

*Розроблені інтерференційно-абсорбційні відрізаючі фільтри на базі кристалів  $In_4(Se_3)_{1-x}Te_{3x}$  з різним положенням межі відрізання залежно від складу  $x$  твердого розчину. Отримані фоточутливі елементи на основі епітаксійних гомо- і гетеропереходів на  $In_4Se_3$  та  $In_4(Se_3)_{1-x}Te_{3x}$ , проведена лазерна корекція температурних залежностей їх фоточутливості. Досліджена механічна міцність і стабільність спектральних характеристик фільтрів та фоточутливих елементів при охолодженні до низьких температур*

*Ключові слова: інтерференційний фільтр; пропускання, кристал,  $In_4Se_3$ ,  $In_4(Se_3)_{1-x}Te_{3x}$ , гетероструктура, твердий розчин, фоточутливість*

*Разработаны интерференционно-абсорбиционные отрезающие фильтры на базе кристаллов  $In_4(Se_3)_{1-x}Te_{3x}$  с разным положением границы отрезания в зависимости от состава  $x$  твердого раствора. Получены фоточувствительные элементы на основе эпитаксиальных гомо- и гетеропереходов на  $In_4Se_3$  и  $In_4(Se_3)_{1-x}Te_{3x}$ , проведена лазерная коррекция температурных зависимостей их фоточувствительности. Исследована механическая прочность и стабильность спектральных характеристик фильтров и фоточувствительных элементов при охлаждении до низких температур*

*Ключевые слова: интерференционный фильтр, пропускания, кристалл,  $In_4(Se_3)_{1-x}Te_{3x}$ ,  $In_4Se_3$ , гетеропереход, твердый раствор, фоточувствительность*

## ВЛАСТИВОСТІ ОПТИЧНИХ І ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ КРИСТАЛІВ $In_4Se_3$ , $In_4(Se_3)_{1-x}Te_{3x}$

**В. В. Стребезев**  
Аспірант\*

E-mail: microel@chnu.edu.ua

**В. М. Стребезев**

Кандидат фізико-математичних наук, доцент\*

E-mail: taimasi@mail.ru

**С. В. Нічий**

Кандидат фізико-математичних наук, доцент\*

E-mail: ssegg@ukr.net

**І. М. Юрійчук**

Кандидат фізико-математичних наук, доцент\*

E-mail: ivmykyur@gmail.com

\*Кафедра фізики напівпровідників і наноструктур  
Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича  
вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, Україна, 58012

### 1. Вступ

Перспективними для застосування в оптоелектроніці та в інфрачервоній техніці є монокристали  $In_4Se_3$  та  $In_4(Se_3)_{1-x}(Te_3)_x$ , які володіють високою прозорістю в близькій і середній ІЧ-області і значною фоточутливістю [1]. Високі спектральні характеристики, стабільність, стійкість до дії хімічних агентів і атмосфери як монокристалів  $In_4Se_3$ ,  $In_4Te_3$ , так і твердих розчинів  $In_4(Se_3)_{1-x}Te_{3x}$  дають можливість конструювати на їх основі фотоелектричні та оптичні елементи [2]. Важливим питанням є дослідження їх спектральних та температурних характеристик, оптимізація технології отримання тонкоплівкових відрізаючих інтерференційно-абсорбційних фільтрів і фоточутливих епітаксійних гетеропереходів для застосувань, пов'язаних з фільтрацією і реєстрацією ІЧ-випромінювання.

### 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Монокристали шаруватих напівпровідників групи  $A^3B^6$  –  $In_4Se_3$ ,  $In_4Te_3$  і твердого розчину  $In_4(Se_3)_{1-x}Te_{3x}$  активно досліджуються в зв'язку з високою фоточутливістю, оптичною прозорістю при  $\lambda > 2$  мкм і перспективою створення на їх основі різнома-

нітних фотоприймальних та оптичних приладів [1 – 3]. Розширити область застосування корисних властивостей цих сполук вдається шляхом переходу від монокристалів до тонких плівок, епітаксійних шарів та складних гетероструктур [2, 4 – 8]. Оптичні елементи на основі монокристалів  $In_4(Se_3)_{1-x}Te_{3x}$  запропоновані в роботі [2], епітаксійні шари  $In_4(Se_3)_{1-x}Te_{3x}$  отримані в [4] методом рідинно-фазової епітаксії при різних температурно-часових режимах нарощування. Необхідно відмітити, що найбільш структурно досконалі кристали і шари  $In_4(Se_3)_{1-x}Te_{3x}$  відповідають складу  $x < 0,2$  і  $x > 0,7$  [1, 2]. На даний час не досліджені тонкоплівкові інтерференційно-абсорбційні фільтри з різним положенням короткохвильової межі відрізання випромінювання на базі цих кристалів. Актуальним є питання оптимізації фоточутливості епітаксійних елементів на основі  $In_4Se_3$  та  $In_4(Se_3)_{1-x}Te_{3x}$  шляхом лазерної корекції структурно-фазового стану в перехідному шарі на гетеромежі, а також шляхом легування активних областей гетероструктури різними домішками [8 – 11].

### 3. Експериментальні дослідження і результати

Як підкладки для оптичних відрізаючих фільтрів і фоточутливих елементів застосовувалися вироще-

ні методом Чохральського монокристали  $\text{In}_4\text{Se}_3$  та  $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_3x$ , сколоті в площині спайності (100). Товщина сколотих пластин знаходилася в інтервалі  $h=0,5\pm 1,0$  мм. Кристали мали р-тип провідності при кімнатній температурі і концентрацію носіїв від  $1,5\cdot 10^{14}$   $\text{см}^{-3}$  до  $5\cdot 10^{17}$   $\text{см}^{-3}$  при зміні складу від  $\text{In}_4\text{Se}_3$  до  $\text{In}_4\text{Te}_3$ . Шаруваті монокристали твердого розчину  $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_3x$  одержуються у вигляді достатньо однорідних для оптичних застосувань злитків тільки в порівняно вузькому діапазоні складів поблизу країв фазової діаграми. При  $0,20 < x < 0,70$  однорідні кристали не отримані.

Тому як підкладки для інтерференційних тонкоплівкових покриттів були використані монокристали  $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_3x$  зі складом  $0 \leq x \leq 0,2$  а також  $0,75 \leq x \leq 1$ , включаючи крайні склади сполук  $\text{In}_4\text{Se}_3$  і  $\text{In}_4\text{Te}_3$ . Кристали твердого розчину  $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_3x$  залежно від складу характеризуються як різним значенням показника заломлення від  $n=3,2$  при  $x=0$  до  $n=3,8$  при  $x=1$ , так і різним значенням ширини забороненої зони відповідно від 0,65 еВ до 0,48 еВ [1, 2]. Це дозволяє підбирати матеріал підкладки з різним положенням границі відрізання  $\lambda_{\text{TP}}$  від 1,8 мкм до 2,5 мкм для забезпечення необхідного інтервала перекриття з областю блокування випромінювання розрахованого інтерференційного фільтру.

Розрахунок конструкції тонкоплівкових інтерференційних систем для нанесення на кристали  $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_3x$  проводився стандартним матричним методом еквівалентних шарів у поєднанні з методом згладжування спектральної характеристики по відношенню до функції, що моделює заданий вигляд фільтру. Розроблена програма, яка розраховує спектральні характеристики багатошарових інтерференційних покриттів та дозволяє аналізувати спектри відбивання та пропускання покриттів для різних значень числа шарів, їх товщин та показників заломлення. Вхідними даними програми є показники заломлення окремих шарів  $n_j$  ( $j=1..m$ , де  $m$  – кількість шарів у системі), їх оптичні товщини  $d_j=n_j l_j$ , де  $l_j$  – геометричні товщини шарів, а також показник заломлення середовища  $n_0$  та підкладки  $n_S$ . Коефіцієнти пропускання  $T$  та відбивання  $R$  системи визначаються наступним виразом [5]:

$$T = 1 - R = 4(2 + n_0 n_S^{-1} M_{11}^2 + n_0 n_S M_{12}^2 + n_0^{-1} n_S^{-1} M_{21}^2 + n_0^{-1} n_S M_{22}^2)^{-1}, \tag{1}$$

де  $M_{ij}$  – матричні елементи характеристичної матриці багатошарової системи

$$M = \prod_{j=1}^k M_j = \begin{pmatrix} M_{11} & iM_{12} \\ iM_{21} & M_{22} \end{pmatrix}, \tag{2}$$

а  $M_j$  – матриця  $j$ -шару:

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos 2\pi d_j \lambda^{-1} & i n_j^{-1} \sin 2\pi d_j \lambda^{-1} \\ i n_j \sin 2\pi d_j \lambda^{-1} & \cos 2\pi d_j \lambda^{-1} \end{pmatrix}, \tag{3}$$

Розраховані конструкції відрізаючих фільтрів мають загальний вигляд  $|S| q_1 \text{H} q_2 \text{B} (\text{HB})^k q_3 \text{H} q_4 \text{B} q_5 \text{H}$ , де  $q_1, q_2, \dots, q_5$  – коефіцієнти відхилення товщин плівок Ge

(B) і SiO (H) від чвертьхвильових, S – підкладка. Відповідні спектральні характеристики систем з  $\lambda_{\text{TP}}=2,5; 3,3; 3,9$  мкм наведені на рис. 1 (криві 1, 2, 3). Напилення таких інтерференційних систем проводилося методом електронно-променевого випаровування у вакуумі  $P=2\cdot 10^{-6}$  мм.рт.ст. Контроль товщини плівок у процесі напилення здійснювався фотометричним методом на фіксованій довжині хвилі. Для більш довгохвильових відрізаючих фільтрів з  $\lambda_{\text{TP}}=3,9$  мкм в якості підкладок використовувалися монокристали складу  $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{0,12}(\text{Te}_3)_{0,88}$  (рис. 1, крива 6). Максимальний коефіцієнт пропускання для такого фільтра складав 80 %, зниження пропускання в довгохвильовій області пов'язане з дефектами в кристалах підкладок та з похибками в товщинах плівкового покриття. Протяжні дефекти є характерними для цих шаруватих сполук і пов'язуються з виділенням фаз у міжшарових проміжках [1]. Їхня густина визначалася за допомогою растрового електронного мікроскопа (РЕМ) у режимі "вторинних" електронів при прискорюючій напрузі 30 кВ. В той же час для кристалів складу  $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{0,94}(\text{Te}_3)_{0,06}$  вдавалося одержати меншу густину подібних дефектів, відповідно фільтри з  $\lambda_{\text{TP}}=2,5$  мкм на їх основі володіють більшою прозорістю в робочій області (рис. 1, крива 4). Оптимального співпадання вимірних характеристик з розрахованими для фільтрів з  $\lambda_{\text{TP}}=3,3$  мкм вдалося досягнути при використанні як підкладки кристалів  $\text{In}_4\text{Se}_3$  (рис. 1, крива 5). На таких фільтрах реальним є досягнення високих оптичних характеристик – крутизна короткохвильової границі відрізання  $K_p=0,93-0,96$ , максимальне пропускання в робочій області  $T_{\text{max}} \geq 90$  %, середній коефіцієнт пропускання в області блокування фону  $\tau \leq 10^{-2}$  %. Використання плівок Ge- SiO як складових систем фільтрів на підкладках  $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_3x$ , як показали дослідження в РЕМ, забезпечує високу адгезію і відсутність деградації плівок при охолодженні до азотних температур.

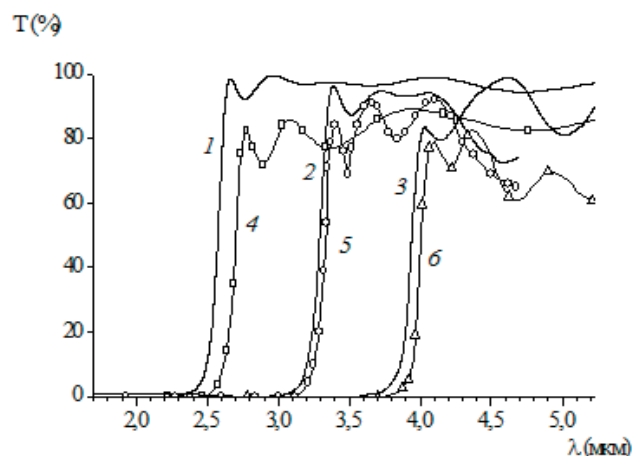


Рис. 1. Залежність коефіцієнта пропускання  $T$  фільтрів на основі  $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_3x$  з  $\lambda_{\text{TP}}=2,5; 3,3; 4,0$  мкм від довжини хвилі  $\lambda$ : криві 1, 2, 3 – теоретично розраховані криві; 4, 5, 6 – експериментальні

Фоточутливі елементи, виготовлені на основі отриманих методом рідинної та електрорідинної епітаксії гомо- і гетеропереходів на  $\text{In}_4\text{Se}_3$ ,  $\text{In}_4\text{Te}_3$  та  $\text{In}_4(\text{Se}_3)_{1-x}\text{Te}_3x$ , були чутливі до ІЧ-випромінювання в спектральному діапазоні 1,0–2,5 мкм при кімнат-

ній температурі. Проводилося лазерне опромінення епітаксійних структур мілісекундним лазером з  $\lambda=1,06$  мкм (лазер на ітрій-алюмінієвому гранаті), імпульсами тривалістю  $\Delta\tau=1-3$  мс та інтенсивністю  $15-25$  кВт/см<sup>2</sup>, отриманими в режимі вільної генерації [4]. Застосування такого режиму лазерної обробки дало можливість збільшити значення сигналу фотодіоду автоепітаксійних структур p-In<sub>4</sub>Se<sub>3</sub>/n-In<sub>4</sub>Se<sub>3</sub> і гетероструктур, також одержане деяке зміщення спектральної кривої фоточутливості в довгохвильову область (рис. 2). Це зміщення можна пояснити утворенням під дією лазерного випромінювання деякої кількості більш вузькозонних фаз в епітаксійному шарі, наприклад фази In<sub>5</sub>Se<sub>6</sub> [4].

Дослідження температурної залежності фоточутливості елементів до і після лазерної обробки (рис. 3, крива 1, крива 2) показало, що при охолодженні до T=220-200 К різко збільшується фоточутливість у порівнянні з кімнатною температурою.

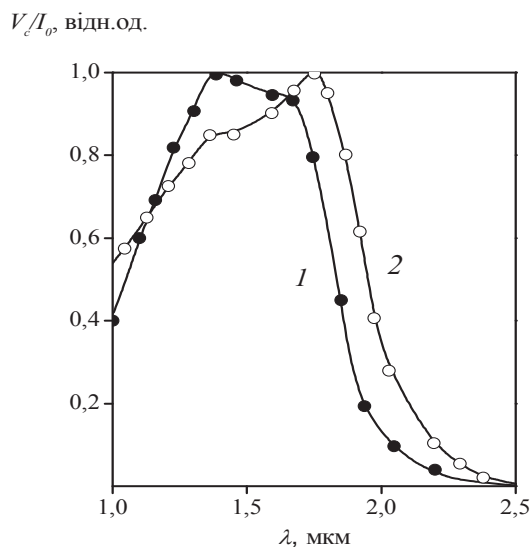


Рис. 2. Залежність фоточутливості  $V_c/I_0$  епітаксійної структури p-In<sub>4</sub>Se<sub>3</sub>/n-In<sub>4</sub>Se<sub>3</sub> від довжини хвилі  $\lambda$  до (крива 1) і після (крива 2) лазерної обробки

При цьому величина сигналу фотодіоду більша для структур після лазерної обробки. Таке покращення фоточутливості в результаті лазерної обробки при інтенсивності  $20-25$  кВт/см<sup>2</sup> було зафіксоване для

епітаксійних структур на основі In<sub>4</sub>Se<sub>3</sub>, а також на In<sub>4</sub>(Se<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub>(Te<sub>3</sub>)<sub>x</sub>. Це можна пояснити структурно-фазовими перетвореннями під дією лазерного випромінювання в епітаксійному шарі та на гетеромежі. Лазерний відпал дефектів, покращення структури в області металургійної межі епітаксійного переходу, зменшує рекомбінацію нерівноважних носіїв та веде до зростання фотодіоду. Варто зауважити, що отримані епітаксійні структури є механічно стійкими при охолодженні до 77 К і термоциклованні до кімнатних температур.

$V_c$  від од.

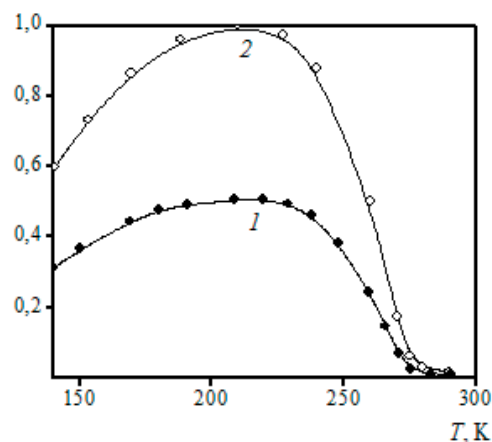


Рис. 3. Залежність фоточутливості  $V_c$  епітаксійної структури p-In<sub>4</sub>Se<sub>3</sub>/n-In<sub>4</sub>Se<sub>3</sub> від температури T до (крива 1) і після (крива 2) лазерної обробки

#### 4. Висновки

Застосування шаруватих кристалів In<sub>4</sub>Se<sub>3</sub>, In<sub>4</sub>Te<sub>3</sub> і твердих розчинів In<sub>4</sub>(Se<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub>(Te<sub>3</sub>)<sub>x</sub> для створення оптичних і фоточутливих елементів для діапазону  $\lambda=1-3$  мкм дає можливість одержати відрізаючі фільтри і фоточутливі епітаксійні структури. Ці елементи здатні забезпечувати високі параметри при охолодженні до низьких температур. Лазерна обробка фоточутливих елементів суттєво збільшує сигнал фотодіоду епітаксійних структур в області оптимальних робочих температур.

#### Література

1. Гертович, Т. С. Электрические и оптические свойства твердых растворов In<sub>4</sub>(Se<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub>Te<sub>3x</sub> (0,60<x<1,00) [Текст] / Т. С. Гертович, С. И. Гринева, А. Д. Огородник, О. Т. Столярчук, К. Д. Товстюк, Е. С. Шарлай // Украинский физический журнал – 1985 – Т.30, №4 – С. 624-628.
2. Грицюк, Б. Н. Твердый раствор In<sub>4</sub>(Se<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub>Te<sub>3x</sub> – материал для абсорбционных оптических фильтров [Текст] / Б. Н. Грицюк, Т. С. Мошкова, А. Д. Огородник, И. М. Раренко, Т. А. Волянская // Журнал прикладной спектроскопии. – 1999. – Т.66, №4. – С. 577-579.
3. Мошкова, Т. С. Вплив легування на оптичні та фотоелектричні властивості монокристалів In<sub>4</sub>(Se<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub>Te<sub>3x</sub> [Текст] / Т. С. Мошкова, Т. А. Мельничук, А. Д. Огородник, В. М. Стребжев // Украинский физический журнал. – 2005. – Т.50, №12. – С. 1254-1258.
4. Melnychuk, T. A. Laser synthesis of thin films and layers of In<sub>4</sub>Se<sub>3</sub>, In<sub>4</sub>Te<sub>3</sub> and modification of their structure [Text] / T. A. Melnychuk, V. N. Strebege, G. I. Vorobets // Applied Surface Science. – 2007. – V. 254. – P. 1002.

5. Обедзинський, Ю. К. Фоточутливі гетероструктури і фільтри інфрачервоного діапазону на монокристаллах CdSb, In<sub>4</sub>Se<sub>3</sub> [Текст] / Ю. К. Обедзинський, Б. М. Грицюк, В. В. Стребжев, В. М. Стребжев, І. М. Юрійчук // Восточно-Европейський журнал передових технологій. – 2012. – № 6/12(60). – С.44-46.
6. Gritsyuk, B. M. IR-photodetectors on CdSb, In<sub>4</sub>Se<sub>3</sub>, In<sub>4</sub>Te<sub>3</sub>-epitaxial barrier structures [Text] / B. M. Gritsyuk, O. V. Galochkin, A. I. Rarenko, V. N. Strebezhev // Proceedings of the SPIE. – 2003. – V.5065. – P. 139-145.
7. Vorobets, G. I. Laser manipulation of clusters, structural defects and nanoaggregates in barrier structures on silicon and binary semiconductors [Text] / G. I. Vorobets, O. I. Vorobets, V. N. Strebegev // Applied Surface Science. – 2005. – V.247. – P.590-601.
8. Losovyj, Ya. B. The anisotropic band structure of layered In<sub>4</sub>Se<sub>3</sub> (001) [Text] / Ya. B. Losovyj, L. Makinistian, E. A. Albanesi, A. G. Petukhov, Jing Liu, P. Galiy, O. R. Dveriy, P. A. Dowben // Journal of applied physics. – 2008. – V.104. – P. 083713-1-083713-7.
9. Makinistian, L. Ab initio calculations and ellipsometry measurements of the optical properties of the layered semiconductor In<sub>4</sub>Se<sub>3</sub> [Text] / L. Makinistian, E. A. Albanesi, N. V. Gonzalez Lemus, A. G. Petukhov, D. Schmidt, E. Schubert, Ya. B. Losovyj, P. Galiy, P. A. Dowben // Phys.Rev.B. – 2010. – V.81, №7. – P. 075217-1–075217-8.
10. Benramdane, N., Misho, R. H. Structural and optical properties of In<sub>4</sub>Se<sub>3</sub> thin films obtained by flash evaporation [Text] / N. Benramdane, R. H. Misho // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 1995. – V.37, N3-4. – P. 367-377.
11. Xingfu, Li. Anisotropic optical and thermoelectric properties of In<sub>4</sub>Se<sub>3</sub> and In<sub>4</sub>Te<sub>3</sub> [Text] / Li Xingfu, Xu Bin, Yu Gongqi, Li Xue, Yi Lin // Journal of applied physics. – 2013. – V.113. – P. 203502.

*На основі теорії викидів випадкових процесів запропоновано метод прогнозування параметричної надійності РЕА. В статті наведено аналітичні і графічні залежності для визначення параметрів випадкового процесу зміни визначального параметра РЕА: кількості викидів, середньої тривалості одного викиду та загальної тривалості викидів. Запропонований метод дозволяє врахувати мерехтливі відмови та спрогнозувати надійність для стаціонарних і нестаціонарних процесів*

*Ключові слова: викиди, мерехтливі відмови, надійність, прогнозування надійності, теорія викидів*

*На основе теории выбросов случайных процессов предложен метод прогнозирования параметрической надежности РЭА. В статье приведены аналитические и графические зависимости для определения параметров случайного процесса изменения определяющего параметра РЭА: количества выбросов, средней продолжительности одного выброса и общей продолжительности выбросов. Предложенный метод позволяет учесть перемежающиеся отказы и спрогнозировать надежность для стационарных и нестационарных процессов*

*Ключевые слова: выбросы, перемежающиеся отказы, надежность, прогнозирование надежности, теория выбросов*

УДК 621.396

# ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ МЕРЕХТЛИВИХ ВІДМОВ ПОБУДОВАНОВОГО НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ВИКИДІВ

Л. А. Недоступ

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: lnedostup@polynet.lviv.ua

М. Д. Кіселичник

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: mkiselychnyk@polynet.lviv.ua

П. М. Заярнюк

Аспірант\*

E-mail: zayarnyukpm@gmail.com

\*Кафедра теоретичної радіотехніки

та радіовимірювань

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. Ст. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

## 1. Вступ

Одним з видів відмов РЕА є мерехтливі відмови. Такі відмови складно прогнозувати, оскільки вони за своєю сутністю характеризуються випадковою природою і можуть бути ергодичними і неерго-

дичними, стаціонарними у широкому або вузькому розумінні. Мерехтливі відмови суттєво впливають на параметричну надійність пристрою у випадку стаціонарних процесів дрейфів параметрів РЕА, в яких відбуваються виходи випадкового процесу за допусковий рівень та наступного повернення в допустимі межі.