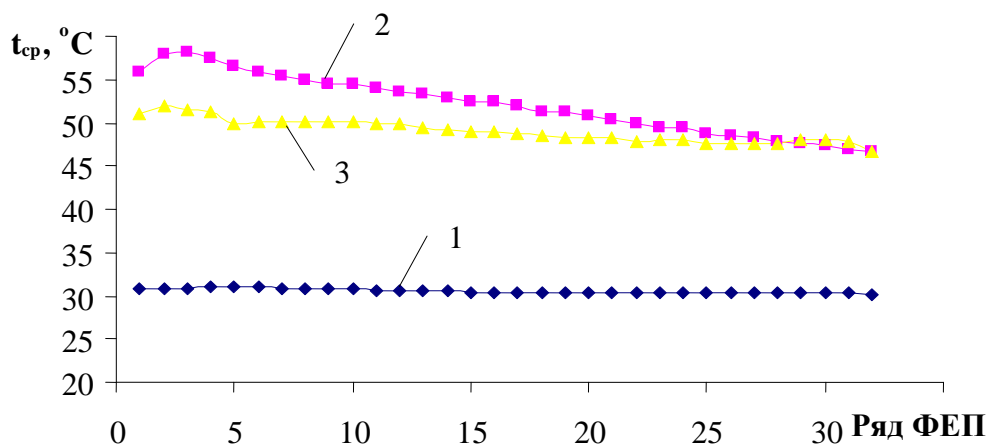


Рис. 3.8. Середньоарифметична температура поверхні фотоперетворювачів горизонтальних рядів сонячних батарей (зверху – вниз):

- 1 – батарея №1 (тінь);
- 2 – батарея №2 (сонце);
- 3 – батарея №2 (сонце).

Як видно, у випадку перебування фотоперетворювачів у тіньовій стороні (крива 1) різниця температур верхньої та нижньої частин батареї не більша 1 °C, а при освітленні сонячними променями вона може бути суттєвою: від 5 (крива 3) до 11 градусів (крива 2).

Температурне поле внутрішньої поверхні батарей є нерівномірним, особливо по висоті батареї. Певна відмінність температур поруч розташованих фотоперетворювачів (рис. 6) очевидно пов'язана з різницею їх загальних контактних термічних опорів.

Відомо, що при температурі 40-45 °С потужність сонячної батареї знижується на 15-17 %. Тому застосування охолодження сонячних батарей не тільки підвищує їх електричну продуктивність, а й може слугувати джерелом отримання значної кількості теплової енергії. Для розрахунку ж теплової потужності сонячної батареї необхідна інформація про зміни в часі усереднених температур їх поверхонь, визначення яких, як правило, проводиться експериментальним шляхом або можна отримати аналітичними методами.

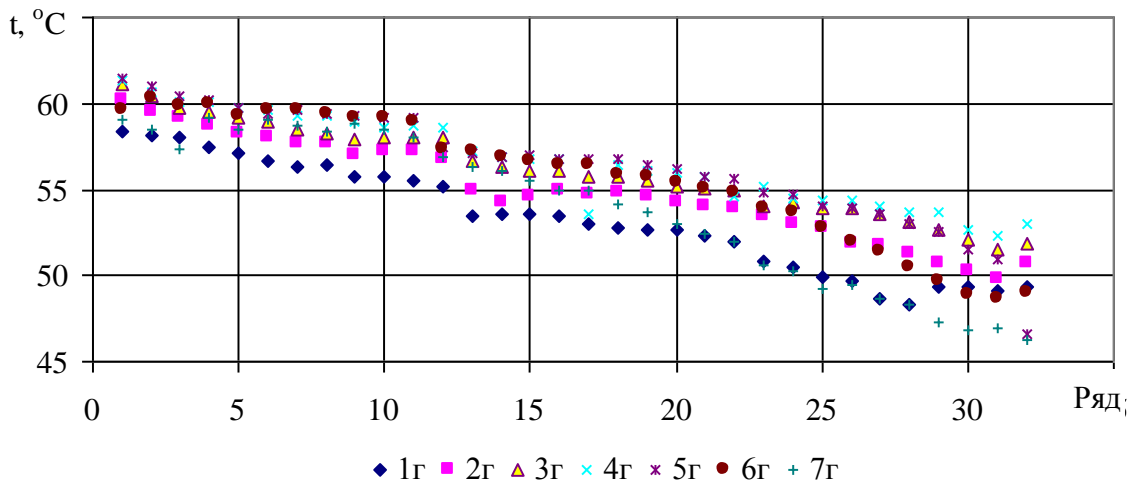


Рис. 6. Температурне поле внутрішньої поверхні ФЕП сонячної батареї БС-1 за погодних умов 20.07.2014 з 10⁴⁵ до 11²⁰ години (сонячна сторона, ясно) при U_{xx} в межах 14,53...14,55 В

В результаті натурних експериментальних досліджень встановлено, що результати теоретичного аналізу та експериментальні дані якісно узгоджуються.

Аналогічний по суті метод може бути реалізований і при аналізі зміни усередненої температури електрохімічних акумуляторів, як в режимах їх заряду, так і в режимах розряду.

У **четвертому розділі** представлено розроблений програмний продукт, надано проект розробки та засоби реалізації програми, представлено методику роботи користувача з програмою щодо моделювання нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії та результати роботи.

Основним блоком системи є розрахункова частина, у якій проводяться усі розрахунки. На вихід цей блок подає проміжні та остаточні результати розрахунків моделі, дані про перебіг розрахунків і параметри роботи адаптивного алгоритму. Отримані числові результати надалі можна візуалізувати.

Проект програми складається із двох основних складових частин:

- розрахункова частина,
- візуалізація результатів розрахунку і параметрів перебігу процесу.

Під час програмної реалізації поставленої задачі виникає необхідність оперувати з одновимірними (вектор, *vect*) та двовимірними (матриця, *matr*) масивами даних.

Основними вимогами до цих класів є зберігання масиву даних фіксованих розмірів, початкова ініціалізація масиву даних нулями, наявність конструктора копіювання даних, щоб уникнути реплікації даних.

Головне вікно програми дозволяє задавати параметри методу змінних напрямків: початковий, мінімальний та максимальний кроки по часу, кінцевий час; початкові, мінімальні та максимальні розміри просторових кроків, допустимого похибку розрахунку, допустимі коефіцієнти зміни часового та просторового кроків; змінювати фізичні параметри математичної моделі процесу, які завантажуються із файлів; проводити розрахунок у різних режимах. Інші елементи головного вікна використовуються для відображення характеристик проведеного розрахунку і власне його результатів.

Пункт меню «Таблиці» дозволяє переглядати перелік таблиць результуючих параметрів проведеного розрахунку, у тому числі таблицю значення функції по часових шарах і таблицю характеристики процесу розрахунку з усіма основними характеристиками процесу для всіх часових кроків

Пункт меню «Графіки» дозволяє переглядати перелік графіків результуючих параметрів проведеного розрахунку:

- тривимірний графік,
- двовимірні графіки розв'язку,
- графік контрольованої похибки,
- графік залежності кількості вузлів від часу,
- графік зміни просторових кроків із часом,
- представлення розрахункової області з повністю нерівномірною сіткою.

Програма надає можливість з високою швидкістю і бажаним рівнем точності моделювати процеси переносу зарядів енергії в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах, які описуються нелінійними диференціальними рівняннями у часткових похідних, що не завжди підлягають аналітичному розв'язанню. Програмне забезпечення дає змогу отримати в табличному вигляді значення концентрації носіїв заряду в бажаній точці розрахункової області на кожному з часових шарів. Також користувач має змогу візуально оцінити перебіг процесу за допомогою тривимірного графіку для оцінки параметрів роботи адаптивного алгоритму.

У *додатку* наведені акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі синергетичної методології аналізу стійкості процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії, розробки адаптивного алгоритму виконання чисельних експериментів та програмного забезпечення для моделювання нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних і електрохімічних перетворювачах енергії вирішено наукове

завдання щодо створення комбінованого методу чисельно-аналітичного аналізу нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії, які визначають їх інтегральні електричні, теплові та енергетичні характеристики.

Відповідно до поставленої мети в дисертації отримано наступні наукові та практичні результати:

1. На основі синергетичної теорії аналізу стійкості процесу переносу позитивних та негативних зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії встановлено, що у загальному випадку дисперсійне рівняння для частоти малих збурень концентрації має другий порядок з комплексними коефіцієнтами. Це призводить до експоненціально-синусоїдальної зміни збурень концентрації зарядів i , відповідно, до напруженості локальних електричних полів, струмів та омичного тепловиділення в часі із виходом на автоколивальні режими, які безпосередньо впливають на деградацію фізичних характеристик, що визначають ресурс та надійність функціонування обладнання.

2. Доведено, на основі аналізу експериментальних результатів зміни температури промислових фотобатарей в часі, що темпи зростання температури фотоперетворювачів у часі значно перевищують характерний час розвитку електродифузійних нестійкостей. Це дало можливість обґрунтувати застосування для аналізу стійкості відомого в фізичній кінетиці наближення амбіполярної дифузії.

3. Аналіз стійкості процесу електромасопереносу зарядів у часі показав, що в наближенні амбіполярної дифузії дисперсійне рівняння для частоти збурень має перший порядок із експоненціальним характером збільшення (або зменшення) збурень концентрації зарядів у часі.

4. Розроблено та обґрунтовано метод виконання багатоваріантних чисельних експериментів по визначенню просторово-часового розподілу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії при довільних, у тому числі суттєво неоднорідних та розривних по просторових координатах початкових розподілах концентрації зарядів. Це дало можливість розширити уявлення про характер зміни концентрації зарядів у часі не тільки при малих, але і при великих початкових збуреннях концентрації зарядів.

5. В результаті багатоваріантних чисельних експериментів встановлено, що при довільних початкових розподілах концентрації зарядів в режимі стабілізації при великих значеннях часу кінцевий профіль їх розподілу в просторі характеризується достатньо гладким розподілом в середині та різко неоднорідним розподілом поблизу границь з формуванням граничних шарів.

6. З урахуванням характеру розподілу концентрації зарядів у просторі в установленому в часі стані, а також у проміжних в часі станах, для практичної реалізації чисельних експериментів створено чисельний алгоритм розрахунків із використанням повністю нерівномірних сіток, який має істотні переваги перед іншими внаслідок зменшення розмірності алгебраїчних рівнянь, що реалізують метод скінченних різниць, і дає зменшення часу розрахунків на порядок із забезпеченням стійкості та точності розрахунків.

7. На основі використання теореми про дивергенцію розроблено метод переходу від внутрішніх локально-розподілених у просторі параметрів фотоелектричних та електрохімічних перетворювачів (концентрації зарядів, температури тощо) до усереднених по об'єму параметрів, що дає можливість визначити їх вплив на режими функціонування фотоелектричних та електрохімічних перетворювачів в системах електропостачання.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лук'яненко С. О. Методи реалізації програмного забезпечення для моделювання процесів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах / С. О. Лук'яненко, С. В. Матях, В. Ф. Резцов // Відновлювана енергетика XXI століття : VI-та міжнар. конф., 19 – 23 вересня 2005 р. : тези доп. – АР Крим, смт. Миколаївка, 2005. – С. 34 – 37.

2. Лук'яненко С. О. Застосування програмного забезпечення для моделювання процесів переносу заряду в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах / С. О. Лук'яненко, С. В. Матях, Л. В. Яценко // Відновлювана енергетика XXI століття : VII-а міжнар. конф., 11 – 15 вересня 2006 р. : тези доп. – АР Крим, смт. Миколаївка, 2006. – С. 106 – 109.

3. Матях С. В. Вибір методу реалізації програмного забезпечення для моделювання процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах / С. В. Матях, В. Ф. Резцов, Л. В. Яценко // Відновлювана енергетика. – 2006. – № 3. – С. 42 – 50.

4. Лук'яненко С. О. Програмне забезпечення для моделювання процесів у фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах // С. О. Лук'яненко, С. В. Матях // Відновлювана енергетика. – 2007. – № 1 (18). – С. 27 – 33.

5. Лук'яненко С. О. Моделювання двовимірних процесів перетворення енергії у відновлюваній енергетиці / С. О. Лук'яненко, С. В. Матях, В. Ф. Резцов, Л. В. Яценко // Відновлювана енергетика XXI століття : VIII-а міжнар. конф., 17 – 21 вересня 2007 р. : тези доп. – АР Крим, смт. Миколаївка, 2007. – С. 87 – 91.

6. Матях С. В. Устойчивость процессов переноса зарядов в фотоэлектрических и электрохимических преобразователях / С. В. Матях, В. Ф. Резцов, Т. В. Суржик // Відновлювана енергетика XXI століття : IX-а міжнар. конф., 15 – 19 вересня 2008 р. : тези доп. – АР Крим, смт. Миколаївка, 2008. – С. 107 – 108.

7. Матях С. В. Устойчивость и неустойчивость процессов переноса зарядов в фотоэлектрических преобразователях и электрохимических аккумуляторах / С. В. Матях, В. Ф. Резцов // Відновлювана енергетика XXI століття : X-а ювілейна міжнар. конф., 14 – 18 вересня 2009 р. : тези доп. – АР Крим, смт. Миколаївка, 2009. – С. 162 – 163.

8. Матях С. В. Нестійкості процесів переносу заряду в фотоелектричних і електрохімічних перетворювачах з нелінійними параметрами переносу // С. В. Матях // Відновлювана енергетика. – 2010. – № 1 (20). – С. 41 – 43.

9. Матях С. В. Моделювання двовимірних процесів у фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах // С. В. Матях // Відновлювана енергетика. – 2010. – № 2 (21). – С. 18 – 22.

10. Матях С. В. Адаптивні методи чисельного моделювання процесів електромасопереносу у фотоелектричних перетворювачах та електрохімічних акумуляторах / С. В. Матях // Відновлювана енергетика XXI століття : XI-а міжнар. конф., 13 – 17 вересня 2010 р. : тези доп. – АР Крим, смт. Миколаївка, 2010. – С. 175.

11. Матях С. В. Програмна реалізація чисельного моделювання двовимірних процесів у фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах // С. В. Матях // Відновлювана енергетика. – 2011. – № 2 (25). – С. 29 – 32.

12. Матях С. В. Програмне чисельне моделювання двовимірних процесів у фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах / С. В. Матях // Відновлювана енергетика XXI століття : XII-а міжнар. конф., 12 – 16 вересня 2011 р. : тези доп. – АР Крим, смт. Миколаївка, 2011. – С. 168 – 170.

13. Матях С. В. Програмна реалізація чисельного моделювання процесів переносу заряду в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах / С. В. Матях // Відновлювана енергетика XXI століття : XIII-а міжнар. конф., 10 – 14 вересня 2012 р. : тези доп. – АР Крим, смт. Миколаївка, 2012. – С. 233 – 234.

14. Матях С. В. Модифікація чисельного алгоритму з нерівномірною сіткою для чисельного моделювання процесів переносу заряду в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах / С. В. Матях // Відновлювана енергетика XXI століття : XIV-а міжнар. конф., 16 – 20 вересня 2013 р. : тези доп. – АР Крим, смт. Миколаївка, 2013. – С. 260 – 261.

15. Матях С. В. Адаптивный численный алгоритм для решения двумерной задачи распределения зарядов при моделировании фотоэлектрических и электрохимических преобразователей // С. В. Матях // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 17 (139). – С. 46 – 50.

16. Матях С. В. Розв'язання двовимірної задачі при моделюванні розподілу зарядів у фотоелектричних і електрохімічних перетворювачах // С. В. Матях // Відновлювана енергетика. – 2014. – № 3 (38). – С. 25 – 30.

17. Матях С. В. Особливості вирішення двовимірної задачі розподілу зарядів при моделюванні фотоелектричних і електрохімічних перетворювачів / С. В. Матях // Відновлювана енергетика XXI століття : XV-а ювілейна міжнар. конф., 16 – 17 вересня 2014р. : тези доп. – м. Київ, 2014. – С. 223 – 225.

18. Суржик Т. В. Особливості застосування теореми Умова-Пойнтинга для аналізу електротеплового стану фотобатарей та сонячних колекторів// А. В. Гамарко, С. В. Матях, Т. В. Суржик, В. А. Щокіна // Відновлювана енергетика. – 2015. – № 1 (40). – С. 38 – 42.

19. Матях С. В. Перехід від внутрішніх модельних параметрів до загальних інтегральних при моделюванні нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних і електрохімічних перетворювачах / С. В. Матях // Відновлювана енергетика та енергоефективність XXI століття: XVI-а міжнар. конф., 28 – 29 травня 2015р. : тези доп. – м. Київ, 2015. – С. 202 – 204.

20. Коломієць Д.П. Визначення усередненої температури фотоелектричних батарей / Коломієць Д. П., Харченко Л. Л., Матях С. В. // Відновлювана енергетика. – 2015. – № 4 (43). – С. 20 – 28.

АНОТАЦІЇ

Матях С. В. Чисельно-аналітичне моделювання нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.08 – перетворювання відновлюваних видів енергії. – Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ, 2016 р.

У дисертаційній роботі запропоновано новий метод чисельно-аналітичного моделювання нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії для підвищення стійкості енергетичних систем на основі фотоелектричних джерел живлення.

Розроблено узагальнені теоретичні основи стійкості систем на основі фотоелектричних та електрохімічних перетворювачів енергії, а також адаптивний алгоритм чисельного моделювання та програмне забезпечення для моделювання нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії; вирішено наукове завдання щодо підвищення ефективності чисельно-аналітичного моделювання нелінійних процесів переносу зарядів в фотоелектричних та електрохімічних перетворювачах енергії.

Результати роботи використовуються в ІВЕ НАН України при виконанні НДР з фундаментальних досліджень, а також були впроваджені в навчальних закладах м. Києва: на кафедрі «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» та у Національному університеті харчових технологій України.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, електрохімічні перетворювачі, фотоелектричні перетворювачі, чисельні методи, математичне моделювання, адаптивні методи моделювання.

Матях С. В. Численно-аналитическое моделирование нелинейных процессов переноса зарядов в фотоэлектрических и электрохимических преобразователях энергии. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.08 – преобразование возобновляемых видов энергии. – Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев, 2016 г.

В диссертационной работе предложен новый метод численно-аналитического моделирования нелинейных процессов переноса зарядов в фотоэлектрических и электрохимических преобразователях энергии для повышения стойкости энергетических систем на основе фотоэлектрических источников питания.

Применение синергической теории для описания нелинейных процессов переноса зарядов в фотоэлектрических и электрохимических преобразователях энергии дало возможность значительно уточнить и повысить качество исследований эффекта развития неустойчивостей и возмущений. В работе показан как общий случай развития неустойчивостей и возмущений, так и случаи, когда возможно

упрощение модели процесса с понижением порядка дисперсионного уравнения, а также проведен анализ того, в каких именно случаях такие упрощения допустимы.

Разработаны обобщенные теоретические основы стойкости систем на основе фотоэлектрических и электрохимических преобразователей энергии, а также адаптивный алгоритм численного моделирования и программное обеспечение для моделирования нелинейных процессов переноса зарядов в фотоэлектрических и электрохимических преобразователях энергии; решена научная задача по повышению эффективности численно-аналитического моделирования нелинейных процессов переноса зарядов в фотоэлектрических и электрохимических преобразователях энергии.

Математическое моделирование процессов переноса зарядов в фотоэлектрических и электрохимических преобразователях позволяет расширить представление об особенностях физических процессов, которые постоянно проходят в их рабочих промежутках. Это обусловлено тем, что из-за сложности экспериментального определения пространственно-временного распределения зарядов, а также влияния на их распределение других параметров, исследования, как правило, ограничиваются лишь определением интегральных рабочих характеристик.

Разработаны теоретические основы и алгоритмическая база для численного моделирования нелинейных процессов переноса зарядов в фотоэлектрических и электрохимических преобразователях энергии, что позволяет оптимизировать проведение расчетов и увеличить эффективность расчета задачи.

Адаптивный численный алгоритм на основе метода переменных направлений с полностью неравномерной сеткой обеспечивает достаточную точность для моделирования процессов переноса зарядов, которые в данное время не подлежат аналитическому решению и описываются нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных.

В результате исследований установлено, что применение разработанного адаптивного численного алгоритма с полностью неравномерной сеткой для моделирования энергетических процессов возобновляемой энергетики имеет существенные преимущества перед другими, поскольку при одинаковой точности результата количество пространственных узлов уменьшается в несколько раз, что приводит к такому же уменьшению размерности систем алгебраических уравнений; важным преимуществом является также возможность получения результата с заранее заданной точностью за счет оценки погрешности решения в каждом узле сетки при переходе на следующий временной слой.

Определены аналитические зависимости между внутренними параметрами объекта моделирования и интегральными параметрами системы, которые дают возможность интегрально оценить разницу между ионизацией и рекомбинацией, расчетно связать общий интегральный параметр (электрический ток) с внутренним распределением зарядов в фотоэлектрических и электрохимических преобразователях энергии, а также влияние возмущений на интегральные параметры системы; разработан способ расчета усредненной температуры фотоэлектрических батарей в случае зависимости электрофизических параметров переноса зарядов от температуры.

Созданный программный продукт обеспечивает введение всех необходимых входных данных и предоставляет возможность получения промежуточных и результирующих параметров расчетного процесса с визуализацией данных в виде таблиц и графического материала, что повышает качество выполнения фундаментальных научных исследований по получению информации о распределении заряженных частиц в преобразователях энергии возобновляемых источников и сокращает количество времени, необходимое на их проведение.

Результаты диссертационной работы позволяют решить проблему повышения стойкости и эффективности исследования энергетических систем на основе фотоэлектрических источников питания.

Результаты работы используются в ИВЭ НАН Украины при выполнении фундаментальных исследований в области фотоэнергетики, а также были внедрены в учебных заведениях г. Киева: Национальном техническом университете Украины «Киевский политехнический институт», Национальном университете пищевых технологий Украины.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, электрохимические преобразователи, фотоэлектрические преобразователи, численные методы, математическое моделирование, адаптивные методы моделирования.

Matyakh S. Numerical and analytical modeling of nonlinear processes of charge transport in photovoltaic and electrochemical energy converters. – As a manuscript.

The dissertation for a candidate of engineering sciences degree, speciality 05.14.08 – Renewable energy sources conversion. – The Institute of Renewable Energy of Ukrainian National Academy of Sciences, Kyiv, 2016.

In the dissertation is proposed a new method of numerical and analytical modeling of nonlinear processes of charge transport in photovoltaic and electrochemical energy converters to improve the stability of power systems based on photovoltaic power sources.

The generalized theoretical foundations of stability of systems based on photovoltaic and electrochemical energy converters and adaptive algorithm for the numerical simulation and modeling software for nonlinear processes of charge transport in photovoltaic and electrochemical energy converters have been developed; solved scientific tasks to improve the efficiency of numerical and analytical modeling of nonlinear processes of charge transport in photovoltaic and electrochemical energy converters.

The results are being used in The Institute of Renewable Energy of Ukrainian National Academy of Sciences in carrying out fundamental research scientific works, and have been implemented in educational institutions in Kyiv, on the department «Alternative and renewable energy sources» National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», National University of Food Technologies of Ukraine.

Key words: renewable energy sources, photovoltaic, electrochemical converters, numerical method, mathematical simulation, adaptive numerical algorithm simulation.