

DOI: 10.18372/2310-5461.42.13759

УДК: 623.6-523.8:6234.017

В. В. Костановський, канд. техн. наук
ДП «НДІ «Квант»
orcid.org/0000-0002-3766-4455
e-mail: valerijj-Kostanovskijj@rambler.ru

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ АФАР РЛС ВІД ТЕМПЕРАТУРИ АКТИВНОЇ ЗОНИ КРИСТАЛА GaN ТРАНЗИСТОРІВ

Вступ

На сьогодні широкого поширення набули радіолокаційні станції (РЛС) з активними фазованими антенними решітками (АФАР). Створення надійних РЛС з АФАР є довгостроковою метою і пріоритетним завданням військово-технічної політики провідних держав світу.

Основним масовим елементом АФАР є приймально-передавальний модуль (ППМ). Приймально-передавальний модуль — це основа просторового каналу обробки сигналу в АФАР. У його склад входить активний елемент — твердотільний НВЧ підсилювач потужності на погоджених транзисторних палетах. У процесі випромінювання транзисторні палети випромінюють велику кількість тепла, перегріваються і відмовляють. Для забезпечення безвідмовної роботи твердотільних НВЧ підсилювачів потужності необхідно зниження температури активної зони кристалів НВЧ мікромодулів до прийняттого значення. Зниження температури робочої зони кристалів НВЧ транзисторів в АФАР забезпечується застосуванням системи рідинного охолодження (СРО).

Тому значний інтерес представляє дослідження залежності надійності АФАР від температури активної зони кристалів НВЧ транзисторів. Це дозволить розробникам АФАР визначити оптимальну температуру робочої зони кристала НВЧ транзисторів, розробити вимоги до системи рідинного охолодження і оцінити її вартість.

Постановка проблеми

З огляду на те, що показники надійності разом з характеристиками ефективності є основними характеристиками проектованої АФАР, актуальною і важливою проблемою є **дослідження залежностей показників надійності АФАР РЛС від температури робочої зони кристала НВЧ транзисторів приймально-передавальних модулів**. Ця проблема повинна вирішуватися разом з проблемою комплексної

оцінки показників ефективності АФАР в процесі проектування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для оцінки впливу температури робочої зони кристала на інтенсивність відмов НВЧ транзисторів використовується закон Арреніуса [1, с.18]. Під час проектування радіоелектронної апаратури використовуються імовірнісні моделі раптових відмов радіоелементів і модулів (експоненціальний розподіл відмов) та імовірнісно-фізичні моделі поступових відмов радіоелементів і модулів (дифузійний немонотонний розподіл відмов) [2, с. 467].

У таблиці представлені аналітичні залежності показників надійності транзисторів і модулів для закону Арреніуса, експоненційного закону розподілу раптових відмов і дифузійного немонотонного закону розподілу поступових відмов.

Математичні моделі надійності однорівневої і дворівневої АФАР РЛС розроблені автором і представлені в роботах [3 с. 144], [4 с. 22–24], [5 с. 31–36]. Однак ці моделі надійності не враховують температуру робочої зони кристала НВЧ транзисторів.

Як НВЧ мікромодулі під час розробки та виготовлення приймально-передавального модуля широко використовувалися мікросхеми і транзистори, виконані по GaAs (арсенід-галієвій) технології [6 с. 58].

Однак в останні роки (починаючи з 2000 р.) розробники під час проектування ППМ стали широко застосовувати транзистори і мікросхеми, виконані з використанням GaN технологій [7 с. 25].

Транзистори на нітриді галію, створені вперше в 1993 р., істотно розширили можливості приладів НВЧ-діапазону.

Ці прилади здатні працювати в значно ширшому діапазоні частот і за більш високих температур, а також з більшою вихідною потужністю в порівнянні з приладами на кремнії, арсеніді галію, карбіді кремнію.

Таблиця

Моделі відмов НВЧ транзисторів і приймально-передавальних модулів

| Найменування математичної моделі | Назва показників надійності |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Модель (крива) Арреніуса-модель залежності інтенсивності відмов НВЧ транзистора (мікромодуля) від температури активної зони кристала</p> | <p>Інтенсивність раптових відмов транзистора (мікромодуля):</p> $\lambda_{GaN} = \lambda_{GaN_ref} \pi_T, \quad (1)$ <p>де λ_{GaN_ref} — інтенсивність відмов GaN транзистора (мікромодуля) за номінальною температурою активної зони кристала; π_T — температурний коефіцієнт інтенсивності відмов транзистора</p> $\pi_T = \exp \left[\frac{E_a}{k_0} \left(\frac{1}{\Theta_{op} + 273} - \frac{1}{\Theta_{ref.} + 273} \right) \right]. \quad (2)$ |
| <p>Моделі відмов НВЧ мікромодулів та транзисторів</p> | |
| <p>Експоненціальний розподіл — для раптових відмов</p> | <p>Середній наробіток до відмови приймально-передавального модуля:</p> $T_0 = \frac{1}{\pi_T \sum_{i=0}^N n_i \lambda_i}, \quad (3)$ <p>де n_i, λ_i — кількість та інтенсивність відмов i-го НВЧ транзистора (мікромодуля). Імовірність безвідмовної роботи приймально-передавального модуля:</p> $P_{RAD.CHAN.}(t) = \exp(-\lambda_{RAD.CHAN.}t). \quad (4)$ |
| <p>Дифузійний немонотонний розподіл - для поступових відмов</p> | <p>Середній наробіток до відмови транзистора (мікромодуля) — T_0_MOD. визначається з рішення трансцендентного рівняння:</p> $\lambda_{MOD_DNR}(t_{M.O.T.}) = \frac{\frac{\sqrt{T_0_MOD}}{t_{M.O.T.} \sqrt{2\pi t_{M.O.T.}}} \exp \left[-\frac{(t_{M.O.T.} - T_0_MOD)^2}{2t_{M.O.T.} T_0_MOD} \right]}{\left[\Phi \left(\frac{T_0_MOD - t_{M.O.T.}}{\sqrt{t_{M.O.T.} T_0_MOD}} \right) - \exp(2) \Phi \left(-\frac{T_0_MOD + t_{M.O.T.}}{\sqrt{t_{M.O.T.} T_0_MOD}} \right) \right]}. \quad (5)$ <p>Середній наробіток на відмову приймально-передавального модуля:</p> $T_0 = \frac{1}{\pi_T \sum_{i=0}^N \frac{n_i}{T_{0i}}}, \quad (6)$ <p>де n_i, T_{0i} — кількість і середній наробіток до відмови i-го НВЧ мікромодуля (транзистору). Імовірність безвідмовної роботи приймально-передавального модуля:</p> $P_{MOD.}(t) = \Phi \left(\frac{T_0_MOD. - t}{\sqrt{T_0_MOD.}t} \right) - \exp(2) \Phi \left(-\frac{T_0_MOD. + t}{\sqrt{T_0_MOD.}t} \right). \quad (7)$ |
| <p>Композиція експоненціального та дифузійного немонотонного розподілів – під час спільного прояву раптових і поступових відмов</p> | <p>Інтенсивність відмов транзистору (мікромодуля) визначається з рішення трансцендентного рівняння:</p> $\lambda_{E*DN}(t) = \lambda_{РАПТ.ВІДМ.} + \frac{\frac{\sqrt{T_0_DN}}{vt \sqrt{2\pi t}} \exp \left[-\frac{(t - T_0_DN)^2}{2v^2 T_0_DN t} \right]}{\left[\Phi \left(\frac{T_0_DN - t}{v \sqrt{T_0_DN}t} \right) - \exp \left(\frac{2}{v^2} \right) \Phi \left(-\frac{T_0_DN + t}{v \sqrt{T_0_DN}t} \right) \right]}. \quad (8)$ |

Середній наробіток до відмови ППМ визначається за формулою:

$$T_0 = \frac{1}{\pi_T \sum_{i=0}^N n_i \lambda_{iE} * DN}, \quad (9)$$

де $\lambda_{MOD_DNR}(t)$ — інтенсивність відмов транзистора (мікромодуля);
 $t_{M.O.T}$ — час, відповідний мінімальному наробітку транзистора (мікромодуля).

Імовірність безвідмовної роботи ППМ визначається за формулою

$$P_{MOD_ER*DNR}(t) = EXP\left(-\frac{t}{T_{0_MOD_ER}}\right) \left\{ \Phi\left[\frac{T_{0_MOD_DNR} - t}{\sqrt{T_{0_MOD_DNR}t}}\right] - EXP(2) \Phi\left[-\frac{T_{0_MOD_DNR} + t}{\sqrt{T_{0_MOD_DNR}t}}\right] \right\} \quad (10)$$

Порівняно із GaAs монолітними інтегральними схемами, що випускаються серійно нові виробни на основі GaN-транзисторів у 2–10 разів мають більшу вихідну потужність та порівняний або більший коефіцієнт корисної дії за однаковими або меншими розмірами кристалів транзисторів.

Дослідження тимчасової стабільності параметрів і надійності GaN транзисторів, що проводилися інтенсивно при відпрацюванні промислових технологій, привели до досягнення

прийнятних показників надійності для серійних приладів. На рис. 1 наведена крива Арреніуса для потужних GaN-транзисторів на кремнієвій підкладці фірми Nitronex [8 с. 73].

Показано, що при температурі активної зони кристала 200°C і енергії активації $E_a = 1,6$ середній час наробітку до відмови перевищує $1,07 \times 10^6$ годин. Швидке (протягом декількох годин) руйнування виникає в сучасних GaN-транзисторах при температурах активної зони 320 °C – 350 °C.

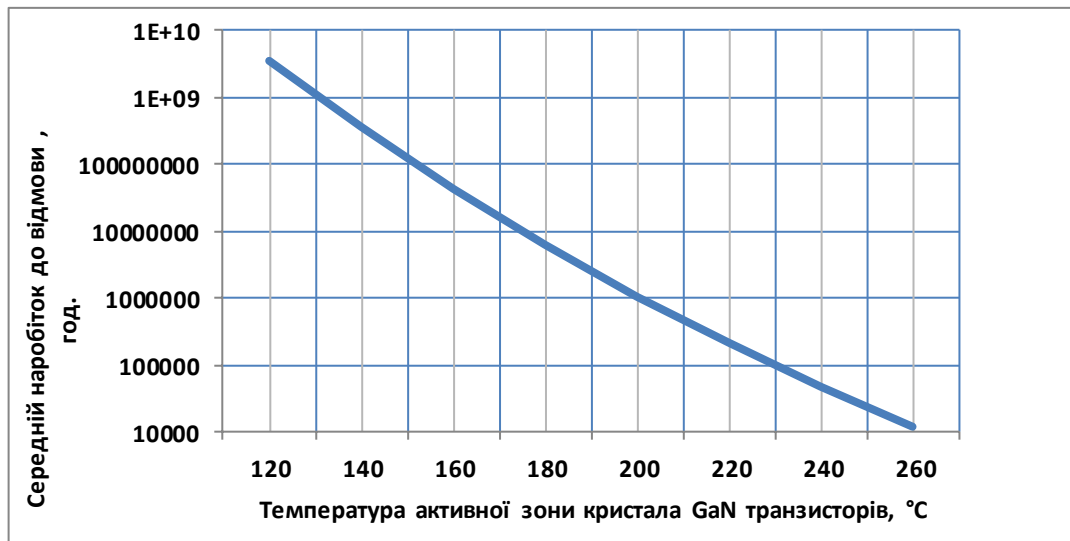


Рис. 1. Графік залежності середнього наробітку до відмови GaN мікромодулів від температури активної зони кристала транзисторів

Мета (постановка завдання)

З огляду на перспективи широкого використання GaN технології для нових РЛС з АФАР доцільно дослідити вплив температури активної зони кристала GaN транзисторів на показники надійності ППМ, підрешіток і АФАР в цілому. За цим треба розглянути випадки прояву раптових відмов, поступових відмов і спільне прояв раптових і поступових відмов випромінюючих приймально-передавальних модулів.

Тому метою даної роботи є побудова та дослідження аналітичних залежностей показників надійності АФАР від температури активної зони кристала GaN транзисторів випромінюючих приймально-передавальних модулів.

Побудова аналітичних залежностей показників надійності АФАР від температури активної зони кристала GaN транзисторів.

У аналітичних виразах (8, 9, 11) представлені формули для обчислення середніх наробітків до відмови, під час рекомендованої (оптимальної)

робочої температури активної зони кристала GaN мікромодулів $\Theta_{REF} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$:

– інтенсивність відмов випромінюючого приймально-передавального модуля

$$\lambda_{RAD.CHAN.ref} = \sum_{j=1}^k l_j \lambda_{j_GaN.ref}, \quad (11)$$

де k – кількість НВЧ транзисторів та мікросхем у випромінюючому приймально-передавальному модулі; λ_{j_GaN} — інтенсивність відмов j -го GaN транзистора (мікросхеми);

– середній наробіток до відмови випромінюючого приймально-передавального модуля

$$T_{0_RAD.CHAN.ref} = \frac{1}{\lambda_{RAD.CHAN.ref}}; \quad (12)$$

– середній наробіток до відмови підрешітки АФАР

$$T_{0_APAR.ref} = T_{0_RAD.CHAN.ref} \left[\ln \left(\frac{1}{1 - 0,5 C_{RED.TRANS.}} \right) \right] \quad (13)$$

– імовірність безвідмовної роботи підрешітки АФАР

$$P_{APAR}(t) = \sum_{i=0}^{m_{RAD.CHAN.}} C_{G_0}^i [P_{RAD.CHAN.}(t)]^{G_0-i} [Q_{RAD.CHAN.}(t)]^i; \quad (14)$$

– середній наробіток до відмови передавальної АФАР у цілому

$$T_{0_APAR.ref} = T_{0_APAR.ref} \left[\ln \left(\frac{1}{1 - 0,5 C_{RED.TRANS.}} \right) \right]; \quad (15)$$

– імовірність безвідмовної роботи АФАР у цілому

$$P_{APAR}(t) = \sum_{i=0}^{m_{APAR}} C_{S_0}^i [P_{APAR}(t)]^{S_0-i} [1 - P_{APAR}(t)]^i; \quad (16)$$

Аналитичні залежності середнього наробітку до відмови (MTTF) для ППМ, підрешітки та АФАР у цілому від робочої температури активної зони кристала GaN мікромодулів мають такий вигляд:

– середній час наробітку до відмови випромінюючого приймально-передавального модуля

$$T_{0_RAD.CHAN.} = \frac{T_{0_RAD.CHAN.ref.}}{\pi_{T_GaN}}; \quad (17)$$

– середній час наробітку до відмови підрешітки

$$T_{0_APAR} = \frac{T_{0_APAR.ref.}}{\pi_{T_GaN}}; \quad (18)$$

– середній час наробітку до відмови АФАР у цілому

$$T_{0_APAR} = \frac{T_{0_APAR.ref.}}{\pi_{T_GaN}}. \quad (19)$$

Залежність імовірності безвідмовної роботи приймально-передавального модуля, антеною підрешітки та АФАР у цілому від температури робочої зони кристала СВЧ транзисторів визначаються за формулами (3), (6), (9), (14), (16), де в якості вихідних даних будуть використовуватися відповідні інтенсивності відмов СВЧ транзисторів.

Дослідження показників безвідмовності АФАР РЛС при зміні температури активної зони кристала GaN транзисторів

Розглянемо розрахунок середнього наробітку до відмови одного з варіантів структури АФАР (див. [5 с. 35]).

Будуть досліджуватися показники надійності одної із можливих реалізацій АФАР перспективної багатофункціональної РЛС, з такими параметрами структури:

$s = 100$ — число підрешіток в АФАР;

$g = 80$ — число випромінюючих приймально-передавальних каналів (ППК) у підрешітки АФАР;

$k = 16$ — число випромінюючих антенних приймально-передавальних модулів (АППМ) у підрешітки АФАР;

$d = 5$ — число ППК у АППМ;

$s \times k = 1600$ — загальне число АППМ в АФАР;

$s \times g = 8000$ — загальне число випромінюючих каналів;

$C_{RED.TRANS.} = C_{RED.REC.} = C_{RED.} = 0,10$ – коефіцієнти надмірності передавальної та приймальної АФАР.

Використовуючи формули (4)–(12), були визначені залежності показників надійності випромінюючих приймально-передавальних каналів ППМ, антена підрешітки і АФАР у цілому для різних значень температури активної зони кристала GaN транзисторів під час раптових відмов.

На рис. 2 представлені графіки середнього наробітку до відмови випромінюючого каналу ППМ, антена підрешітки і АФАР у цілому під час раптових відмов.

На рис. 3. представлені графіки ймовірностей безвідмовної роботи АФАР за різними значеннями температури активної зони кристала GaN транзисторів.

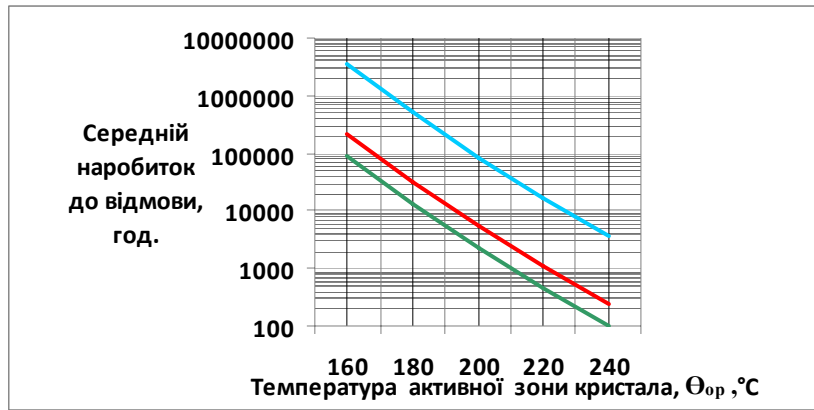


Рис. 2. Графіки залежності середнього наробітку до відмови випромінюючого каналу ППМ ($T_{0_RAD.TRANS}$ — крива синього кольору); підрешітки АФАР (T_{0_APAR} — крива червоного кольору) та АФАР у цілому (T_{0_APAR} — крива зеленого кольору) від температури активної зони кристала GaN транзисторів (θ_{1OP} °C)

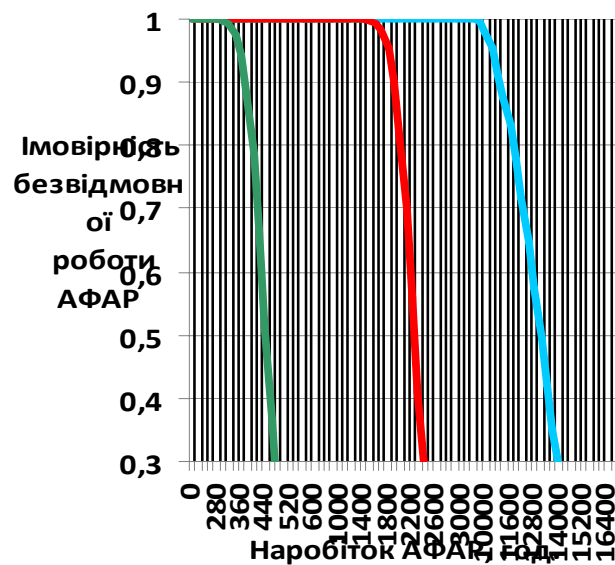


Рис. 3. Графіки імовірності безвідмовної роботи АФАР залежно від наробітку за різними значеннями температури активної зони кристала GaN транзисторів: 180 °C — крива синього кольору; 200°C — крива червоного кольору; 220°C — крива зеленого кольору

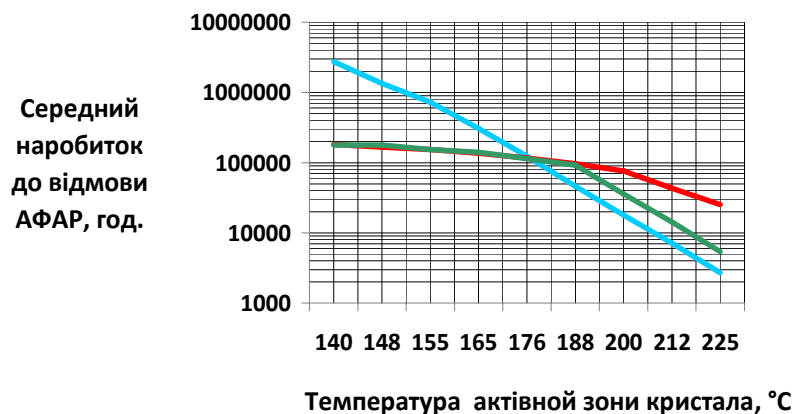


Рис. 4. Графіки залежності середнього наробітку до відмови АФАР (T_{0_APAR}) від температури активної зони кристала GaN мікромодулів (θ_{1OP} °C) (логічна шкала): під час раптових відмов випромінюючого модуля — лінія синього кольору; за поступових відмов лінія червоного кольору; при спільному прояві раптових і поступових відмов — лінія зеленого кольору

Обговорення отриманих результатів

1. Середній наробіток до відмови випромінюючого ППМ, підрешітки та АФАР у цілому є функцією температурного коефіцієнта моделі надійності GaN транзисторів — формули (17)–(19). Аналітичні залежності середнього наробітку до відмови для випромінювальних приймально-передавальних модулів, антени підрешітки і АФАР в цілому від температури активної зони кристала GaN транзисторів є лінійними (на логарифмічною шкалою).

2. Імовірність безвідмовної роботи АФАР з підвищенням температури активної зони кристала транзистора зменшується (див. рис. 3)

3. Діапазон зміни середнього наробітку до відмови АФАР від температури робочої зони кристала змінюється в залежності від типів відмов НВЧ транзисторів:

– найбільший діапазон характерний для раптових відмов (експоненціальний розподіл відмов);

– найменший діапазон характерний для поступових відмов (дифузійний немонотонний розподіл відмов);

– проміжне положення (ближче до кривої для поступових відмов) займає графік при спільному впливі раптових і поступових відмов (композиція експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів).

Висновки

1. Графіки середнього наробітку до відмови дозволяють визначити вимоги до системи охолодження АФАР та оцінити прогнозовану вартість випромінюючих ППМ і АФАР в цілому при різних температурах активної зони кристала GaN мікромодулів.

2. Прогнозування показників надійності АФАР для різних температур активної зони кристала GaN мікромодулів дозволяє на стадії проектування вибрати найбільш прийнятні варіанти структури АФАР і кількість випромінюючих приймально-передавальних модулів для забезпечення необхідних показників ефективності РЛС з АФАР.

3. Оцінка показників надійності АФАР для різних значень температури активної зони кристала GaN мікромодулів випромінюючих

приймально-передавальних модулів дозволяють вибрати оптимальну структуру і параметри РЛС з АФАР.

ЛІТЕРАТУРА

1. **IEC 61709**. Electrical components – Reliability – Reference conditions for failure rates and stress models for conversion: Edition 2/0 2011-06, International Electrotechnical Commission: PRICE CODE XD - ICS 31.020 – ISBN 978-28892-551-7-page 18.

2. **Костановський В. В., Козачук О. Д.** Метод ідентифікації параметрів універсальної моделі відмов, яка апроксимує узагальнену криву інтенсивності відмов електронної техніки. *Наукоємні технології*. 2018. Т. 40. №4. С. 465–471. DOI: 10.18372 / 2310-5461.40.13273.

3. **Костановський В. В.** Математичні моделі надійності типових апертур фазованих антенних решіток, які враховують раптові та поступові відмови модулів надвисоких частот. *Математичні машини і системи*. 2014. № 2. С. 142–150.

4. **Kostanovsky V., Kozachuk O., Rusniak I.** Development of the algorithm of reliability-centered maintenance of phased array antennas. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1/9. No. 91. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.123430.

5. **Kostanovsky V., Machalin I., Kozachuk O., Terentyeva I.** Construction of a generalized probabilistic-physical model of reliability of a two-level active phased antenna array. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2/14. No. 96. DOI: 10.15587/1729.

6. **Павлов С., Филиппов А.** Антенные фазированные решетки. Обзор компонентной базы для реализации приемо-передающих модулей. *Компоненты и технологии*. 2014. № 7. С. 57–62.

7. **Данилин В., Жукова Т., Кузнецов Ю., Тараканов С., Уваров Н.** Транзистор на GaN самый «крепкий орешек». *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2005. №4. С. 20–29.

8. **Fumikazu Yamaki, Hiroaki Deguchi, Norihiko Ui, Kaname Ebihara, Hitoshi Haematsu, Masahiro Nishi, Atsushi Nitta, Kazutaka Inoue and Seigo Sano.** Development of High Reliability GaN HEMT for Cellular Base Stations. *Sei Technical Review*. 2013. No. 76. pp. 69–73.

Костановський В. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ АФАР РЛС ВІД ТЕМПЕРАТУРИ АКТИВНОЇ ЗОНИ КРИСТАЛА GaN ТРАНЗИСТОРІВ

У статті досліджується вплив температури активної зони кристала НВЧ транзисторів приймально-передавальних модулів активних фазованих антенних решіток (АФАР) на показники надійності. Надійність є однією з основних характеристик ефективності РЛС з АФАР, тому пропонується тема дослідження є важливою і актуальною.

В роботі проведено аналіз математичних моделей відмов та впливу температури робочої зони кристала на інтенсивності відмов СВЧ транзисторів і мікромодулів. Розглянуто модель Арреніуса для визначення коефіцієнта температурної залежності робочої зони кристала НВЧ транзисторів, виконаних по GaN технології. Представлені моделі раптових і поступових відмов НВЧ транзисторів і мікромодулів. Показані формули для прогностичної оцінки інтенсивностей відмов НВЧ транзисторів і мікромодулів: при раптових відмовах (експоненціальне розподіл); при поступових відмовах (немонотонний дифузійний розподіл); при спільному прояві раптових і поступових відмов (композиція експоненціального і дифузійного немонотонного розподілів).

На підставі робіт, виконаних раніше автором, розглянуті моделі і представлені формули для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи і середнього наробітку до відмови приймально-передавального модуля, антенною підрешітки і АФАР в цілому.

Використовуючи зазначені вище математичні моделі, досліджено зміну показників надійності дворівневої АФАР перспективної РЛС при різних значеннях температури робочої зони кристала НВЧ транзисторів передавальних каналів приймально-передавальних модулів. Побудовано графіки зміни середнього наробітку до відмови і ймовірності безвідмовної роботи залежно від температури робочої зони кристала НВЧ транзисторів при різних типах відмов: раптових, поступових і суміші раптових і поступових відмов. Досліджено поведінку середнього наробітку до відмови і ймовірності безвідмовної роботи АФАР від температури робочої зони кристала НВЧ транзисторів. Показано, що при логарифмічною шкалою для середньої наробітку до відмови всі моделі і, відповідно, графіки є лінійними функціями.

Отримані в статті результати можуть бути корисні розробникам перспективних РЛС з АФАР при проектуванні систем рідинного охолодження, правильному виборі параметрів НВЧ транзисторів в приймально-передавальних модулях і структури антенною решітки РЛС.

Ключові слова: робоча зона кристала; СВЧ транзистори та мікромодулі; інтенсивність відмов; фазована антенна решітка; середній наробіток до відмови.

Kostanovskiy V.

RESEARCH OF DEPENDENCES OF RELIABILITY INDICATORS OF APAR ON THE CORE TEMPERATURE OF A GAN CRYSTAL TRANSISTORS

The article examines the effect of the core temperature of a crystal of the microwave transistors of the receiving-transmitting modules of active phased antenna arrays (APAR) on the reliability indices. Reliability is one of the main characteristics of the effectiveness of radar with APAR, so the proposed research topic is important and relevant.

The paper analyzes mathematical models of failures and the effect of the temperature of the crystal working area on the failure rates of microwave transistors and micro-modules. An Arrhenius model is considered to determine the coefficient of temperature dependence of the working zone of a crystal of microwave transistors made by GaN technology. Models of sudden and gradual failures of microwave transistors and micro-modules are presented. Formulas are shown for the predictive estimate of the failure rates of microwave transistors and micro-modules:

- in case of sudden failures (exponential distribution);*
- with gradual failures (non-monotonic diffusion distribution);*
- in case of joint manifestation of sudden and gradual failures (composition of exponential and diffusion non-monotonic distributions).*

On the basis of the work performed earlier by the author, the models are considered and formulas are presented for calculating the probability of failure-free operation and the mean time to failure of the receiving-transmitting module, the antenna sub-lattice, and APAR as a whole.

Using the above mathematical models, we studied the change in the reliability indicators of a two-level APAR of a promising radar at various temperatures of the working zone of the crystal of the microwave transistors of the transmitting channels of the receiving and transmitting modules. Graphs of the change of the mean time to failure and the probability of failure-free operation are plotted, depending on the temperature of the working zone of the microwave transistor crystal with different types of failures: sudden, gradual, and a mixture of sudden and gradual failures. The behavior of the mean time to failure and the probability of failure-free operation of APAR from the temperature of the working zone of the microwave transistor is investigated. It is shown that with a logarithmic scale for mean time to failure all models and, accordingly, graphs are linear functions.

The results obtained in the article can be useful to developers of promising radars with APAR in the design of liquid cooling systems, the correct choice of the parameters of microwave transistors in the receiving and transmitting modules and the structure of the APAR antenna array.

Keywords: crystal working area; microwave transistors and micromodules; failure rate; phased antenna array; mean time to failure.

Костановский В. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ АФАР ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ АКТИВНОЙ ЗОНЫ КРИСТАЛЛА GAN ТРАНЗИСТОРОВ

В статье исследуется влияние температуры активной зоны кристалла СВЧ транзисторов приемо-передающих модулей активных фазированных антенных решеток (АФАР) на показатели надежности. Надежность является одной из основных характеристик эффективности РЛС с АФАР, поэтому предлагаемая тема исследования является важной и актуальной.

В работе проведен анализ математических моделей отказов и влияния температуры рабочей зоны кристалла на интенсивности отказов СВЧ транзисторов и микромодулей. Рассмотрена модель Аррениуса для определения коэффициента температурной зависимости рабочей зоны кристалла СВЧ транзисторов, выполненных по GaN технологии. Представлены модели внезапных и постепенных отказов СВЧ транзисторов и микромодулей. Показаны формулы для прогнозной оценки интенсивностей отказов СВЧ транзисторов и микромодулей:

- при внезапных отказах (экспоненциальное распределение);*
- при постепенных отказах (немонотонное диффузионное распределение);*
- при совместном проявлении внезапных и постепенных отказов (композиция экспоненциального и диффузионного немонотонного распределений).*

На основании работ, выполненных ранее автором, рассмотрены модели и представлены формулы для расчета вероятности безотказной работы и средней наработки до отказа приемо-передающего модуля, антенной подрешетки и АФАР в целом.

Используя указанные выше математические модели, исследовано изменение показателей надежности двухуровневой АФАР перспективной РЛС при различных значениях температуры рабочей зоны кристалла СВЧ транзисторов передающих каналов приемо-передающих модулей. Построены графики изменения средней наработки до отказа и вероятности безотказной работы в зависимости от температуры рабочей зоны кристалла СВЧ транзисторов при различных типах отказов: внезапных, постепенных и смеси внезапных и постепенных отказов. Исследовано поведение средней наработки до отказа и вероятности безотказной работы АФАР от температуры рабочей зоны кристалла СВЧ транзисторов. Показано, что при логарифмической шкале для средней наработки до отказа все модели и, соответственно, графики являются линейными функциями.

Полученные в статье результаты могут быть полезны разработчикам перспективных РЛС с АФАР при проектировании систем жидкостного охлаждения, правильном выборе параметров СВЧ транзисторов в приемо-передающих модулях и структуры антенной решетки АФАР.

Ключевые слова: рабочая зона кристалла; СВЧ транзисторы и микромодули; интенсивность отказов; фазированная антенная решетка; средняя наработка до отказа.

Стаття надійшла до редакції 11.04.2019 р.

Прийнято до друку 07.06.2019 р.