

<https://doi.org/10.15407/knit2021.03.013>
УДК 623.1/7

Ю. М. ЛАВРИЧ¹, провід. наук. співроб., канд. техн. наук
E-mail: lavrich@westa-inter.com
С. В. ПЛАКСІН¹, старш. наук. співроб., д-р фіз.-мат. наук
Л. М. ПОГОРІЛА¹, мол. наук. співроб.
М. І. БИСТРОВ², Головний конструктор, директор

¹Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України
вул. Писаржевського 5, Дніпро, Україна, 49005

²АТ КБ «Дніпровське»
вул. Будівельників 34, Дніпро, Україна, 49089

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ПРИКЛАДНОЇ НАДІЙНОСТІ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ КОНТРОЛЮ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ

Актуальність. Радіолокаційні станції контролю космічного простору виконують дуже відповідальні функції, тому вони повинні бути надійними, і забезпечення надійності є однією з ключових вимог на всіх стадіях їхнього життєвого циклу.

Мета. Метою статті є аналіз деяких аспектів забезпечення надійності, зумовлених особливостями процесу розробки і виготовлення радіолокаційних станцій контролю космічного простору, обґрунтування можливості використання досвіду вітчизняного розробника при вирішенні задач надійності в нових зразках.

Метод. У роботі використано порівняльний аналіз методів розробки, виготовлення і випробувань складних технічних систем, чинних стандартів і стандарту Головного конструктора.

Результати. Наведено деякі характерні риси радіолокаційних станцій контролю космічного простору — унікальність, виробництво в одному екземплярі, мала повторюваність і велика номенклатура, неможливість виготовлення і випробувань функціонально закінчених систем безпосередньо в умовах виробника. Розглянуто ряд особливостей проектування і виготовлення за стандартом Головного конструктора, відсутніх у чинних стандартах, обґрунтовано необхідність розробки нових нормативних документів, які враховують особливості проектування та виготовлення радіолокаційних станцій контролю космічного простору. З прикладної точки зору наведено ряд конкретних науково-практичних рішень забезпечення надійності радіолокаційних станцій контролю космічного простору вітчизняного розробника для використання у подальших розробках. Встановлено, що кількість термінів у сучасній теорії надійності не мають прикладної спрямованості і не дозволяють підвищити точність класифікації стану об'єкта. Показано, що створення нових поколінь радіолокаційних станцій контролю космічного простору супроводжується появою нових, невідомих науці науково-практичних завдань, вирішення яких пов'язане із застосуванням нових наукових ідей, власних розробок комплектувальних елементів. Показано, що застосування сучасної елементної бази при проектуванні радіолокаційних станцій контролю космічного простору створює складності забезпечення надійності ієрархічних рівнів, через те що випробування за наявними стандартами можливі лише для нижчих рівнів ієрархії. Встановлено, що наявні стандарти загальнотехнічних вимог і методів контролю та випробувань для виробів і радіолокаційних станцій не завжди ідентичні, тому, застосовуючи високонадійну елементну базу, неможливо забезпечити таку ж надійність радіолокаційних станцій. Очевидно, новий етап забезпечення надійності повинен бути пов'язаний з індивідуальною надійністю самих елементів. Обґрунтовано важливість наукової задачі, пов'язаної з вибором параметрів контролю сучасного покоління радіолокаційних станцій в умовах неможливості застосування традиційного контролю, що вимагає припинення цільового функціонування. Як параметр оцінки стану ви-

Цитування: Лаврич Ю. М., Плаксін С. В., Погоріла Л. М., Бистров М. І. Деякі особливості прикладної надійності радіолокаційних станцій контролю космічного простору. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 3 (130). С. 13—27. <https://doi.org/10.15407/knit2021.03.013>

робів запропоновано температуру як функцію часу. Запропоновано ряд способів забезпечення надійності нових поколінь радіолокаційних станцій контролю космічного простору, заснованих на використанні нових інформаційних сигналів, вбудованих в елементну базу моделей надійності для створення системи збору, накопичення та аналізу інформації — єдиної для всіх стадій життєвого циклу радіоелектронної апаратури.

Висновки. Врахування особливостей проектування і виготовлення радіолокаційних станцій контролю космічного простору і практичного досвіду вітчизняного розробника для вирішення проблем надійності дозволить забезпечити створення технології високонадійних поколінь радіолокаційних станцій контролю космічного простору і розроблення станцій «високої заводської готовності».

Ключові слова: радіолокаційні станції контролю космічного простору, прикладна надійність, елементна база, документація Головного конструктора, вбудована надійність.

ВСТУП

Надійність — це якість в часі, часовий аспект якості. Проблема забезпечення надійності перманентно гостро стоїть перед творцями практично будь-якого виробу, і немає галузі науки і техніки, де вона не була б однією з найактуальніших. Незважаючи на зусилля розробників, спрямовані на застосування нових конструктивно-схемних рішень, нової елементної бази, перспективних матеріалів і технологій, забезпечити належну якість і надійність сучасного покоління виробів не вдається.

У теорії надійності використовуються методи природничих і технічних наук, різних галузей науки і техніки, і така різноманітність застосувань для досліджень надійності технічних систем ставить під сумнів теорію надійності як самостійної науки [13]. Відомо, що більшість наук мають відмітні ознаки, в теорії надійності такими є характеристики надійності технічних систем, проте єдиної методології їхнього визначення немає. Особливо актуальним є забезпечення надійності для великих наукомістких технічних систем, до яких належать радіолокаційні станції контролю космічного простору (РЛС ККП).

Розрахунок надійності складних технічних систем часто базується на припущенні про те, що час безвідмовної роботи і час відновлення елементів мають експоненціальні розподіли ймовірностей [9]. Однак, незважаючи на всю простоту і універсальність, до складних технічних систем експоненціальний закон розподілу не застосовують, і використання його для аналізу надійності систем тривалого функціонування неправомірне [4].

Традиційно склалося деяке розділення в напрямках теорії і практики надійності механічних систем і електронної апаратури у складі виробів електронної техніки (ВЕТ) і електрорадіоелементів (ЕРЕ). Насправді будь-який функціонально закінчений пристрій (ФЗП) містить як механічні, так і електронні вузли та агрегати, що вносять відповідні вклади в ненадійність виробу в цілому, а окремий розгляд цих вкладів призводить до значної відмінності декларованих і реальних показників надійності.

В даний час відсутні не тільки інженерні методи, але і теоретичні розробки аналізу надійності технічних систем зі змінною структурою, зумовленою її багатофункціональністю. Наявні методи не забезпечують можливість розрахунку надійності сучасних систем з великою кількістю станів і складними зв'язками між ними [10].

Стійка тенденція створення РЛС ККП показує, що від зразка до зразка збільшуються тактико-технічні вимоги при одночасному зниженні термінів створення, але особливості проектування РЛС ККП унеможливають використання більшості відомих методів забезпечення надійності, а пошук нових шляхів забезпечення надійності таких систем залишається актуальною задачею.

Об'єктом дослідження є РЛС ККП — стаціонарний наземний комплекс радіотехнічної апаратури, розміщений у спеціальних інженерних спорудах площею понад 10^4 м². Незважаючи на сучасні фундаментальні принципи побудови РЛС ККП, проектування нових поколінь супроводжується появою нових невідомих раніше науково-практичних задач прикладної надійності. Значимість теми забезпечення прикладної на-

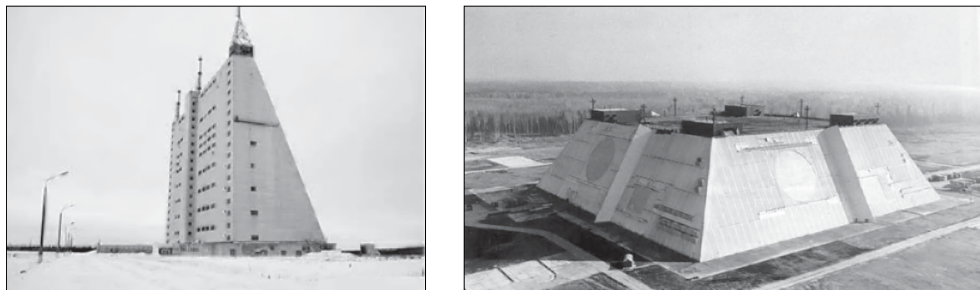


Рис. 1. Загальний вигляд радіолокаційних станцій контролю космічного простору

дійності зумовлена важливістю функцій, покладених на РЛС ККП, і пов'язана з пошуком нових рішень прикладного забезпечення надійності.

Створення нового зразка РЛС ККП — тривалий і дорогий процес, тому аналіз особливостей створення є актуальною науково-практичною задачею, при вирішенні якої доцільно провести аналіз та оцінку можливості застосування наявного науково-технічного доробку.

Мета роботи — обґрунтування можливих шляхів забезпечення прикладної надійності з урахуванням характерних особливостей РЛС ККП.

1. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Передбачається розглянути деякі аспекти забезпечення прикладної надійності з урахуванням особливостей розробки і виготовлення РЛС ККП на основі науково-технічного доробку вітчизняного розробника.

2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Питання, присвячені дослідженням таких станцій, якщо і висвітлюються, то лише в спеціальній літературі. Вони, як правило, недоступні широкому колу і найчастіше розглядаються з суто теоретичних позицій.

Аналізуються загальні питання впровадження новітніх розробок, використання поетапного підходу, застосування нової компонентної бази, підвищення живучості систем по відношенню до кінетичних, електромагнітних і кібернетичних впливів [11]. Розглядаються питання способів розробки, скорочення термінів і зниження вартості створення радіолокаційних станцій [3]. У роботі [1] розглядається можливість підвищення технічного ризику в умовах дослідного вироб-

ництва, хоча при виготовленні РЛС ККП немає серійного виробництва, як немає і ризиків, пов'язаних з виготовленням дослідного зразка, випуском «першої серії» і випробуваннями на стендах [5], у зв'язку з відсутністю серійності, а, отже, і першої серії, стенди ж призначені тільки для перевірки виробів на відповідність технічним умовам.

Задача постійного моніторингу ситуації в космічному просторі дуже актуальна, і з огляду на бурхливий розвиток ракетно-космічних технологій у багатьох країнах важливість цього завдання має стійку тенденцію до підвищення.

3. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Революційні зміни у проектуванні сучасної радіоелектронної апаратури (РЕА) із застосуванням мікроелектронних технологій виявили складність забезпечення надійності сучасної електронної складової ФЗП, особливо великих технічних систем. Незважаючи на масове виготовлення в наше індустріальне століття різних технічних виробів, сьогодні не рідкість створення унікальних, одиничних зразків — космічних апаратів, РЛС ККП та ін., яким притаманний ряд особливостей як проектування і виготовлення, так і оцінки надійності. Загальний вигляд РЛС ККП наведено на рис. 1.

Неминуче і розробник, і замовник кожного нового зразка стикалися з масою незвіданого, що породжувало нітрохи не меншу масу проблем, так що роботу доводилося починати при відсутності серйозних наукових напрацювань, часом при абсолютній відсутності інформації та експериментальних підтверджень рішень фундаментальних технічних і технологічних про-

блемних питань. Тобто ступінь невизначеності є неприпустимо високим, і сама проблема прийняття рішень в умовах сильної невизначеності та відсутності усталеного розуміння явищ, які супроводжують ту чи іншу подію, значною мірою носить імовірнісний характер. Цілком зрозуміло, що було б простіше знизити ступінь ризику за рахунок проведення допоміжних робіт з метою отримання об'єктивно необхідної інформації. Але це неминуче виливалося в додатковий чималий час, тому залишався лише шлях прийняття ризикованих рішень. У цьому сутнісна сторона ризику як неминучого фактора, що супроводжує процес розробки і створення РЛС ККП, і це в кінцевому підсумку визначає успіх або неуспіх розв'язання поставленого завдання. З цієї точки зору важко оцінити, чи буде виправданим ризик чи ні, але при проектуванні в таких умовах часто тільки так фахівці можуть (і змогли) випередити час і вибрати на інтуїтивному рівні єдино правильні рішення.

Розробка РЕА, як і будь-якої іншої техніки, включає ряд обов'язкових стадій, і тільки після їхнього проходження приймається рішення про серійне виготовлення виробу для експлуатації. Середній час розробки як вітчизняних, так і зарубіжних РЛС ККП становить 7–10 років. Тривалий термін проектування і набагато більший термін експлуатації РЛС ККП створюють проблеми забезпечення надійності на всіх етапах життєвого циклу. Розробка документації та виготовлення РЛС ККП здійснюються по комплекту документів Головного конструктора (КДГК) — виду, відсутньому в сучасних стандартах. При цьому, оминаючи всі стадії розробки, відразу створюється робоча «безлітерна» конструкторська документація, по якій виготовляється виріб, і це унеможливує застосування у повному обсязі вимог наявних стандартів надійності. Вибір такої моделі зумовлений потребою радикального скорочення термінів та істотного зменшення витрат на створення складних радіотехнічних комплексів. Разом з тим виготовлення техніки за такою моделлю несе певні ризики, тому виникає задача забезпечення надійності ФЗП в умовах відсутності стадій технічної пропозиції, ескізного і технічного проектування.

Стосовно до РЛС ККП необхідне уточнення і самого поняття надійності, яке часом відокремлюють від ефективності — одного з показників надійності. Термін «надійність» — збірний термін, який застосовується для опису властивості готовності та властивостей безвідмовності і ремонтпридатності, що впливають на неї, і використовується тільки для загального не кількісного опису властивостей. Хоча терміни надійності давно стандартизовано, але встановлені численні показники (безвідмовність і ремонтпридатність — більш ніж 7, довговічність і збереженість — понад 12 видів тощо) представляють труднощі в однозначному розумінні, виборі та оцінці надійності.

Незрозумілий взаємозв'язок між інтенсивністю відмов і інтенсивністю відновлення. Якщо перший показник характеризує ступінь надійності, то другий, очевидно, ступінь забезпечення відновлення? Але як при цьому оцінити РЛС ККП, яка безперервно функціонує і має в своєму складі ремонтно-перевірочну базу (РПБ) — міні-завод, оснащений необхідним технологічним обладнанням, ремонтною документацією та запасним інструментом і приладдям (ЗІП), який використовує результати автоматичного контролю і здійснює заміну непридатного виробу без припинення функціонування?

А яку інформацію містять терміни «стан нефункціонування», «тривалість нефункціонування», «непотрібний час» або «вільний стан» і «вільний час» та ін.? Даються визначення напрацювання до відмови та напрацювання між відмовами, незважаючи на те, що вони ідентичні! Узагальнюючи перераховане, можна сказати: термінів надмірно багато, але вони не мають прикладної спрямованості. Питання відпрацювання на надійність складних систем мають ряд особливостей, які виходять за рамки загально-технічної системи стандартів.

З огляду на спадкоємність ряду основних рис, характерних для наявних і новостворюваних РЛС ККП, доцільно здійснювати вибір показників надійності стосовно особливостей нового зразка в ході окремої науково-дослідницької роботи, в результаті якої встановлюються номенклатура і показники надійності, критерії відмов,

граничні стани, методи контролю надійності. Вітчизняна школа проектування входить у топову п'ятірку світових розробників РЛС ККП, але досі не може «легалізувати» стандарт роботи із КДГК.

Як правило, кожна нова РЛС ККП є новим поколінням радіоелектронної техніки з новою компонуальною базою, з новими технологічними рішеннями, що потребує вирішення завдань надійності в умовах недостатності апріорної інформації. Елементна база завжди є засобом підвищення надійності, і при всій своїй умовності лежить в основі класифікації поколінь виробів. Сьогодні її слід відносити до п'ятого покоління, оскільки в апаратурі вже використовуються надвеликі інтегральні мікросхеми (НВІС) системи на кристалі — СнК, SoC та ін., що містять в одному кристалі 10^6 і більше активних елементів, а самі РЛС ККП включають в себе до 10^5 компонентів.

Сучасна інтенсивність відмов характеризується FIT-одинацями, і при такому рівні надійності традиційні статистичні методи кількісної оцінки інтенсивності відмов новостворюваних ВЕТ неефективні, бо для отримання достовірних статистичних даних за прийнятний інтервал часу необхідно провести тривалий і трудомісткий експеримент на величезній кількості зразків.

Одиничність — характерна особливість РЛС ККП, при якій можливий обсяг вибірки не дозволяє отримати достовірну оцінку. Середнє напруження до відмови сучасних ВЕТ визначається стандартом MIL-STD-883, в основу якого покладено експоненціальну модель відмов, але, як відомо, використання експоненціального розподілу істотно завищує показники надійності елементної бази та виробів на їхній основі. Прикладна популярність експоненціального закону пояснюється не тільки можливостями його природної фізичної інтерпретації, але і простотою і зручністю його модельних властивостей. Потрібно зауважити, що в зарубіжній літературі з надійності РЕА регулярно виникають дискусії про правомірність коефіцієнтного методу прогнозування надійності [18].

Сучасна тенденція проектування РЕА військового призначення показує усталену тенденцію

прискореного морального старіння елементної бази порівняно із старінням зразків РЕА. Життєвий цикл цивільних ВЕТ становить близько 3 років (а у секторі бездротових комунікацій — всього 1.5 року), а для військових виробів він досягає 10...20 років [15], тоді як вітчизняна РЛС 5Н86 Дніпро (Hen House) функціонує вже більш ніж 40 років, AN/FPS-49 (США) знята з експлуатації після 40 років роботи. При такій тенденції на сьогоднішній день розробники ВЕТ і РЕА не можуть сподіватися на отримання достатнього обсягу статистики для визначення більш-менш певних характеристик надійності.

З метою скорочення обсягу випробувань для оцінки надійності ВЕТ проводять прискорені випробування, застосовуючи чинники, що прискорюють фізико-хімічні процеси старіння і деградації ВЕТ. Зв'язок між швидкістю цих процесів і температурою ВЕТ описується рівнянням Арреніуса. Виходячи з термодинамічних міркувань, швидкість хімічної реакції описується рівнянням

$$k = A \exp(-E_a / RT),$$

де множник A характеризує частоту зіткнень молекул, що реагують, E_a — енергія активації, T — температура, R — універсальна газова стала.

Довговічність механічних вузлів і деталей також залежить від температури:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right),$$

де γ — структурно-силова константа матеріалу, τ_0 — множник, U_0 — початкова енергія активації.

Є ряд стандартів для обчислення прискорювального фактора, які передбачають кількість температурних коефіцієнтів прискорення від 1 (NTT-procedure) до 25 для різних технологій виготовлення (стандарт MIL-HDBK 217). Все це призводить до того, що температурні коефіцієнти прискорення, обчислені за різними методиками для одного і того ж виробу, істотно відрізняються. Однак рівень надійності сучасних ВЕТ настільки високий, що навіть форсовані випробування на надійність при підвищеній температурі не дозволяють визначити показники надійності для конкретних типів виробів. Очевидно,

що прискорені випробування є технологічною операцією і призначені для «випалювання» ранніх відмов. Фахівці фірми Analog Devices вважають, що 1000-годинні випробування при температурі 125 °С еквівалентні 10 рокам експлуатації при температурі 55 °С. Але ж це гранична температура випробувань РЕА, а система забезпечення температурного режиму (СЗТР) забезпечує функціонування при нормальній температурі. Який ресурс буде гарантований при цьому? Як видно, методи проведення прискорених випробувань і перерахунку їхніх результатів на реальні умови експлуатації досі розроблено недостатньо. Форсовані (прискорені) випробування відсутні у складі всіх видів випробувань РЛС, і тільки у складі періодичних випробувань є випробування на вплив підвищених (знижених) температур, однак вони значно нижче форсованих.

Невирішеним залишається питання можливого подальшого застосування осередків і шаф, які пройшли такі випробування, в яких активовано процеси деградації і які стали джерелами ненадійності. В умовах обопільного ризику вони використовуються і надалі. Як при цьому визначити запас надійності і залишок ресурсу цих виробів.

Не можна не відзначити, що область застосування розроблених моделей надійності, методів і засобів контролю сучасної елементної бази обмежена в основному матеріалами (менше елементами), що використовуються у виробі, але всі ці методики практично неприйнятні для оцінки якості функціональних систем і РЛС в цілому. Наявні розробки в цій галузі носять характер скоріше теоретичних досліджень, ніж методів практичної оцінки надійності конструктивних рівнів РЛС.

Дані випробувань і реальної експлуатації є обов'язковою основою будь-яких достовірних розрахунків надійності, але вони виявляються розрізненими, зібраними в різних умовах, за різними планами випробувань. Користувачі звинувачують виробника, останні — розробника, а разом — користувачів, тому виникає задача, як коректно (в певному сенсі) об'єднати наявні на всіх стадіях життєвого циклу дані з метою отримання найбільш достовірних результатів.

Частка військових ВЕТ в загальному обсязі у світі впала з 35 % в 1955 р. до 0.6 % у 2020 р. [15], що змушує розробника РЕА використовувати ВЕТ комерційної комплектації, у переліку яких (та й військової) не завжди є потрібний виріб. Тому розробнику РЛС ККП доводиться паралельно з розробкою самої РЛС вести розробку відсутніх комплектних елементів. Серед елементів, що випускаються, зазвичай є дуже небагато заявлених в ТУ вхідних і вихідних параметрів, близько 10, а для забезпечення проектування необхідно як мінімум 25...30 (американські ТУ містили понад 30).

На відміну від віртуального проектування у сучасних системах автоматичного проектування (САПР) розробник РЛС ККП, використовуючи САПР власної розробки, здійснює реальне проектування реальних виробів при відсутності у бібліотеці віртуального, а тим більше реального елемента і реальне виготовлення при відсутності даних про реальний рівень його надійності.

При такому проектуванні найкращий варіант — це час очікування. Наприклад, виготовлені передавачі РЛС 5Н20 без амплітрона «Сервант» зберігалися більше шість місяців, чекаючи доукомплектування. Найгірший варіант, наприклад, коли вже встановлений в приймальний модуль РЛС 70М6 підсилювач не забезпечив потрібного посилення, що спричинило не тільки заміну підсилювача і зниження при цьому міцності золотих з'єднувачів, а й заміну корпусу модуля. Ось межі можливих ризиків, і як при проектуванні в умовах великої невизначеності розробнику модуля оцінити допустимий ризик, достатність застосованих ним конструктивно-схемних заходів забезпечення надійності?

Однією з особливостей РЛС ККП є неминуча необхідність власних розробок і одиничного виготовлення, починаючи з елементної бази і аж до матеріалів, навіть при наявності виробників цієї номенклатури. Особливістю розробки РЛС ККП є те, що розробка оригінальних несерійних виробів відбувається без теоретичних досліджень. Так, наприклад, такими оригінальними виробами були для РЛС 5Н20 — високовольтні конденсатори для ліній формування (70 кВ) і водоохолоджувані резистори (потужністю до

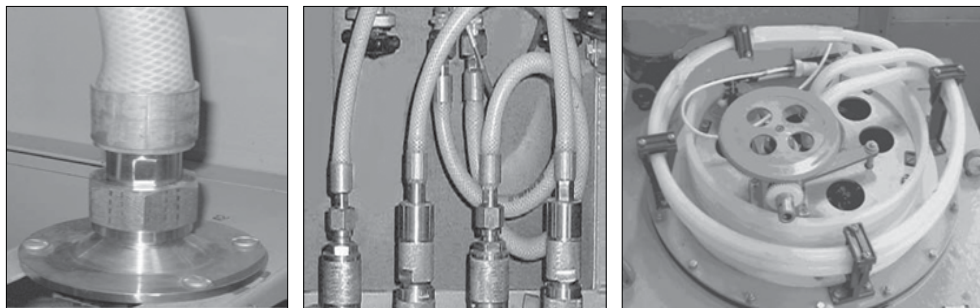


Рис. 2. Загальний вигляд елементів системи охолодження

320 кВт), для РЛС 90Н6 — надвисокочастотні (НВЧ) гібридні полоскові мікросхеми метрового діапазону та ін.

Виникає запитання, як правильно оцінити надійність власних розробок елементної бази в умовах одиничного, в кращому випадку дрібно-серійного, виробництва при відсутності аналогів. Так, програми випробувань на відповідність механічним, кліматичним та іншим впливам стандартизовані, але як визначити номенклатуру і допуски параметрів, оцінити їхню інформативність в оцінці надійності. Тут не можна використовувати переліки параметрів, що характеризують стандартні вироби, що серійно випускаються промисловістю. Так, наприклад, виявилось, що надійність згаданих вище водоохолоджуваних резисторів, зокрема типових факторів, залежить від типу і характеристик холодоагента, від впливів НВЧ і ще багатьох чинників, випробування на залежність від яких не передбачені стандартами.

Дійсно, уніфікація сприяє зростанню серійності виробництва продукції, але реалізація серійності як РЛС в цілому, так і більшості її функціональних систем, крім, можливо, передавальної і приймальної, не є можливою. Низькі рівні уніфікації сприяють зростанню числа схемних рішень побудови всієї ієрархії РЛС, що в умовах відсутності аналогів створює труднощі і некоректність в оцінці надійності.

Застосування мікроелектронних технологій призвело до появи однієї з складних і не завжди просто вирішуваних задач з точки зору надійності — забезпечення теплового режиму (ЗТР) з необхідністю створення для цього спеціальної

системи — СЗТР РЛС ККП. Для вирішення цієї проблеми потрібно застосовувати нові принципи побудови СЗТР, які не використовувались у світовій практиці.

Традиційно у перших поколіннях РЛС всі магістралі систем охолодження (наприклад, для РЛС 90Н6 близько 12 км завдовжки) виконувалися з труб, виготовлених з нержавіючих сталей певних сортamentів. Однак застосування такої технології призводило до появи нових специфічних проблем, пов'язаних з впливом агресивних середовищ в умовах НВЧ як на електричні, так і механічні параметри, внаслідок чого неможливо було забезпечити умови «окінцювання» труб, герметичність, роз'ємність з'єднань під напругою та ін. Крім підвищення вартості та ускладнення технологічних процесів формування трубопроводів для компактних конструкцій радіоапаратури це створило проблеми надійності та безпеки при роботі з охолоджуваними рідиною високонвольтними пристроями, що працюють під напругою 35 кВ. Для вирішення цих проблем знадобилася власна розробка і застосування нового матеріалу для труб — поліетилену, армованого лавсаном. З метою нормалізації структури поліетилену і штучного старіння шланги піддавалися впливу потужного поля іонізаційного випромінювання. Така обробка дозволила отримати досить жорсткі шланги зі зменшеною усадкою поліетилену, які дозволяли проводити закріплення конструкцій металевої арматури. Випробування на надійність нових шлангів, розрахованих на тиск 8 і 16 атм, проводилися при тиску 50 атм. Загальний вигляд елементів системи охолодження наведено на рис. 2.

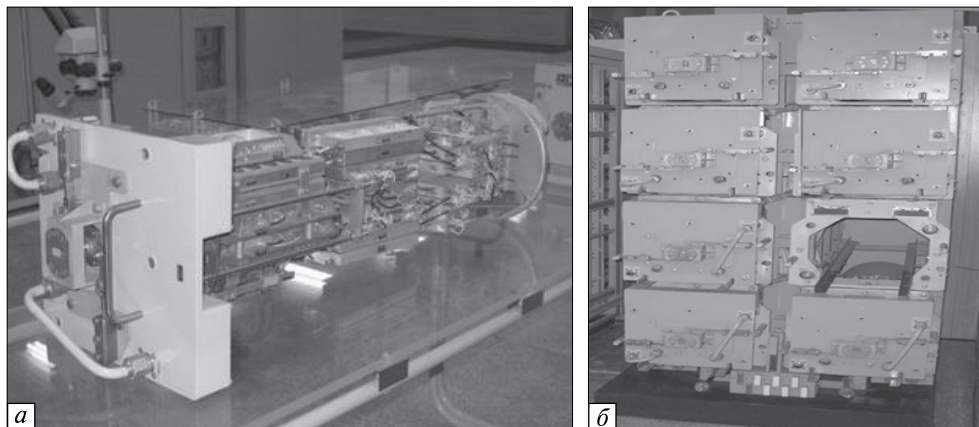


Рис. 3. Загальний вигляд приймального модуля (а) і вид в шафі РЛС 70М6 (б)

Забезпечення надійності функціонування РЛС ККП із застосуванням рідинної системи охолодження елементів, що працюють під високим потенціалом, вимагає вибору відповідного типу холодоагента, а застосування дистильованої деіонізованої води — вибору опору по таких ланцюгах. Це досягалося пропусканням рідини через конструкцію, омичний опір якої був значно вищим від опору стовпа охолоджувальної рідини ($R \approx 2 \text{ МОм}$).

Виконання розводки всіх елементів систем охолодження передавального полотна фазованих антенних решіток (ФАР) такими шлангами дозволило вирішити проблему надійності, зокрема підвищення сейсмостійкості РЛС при одночасному зменшенні сумарної довжини магістралі охолодження (до 5 км).

При побудові рідинної системи охолодження РЛС ККП необхідно враховувати ту особливість, що її функціонування відбувається в умовах впливу НВЧ, що може викликати зміну фізичних і хімічних властивостей води. Електромагнітне поле змінює решітки молекул води, орієнтуючи певним чином диполі, збільшує протонну щільність у місцях пошкодження дипольних ланцюжків, а також змушує диполі осцилювати. Вплив НВЧ-випромінювання на воду призводить до утворення метастабільних кластерів, які надають їй властивості твердого тіла. Цілковито резонно, що надійність об'єктів охолодження залежить від рівня контролю якості холодоагента. У складі РЛС ККП забезпечується тільки оцінка

рівня і витрати холодоагента, а штатна лабораторія здійснює періодичний контроль його фізико-хімічних характеристик. До сих пір не вирішеним залишається питання оцінки впливу поточних параметрів холодоагента на надійність ФЗП. Тому доцільно вирішити задачу вибору таких параметрів, які мали б максимальну інформативність про поточний стан холодоагента для цілей побудови системи діагностування і прогнозування СЗТР.

Труднощі забезпечення надійності РЛС ККП зумовлені особливостями нового покоління техніки, рівнем інтеграції та щільністю упаковки елементної бази, через непридатність наявних базових несучих конструкцій (БНК) для нових поколінь РЛС ККП. Так, в РЛС перших поколінь — 5Н86 Дніпро — базові несучі конструкції (2ТШ) дозволяли розміщення в них до 40 функціональних осередків, а в 5Н20 і 70М6 застосовані БНК (7ТШ), що дозволяють розмістити в шафі понад 50 осередків по 160 мікросхем високого ступеня інтеграції в кожній. Незважаючи на мізерне споживання електроенергії кожної з мікросхем, загальне споживання приймальної шафи становило близько 5 кВт, тому для забезпечення надійності цифрових осередків приймального модуля потрібне також рідинне охолодження [8]. Загальний вигляд приймального модуля та розміщення його в шафі приймального полотна РЛС 70М6 показано на рис. 3.

Забезпечення надійності РЛС ККП зажадало розробки комбінованої системи охолодження

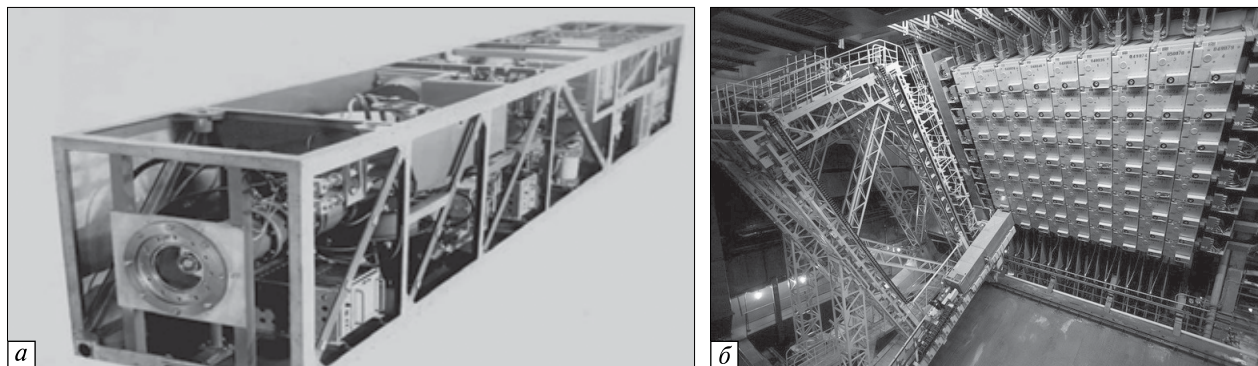


Рис. 4. Передавальний модуль: а — загальний вигляд (без електромагнітного екрана), б — в полотні фазованих антенних решіток

на рівні елемента з використанням різних видів охолодження. Наприклад, для охолодження анода амплітрона передавача РЛС 5Н20 застосовано рідинне охолодження, а його катодної ніжки (3 В, 3000 А) — повітряне охолодження за допомогою вентилятора власної розробки (20000 об/хв).

Однією з найбільш трудомістких і дорогих процедур програм забезпечення надійності РЛС ККП є випробування. Відомі методи контролю на відповідність технічним вимогам не можна застосувати у повному обсязі стандартних програм випробувань. Виготовлення та випробування можливі лише для осередків і шаф функціональних систем. Наприклад, виготовлення і випробування передавальних систем, що складаються з понад 1000 (РЛС 90Н6) і понад 5000 модулів-передавачів (РЛС 70М6), здійснювалися не на рівні функціональної системи, а на рівні модуля. В даний час просто не існує випробувального устаткування, яке б дозволяло проводити випробування, наприклад, передавального модуля РЛС 90Н6 (0.8 × 0.8 × 6.0 м, вага 2 Т), на вібро- і сейсмостійкість, температурно-вологісні випробування та ін., а тим більше випробування РЛС в цілому, тому оцінка надійності переноситься на місце експлуатації, де такі випробування також неможливі.

Загальний вигляд передавального модуля РЛС ККП і розміщення його в полотні ФАР наведено на рис. 4 (рис. 4, б відображає процес автоматичної заміни модуля за допомогою маніпулятора).

Часто рамки офіційної науки не дозволяють знайти рішення окремих проблем надійнос-

ті. Наприклад, електроживлення амплітрона «Селен» у схемі високовольтного імпульсного трансформатора здійснюється шляхом застосування трансформатора з неприпустимим, з погляду науки, коефіцієнтом трансформації.

Щодо стадій життєвого циклу сучасна практика проектування розглядає проектну, виробничу і експлуатаційну надійність. Як показує проведений аналіз, розподіл факторів ненадійності залишається колишнім, і практично всі дослідники надійності роль окремих факторів оцінюють так: помилки проектування — 40...45 %, помилки виробництва — 20 %, помилки експлуатації — 20 %, природний знос і старіння — 5 %. Але чи можна визначити проектну надійність РЛС ККП, не маючи характеристик надійності на кожному з етапів проектування, коли розрахунок проектної та виробничої надійності можна розпочати лише у процесі виготовлення складових елементів? І чи можна вважати отриману оцінку коректною, якщо випробування здійснюються тільки для осередків, частково для шаф, але не доходять навіть до функціональної системи? Як оцінити ризик виробника РЛС і достовірність отриманих оцінок надійності при цьому?

Проблема проектної надійності полягає в тому, що розробник змушений обмежуватися декларованою надійністю комплектних елементів, що входять в РЕА. Чинні стандарти загальнотехнічних вимог і методів контролю та випробувань для ВЕТ і РЕА не завжди ідентичні, а при аналізі вимог можна помітити безліч припущень типу

«не проводити», «поєднувати», висновків про «забезпечення надійності конструкцій» ВЕТ або навіть у складі РЛС. Наприклад, декларована надійність елементної бази гарантується в межах $10^{-7} \dots 10^{-9}$ при температурах $+125 \dots 150$ °С, а гарантії надійності РЛС, побудованої на таких надійних елементах, при температурах $T \leq +60$ °С вже на порядки скромніші. Водночас, наскільки коректні, наприклад, випробування на довговічність при низькій температурі (LTOL), що проводяться при температурах, аналогічних РЛС (-60 °С): -55 °С (Actel), -65 °С (QuickLogic)?

Складність технічних систем і вимоги до показників їхньої надійності зростають із такою ж швидкістю, як і сама надійність елементів. Тому надійність в цілому багатьох складних технічних систем практично не збільшується, і це основна проблема надійності техніки на сучасному етапі розвитку. Проектування складних технічних систем часто призводить до ситуації, коли оцінка адекватності проектних рішень вимогам на розробку системи стає важко розв'язуваною задачею, що не виключає оцінки рішення вже в ході експлуатації у припущенні апріорі певного ризику.

З урахуванням зростання надійності ВЕТ цілком резонно засумніватися в обґрунтованості для РЕА такого тривалого збереження типів і змісту випробувань, що впливають на надійність — тому доцільним є науковий аналіз даного питання.

Реально виробнича надійність спрямована на забезпечення мінімальних витрат виготовлення. Однак, оскільки ступінь впливу виробничих факторів на надійність РЛС досить високий, необхідно оцінити достатність і коректність відомих методик розрахунку та розробити нові, які повніше будуть враховувати цей вплив.

Хоча в даний час, як і раніше, окремо розглядається надійність системи «людина-машина», але вже чітко видно тенденцію витіснення людини з технічного середовища. З урахуванням повної автоматизації роботи РЛС ККП доцільно виключити з традиційної класифікації експлуатаційну відмову, залишивши класифікацію не за причиною, а за місцем виникнення, що слід віднести на проектування і виготовлення.

ЗІМ як елемент надійності має ряд особливостей, зокрема його оцінка розпочинається тільки на етапі спільної експлуатації. Особливості експлуатації РЛС ККП, які певною мірою стають відомі з моменту спільної експлуатації, створюють проблему неефективності забезпечення ЗІМ, яка посилюється тим, що на науковому рівні для таких систем на сьогоднішній день вона недостатньо розроблена, а на інженерному рівні — вирішується інтуїтивно. У складі РЛС ККП є ремонтний орган, забезпечений станційним ЗІМ, ремонтною документацією, стендовим і необхідним технологічним обладнанням для ремонту на якісному рівні виробника. Справедливо було б вважати, що надійність РЛС при зберіганні елементів в ЗІМ повинна бути вищою, але дослідження показали, що залишковий ресурс напівпровідникового елемента при введенні його в експлуатацію після зберігання протягом 10...20 років зменшився і становить 80 % від початкового середнього напрацювання до відмови. З огляду на реальний ресурс РЛС ККП цілком можливо очікувати такого ж порядку зниження її ресурсу при використанні елементів зі складу ЗІМ [6]. Виходячи з досвіду, більш важливим слід вважати питання не тільки і не стільки комплектації ЗІМ, скільки питання управління запасами для забезпечення надійності. Тому, незважаючи на невизначеність, вже на стадії проектування доцільною є розробка моделі управління ЗІМ, що враховує реальні відмови, продуктивність РПБ, ступінь витрат, поновлення та ін., що сприяло б оптимізації та мінімізації витрат на забезпечення надійності РЛС ККП. Модель ЗІМ повинна стати елементом загальної моделі надійності РЛС ККП.

Для забезпечення працездатності системи необхідно дотримуватись певних законів організації технічних систем, зокрема закону надмірності. Практично для всіх поколінь РЕА введення різного роду надмірності означає резервування як метод підвищення надійності, але це веде до зростання масогабаритних характеристик, енергоспоживання і необхідності перевірки самого дублювального виробу. На сьогоднішній день кількість транзисторів в сучасних мікросхемах досягає декількох мільярдів, а кількість логічних

елементів — мільйонів, розроблено і адаптивні логічні елементи.

Очевидно, новий етап забезпечення надійності повинен бути пов'язаний з індивідуальною надійністю самих елементів систем шляхом резервування вже на рівні елемента. Сучасна елементна база вже виготовляється з резервуванням і має можливість резервування на рівні транзисторів, що дозволяє забезпечити надійність шляхом застосування реконфігурованої архітектури, оперативної реконфігурації всього елемента або його частини. При цьому проблему забезпечення надійності, яка за своєю суттю є технічною, можна вирішити тільки шляхом застосування вбудованих технічних засобів керування надійністю РЕА.

Створення функції реконфігурування РЕА вимагає нового стандарту взаємостосунків розробників ВЕТ і РЕА з заміною функції розробника РЕА як одержувача елемента з можливістю узгодження окремих режимів його застосування, характерною для попередніх взаємостосунків, на функцію співвиконавця розробки ВЕТ.

Проведення традиційного контролю вимагає припинення функціонування за цільовим призначенням. Отримані при цьому результати не є функціями часу, тобто не розкривають динаміку процесів, що неприйнятно для РЛС ККП. Цілком очевидно, що тільки автоматичний контроль стану РЛС в масштабі реального часу здатний проводити аналіз поточної надійності без припинення цільового застосування.

Рівень контролепригодності, великий обсяг і рівень інформативності необхідних параметрів контролю створили проблему, пов'язану з вибором параметрів контролю сучасного покоління РЕА, і рішення цієї важливої наукової задачі може зробити істотний вплив на реальну надійність. Внаслідок низької інформативної здатності контрольованих параметрів сучасних цифрових виробів особливого значення набуває вибір ознак стану об'єкта, що мають максимальну інформативність. Сьогодні руйнування має розглядатися не як критична подія, а як поступовий кінетичний термоактиваційний процес. Сучасні ВЕТ є термодинамічними системами, функцією стану яких є температура. Проведені дослідження традиційних характеристик цифрових при-

строїв показали їхню низьку інформативність, відсутність чутливості до температурного фактора, який є основним активаційним фактором процесу деградації [2]. З практичної точки зору цілком очевидним є бажання, щоб число ознак розпізнавання стану елемента було мінімальним, а через те що межі такої мінімальності немає, то принципово можливе застосування однієї ознаки, яка має розпізнавальну здатність і доступність визначення цієї відмінності.

І таким параметром може бути температура як функція часу — загальний фактор відмови незалежно від типу механічних або електронних складових надійності. Використання температури як інформативної ознаки стану здатне забезпечити високу чутливість до процесів зміни індивідуального стану елемента. Багато сучасних цифрових ВЕТ вже мають у своїй структурі давачі температури, що істотно спрощує можливість побудови вбудованих систем перманентного діагностування та прогнозування при безперервному збереженні функції цільового застосування [7].

Сучасні тенденції в мікроелектроніці торкнулися і консервативного розуміння конструктивно-ієрархічного розбиття РЛС. Реальністю сьогодення стає реалізація у межах однієї мікросхеми функціонально закінчених виробів різної ієрархії. Поєднання двох протилежних процесів мікромініатюризації та інтеграції призводить до того, що все складніші пристрої можуть бути реалізовані у межах виробів мікроелектроніки.

Як скласти конструктивно-ієрархічну схему розбиття РЕА, проєктуючи на сучасних інтегральних мікросхемах, маючи нормативну схему розбиття, що становить перший і наступний рівні, як це врахувати при оцінці надійності нового покоління виробів мікроелектроніки в складі РЕА?

Друкована плата є основним конструктивним елементом сучасної радіоелектронної апаратури. При цьому було здійснено перехід від ліній до площини, від односторонніх друкованих плат до двосторонніх і багатошарових друкованих плат з розміщенням не тільки на поверхні, але і всередині обсязі підкладки.

Багатошаровість — риса сучасних РЛС ККП, наприклад в РЛС 5Н20 застосовано 26-шарову

плату і 6-шарову плату НВЧ на кераміці. На даному етапі розвитку технології вже реально відбувається розмивання межі між двома поняттями «друкована плата» і «друкований вузол». Що реально може оцінити розробник багат шарової плати, використовуючи нормативні методики випробувань механічних, кліматичних та інших чинників, відповідність (невідповідність) якого рівня забезпечена та ін.?

Застосування мікроелектронних технологій виявило тенденцію підвищення рівня ієрархії невідновлення (з рівня ВЕТ на рівень осередка), а, з огляду на обмежену відновлюваність осередків, актуальними є фундаментально-прикладні дослідження надійності сучасних виробів.

Одна зі складних причин відмов апаратури, яка важко піддається контролю у складі РЛС ККП, зумовлена неякісним електричним з'єднанням. Наприклад, відмова діода «Костяниця», розмір якого в краплі герметизаційного компаунда становить близько 2 мм, була зумовлена невідповідністю його теплових режимів тепловим режимам роботи в складі РЛС внаслідок застосування стандартного припою. Усунення причини відмови стало можливим за рахунок застосування припою на основі індієвих сплавів. Відпрацьована технологія традиційної пайки дозволяла отримувати паяні з'єднання високої якості на основі свинцю, але директивою ROHS (Обмеження застосування шкідливих речовин) сучасний монтаж повинен здійснюватися у безсвинцевому виконанні, що робить більш високим втому паяних з'єднань [14].

При розгляді надійності технічних пристроїв зазвичай передбачається, що вони мають два можливих стани — працездатний і непрацездатний, при цьому РЛС ККП нормативно віднесено до виробів з числом станів більше двох, хоча не завжди очевидно, який із станів слід вважати непрацездатним. Чи можна, наприклад, стан ФАР або багатоканальних приймально-передавальних систем РЛС ККП вважати непрацездатним в разі відмови одного виробу при збереженні працездатності тисячі інших? Незважаючи на численні роботи, що стосуються запобігання раптових відмов, в сучасній техніці як і раніше більший відсоток відмов припадає на раптові відмови, а надій-

ність є ймовірнісною характеристикою виробів. При сучасній швидкості розвитку напівпровідникової технології чекати результатів стандартних випробувань на надійність малоперспективно — потрібно створювати базу даних «вбудованої» надійності з апіорною інформацією.

Тому вважаємо за доцільне створення вбудованих в елементну базу моделей надійності, коли в ході проектування і випробувань розробник ВЕТ створює модель надійності елемента у вигляді, придатному для побудови на її основі системи контролю ФЗП. Інакше кажучи, сам елемент повинен містити власну вбудовану модель надійності, яку можна підтвердити або спростувати і уточнити (аж до побудови нової) на наступних стадіях проектування і експлуатації РЛС з використанням лише програмних засобів. Таку ж роботу має виконати і розробник РЛС, який вже на стадії проектування проводить розробку вбудованого банку станів і можливих реконфігурацій з урахуванням вбудованої моделі надійності ВЕТ. Створення вбудованих в елементну базу моделей надійності дозволить створити систему збору, накопичення та аналізу — єдину для всіх стадій життєвого циклу РЛС.

Одним з факторів, що впливають на надійність, є програмне забезпечення (ПЗ), і одною з помилок сучасних розробників є віра в те, що ПЗ позбавлене помилок, хоча в останні роки до 80 % всього ПЗ розроблялося методом «code and fix» (кодування і виправлення помилок). Водночас, як показує практика, що складніше і об'ємніше ПЗ, то більше у ньому дефектів [12]. Повне тестування складних програмних систем неможливе принципово, і реально перевірити можна тільки невелику частину з усього простору можливих станів програми [17]. Сьогодні поняття «функціональна система» доцільно замінити на поняття «функціонально-програмна система», під яким слід розуміти функціонально закінчену сукупність складових частин виробу, зокрема і ПЗ з властивістю перестроювання своєї структури. Подання структур і проектування РЛС у вигляді сукупності функціонально-програмних систем, що взаємодіють між собою, призводить до необхідності по-новому визначати показники надійності РЛС.

Потрібно відзначити, що частка програмно виконуваних функцій безперервно зростає, наприклад, для бойового літака вона виросла від 8 % (F-4 Phantom) в 1960-ті роки до 80 % (F-22 Raptor) в 2000 р. [16]. Такі ж тенденції, і навіть більш значні, характерні і для РЛС ККП. Це особливо важливо враховувати тому, що програмні засоби є одним з найбільш ймовірних джерел відмов навіть при використанні традиційних методів резервування.

Не можна залишити поза увагою вплив технології механічної обробки на надійність основних функціональних систем РЛС ККП. При проектуванні механічних систем більшість елементів проектується і виготовляється саме для даної системи, і їхні характеристики надійності при проектуванні просто невідомі, а для мікроелектронних виробів надійність залежить від точності виготовлення. Наприклад, допуск для габаритних розмірів модуля передавача ($0.8 \times 0.8 \times 6.0$ м) не більше 2 мм, 600 прецизійних отворів на чотирьох стінах хвилеводу (34×72 мм) виготовляються з мікронним позиціонуванням.

Тому значна частина технологічних процесів виготовлення РЛС ККП, особливо останніх поколінь, вже ведеться по «безпаперових технологіях»: виготовлення друкованих плат і осередків — близько 100 %, НВЧ підкладок і виробів на їхній основі — близько 80 %, механічна об-

робка — понад 50 %. При цьому забезпечується автоматизований безлюдний процес обробки деталей, використовуються обробні центри з магазинами інструментів, з вбудованими системами контролю як кожної операції, так і самих інструментів. Однак і тут необхідні інструменти врахування ризику, зумовленого повними або частковими відмовами ПЗ.

ВИСНОВКИ

Таким чином, при проектуванні і виготовленні РЛС ККП є ряд специфічних особливостей, які ускладнюють забезпечення їхньої надійності.

Рішення задач надійності має здійснюватися не тільки в ключі спроб уникнення катастроф, а й бути спрямованим на забезпечення передбачуваного функціонування, що вимагає подальших досліджень проблем як фундаментальної, так і прикладної надійності сучасного покоління складних технічних систем.

Наведені особливості проектування та забезпечення надійності РЛС ККП, що враховують досвід проектування реальних поколінь РЛС ККП, не претендують на повноту відображення і представлені для обговорення в широкому колі фахівців і розробників складних технічних систем з метою пошуку нових ефективних способів забезпечення надійності складних технічних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Агаміров Л. В., Остяков Ю. А., Соколов В. П., Шевченко И. В. *Обеспечение надежности и безопасности сложных технических систем*. Москва: Изд-во МЭИ, 2016. 131 с.
2. Азаренков В. И. К вопросу обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры средств вооружения и военной техники. *Системы озброєння і військова техніка*. 2016. № 1(45). С. 133—139.
3. Боев С. Ф. *Управление рисками проектирования и создания радиолокационных станций дальнего обнаружения*. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. 430 с.
4. Жаднов В. В. *Анализ моделей прогнозирования и расчета надежности комплектующих элементов бортовой электронной аппаратуры*. Надежность и качество: Труды междунар. симп., 2013. Т. 1. С. 28—31.
5. Клочкова Д. В., Сидняев Н. И. Основные факторы эксплуатационной надежности мощных передающих установок. *Наука и инновации*. 2013. Вып. 12. С. 1—19.
6. Лаврич Ю. Н. *Исследование влияния длительного хранения на характеристики солнечных батарей*. Полупроводниковые материалы, информационные технологии и фотовольтаика: Труды 2-й Международной научно-практической конференции (2013, Кременчуг). Кременчуг, 2013. С. 79—80.
7. Лаврич Ю. Н. Тепловой мониторинг как метод оценки технического состояния цифровых радиоэлектронных систем. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2015. № 4. С. 36—41.
8. Лаврич Ю. Н. *Особенности обеспечения теплового режима мощных радиопередающих систем*. Современные информационные и электронные технологии: Труды 16 Международной научно-практической конференции (2015, Одесса). Одесса, 2015. С. 140—141.

9. Литвиненко Р. С., Багаев А. В., Ямшиков А. С. Практическое применение показательного закона распределения при оценивании надежности технических объектов. *Науч. альманах*. 2016. № 9-10 (23). С. 427—431.
10. Литвиненко Р. С., Идиятуллин Р. Г., Аухадеев А. Э. Анализ использования показательного распределения в теории надежности технических систем. *Надежность и качество сложных систем*. 2016. № 2 (14). С. 17—22.
11. Максименков А., Долин М. Основные направления развития РЛС систем предупреждения о ракетно-ядерном ударе и контроля космического пространства США. *Зарубежное военное обозрение*. 2007. № 9. С. 37—66.
12. Марковский А. С., Самонов А. В., Свеколкин Н. И. Место и роль процессов контроля качества в жизненном цикле программных средств систем вооружения. *Тр. Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского*. 2016. С. 119—128.
13. Щербак Л. Н. Аксиомы теории надежности. *Электроника та системи управління*. 2011. № 3(29). С. 41—148.
14. Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment Text with EEA relevance OJ L 174, 1.7. — 2011. P. 88—110.
15. Green T., Terlizzi T. New Technology Challenges in Military Space. *Microcircuits. Test, Assembly & Packaging Times*. 2014. 5, No. 4. P. 39—45.
16. Hansen M., Nesbit R. F. *Report of the Defense Science Board Task Force on Defense Software*. Washington: Defense Science Board, 2000. 59 p.
17. Ushakov I. A. Reliability: past, present, future. *Reliability: Theory & Applications*. 2006. № 1. P. 17—27.
18. Wong Kam L. What is wrong with the existing reliability prediction method? *Quality and Reliability Engineering International*. 1990. P. 251—257.

Стаття надійшла до редакції 06.08.2020

REFERENCES

1. Agamirov L. V., Ostyakov Yu. A., Sokolov V. P., Shevchenko I. V. (2016). *Ensuring the reliability and safety of complex technical systems*. Moscow: MSTU [in Russian].
2. Azarenko V. I. (2016). On the issue of ensuring the reliability of electronic equipment of weapons and military equipment. *Technology and design in electronic equipment*, № 1(45), 133—139 [in Russian].
3. Boev S. F. (2017). *The risk management of design and creation of early warning radars*. Moscow: MSTU [in Russian].
4. Zhdanov V. V. (2013). *Analysis of forecasting models and calculation of reliability of component parts of on-board electronic equipment*. Reliability and quality: Proceedings of the international symposium, 1, 28—31 [in Russian].
5. Klochkova D. V., Sidnyaev N. I. (2013). The main factors of operational reliability of powerful transmission units. *Science and innovation*, 12, 1—19 [in Russian].
6. Lavrich Yu. N. (2013). *Study of the effect of long-term storage on the characteristics of solar cells*. Proceedings of “Semiconductor materials, information technology and photovoltaics” (Kremenchug, 2013), 79—80 [in Russian].
7. Lavrich Yu. N. (2015). Thermal monitoring as a method for assessing the technical condition of digital electronic systems. *Technology and design in electronic equipment*, № 4, 36—41 [in Russian].
8. Lavrich Yu. N. (2015). *Features of ensuring the thermal regime of powerful radio transmitting systems*. Proceedings of “Modern information and electronic technologies”: 16th International Scientific and Practical Conference (Odessa, 2015), 140—141 [in Russian].
9. Litvinenko R. S., Bagaev A. V., Yamschikov A. S. (2016). The practical application of the exponential distribution law in assessing the reliability of technical objects. *Scientific Almanac*, № 9-10(23), 427—431 [in Russian].
10. Litvinenko R. S., Idiyatulin R. G., Auhadeev A. E. (2016). Analysis of the use of exponential distribution in the theory of reliability of technical systems *Reliability and quality of complex systems*. 2 (14), 17—22 [in Russian].
11. Maximenkov A., Dolin M. (2007). The main directions of the development of radar warning systems for nuclear missile strike and space control of the United States. *Foreign military review*, № 9, 37—66.
12. Markovskiy A. S., Samsonov A. V., Svekolkin N. I. (2016) Place and role of quality control processes in the life cycle of weapons systems software. *Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaysky*, 119—128 [in Russian].
13. Scherbak L. N. (2011). Axioms of Reliability Theory. *Electronics and control systems*, № 3(29), 141—148 [in Russian].
14. Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment Text with EEA relevance OJ L 174, 1.7, 88—110.
15. Green T., Terlizzi T. (2014). New Technology Challenges in Military Space. *Microcircuits. Test, Assembly & Packaging Times*, 5(4), 39—45.
16. Hansen M., Nesbit M. (2000). *Report of the Defense Science Board Task Force on Defense Software*. Washington: Defense Science Board, 59 p.

17. Ushakov I. A. (2006). Reliability: past, present, future. *Reliability: Theory & Applications*, № 1, 17–27.
18. Wong Kam L. (1990). What is wrong with the existing reliability prediction method? *Quality and Reliability Engineering International*, 251–257.

Received 06.08.2020

Yu. N. Lavrich¹, Ph. D. in Tech. Sci., Leading Researcher

E-mail: lavrich@westa-inter.com

S. V. Plaksin¹, Dr. Sci. in Phys.&Math., Senior Researcher

L. M. Pogorelaja¹, Junior Researcher

N. I. Bistrov², Chief Designer, Director

¹Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine

5, Pysarzhevskiy Str., Dnipro, 49005 Ukraine

² JSC “DB “Dniprovske”

34, Budivelnykiv Str., Dnipro, 49089 Ukraine

SOME FEATURES OF THE APPLIED RELIABILITY OF SPACE CONTROL RADAR STATIONS

Context. The space control radar stations (SCRS) carry out extremely important functions, therefore, they must be extremely reliable, and ensuring reliability is one of the key requirements at all stages of their life cycle.

Objective. The goal of the work is to analyze some aspects of ensuring reliability, caused by the peculiarities of the process of developing and manufacturing SCRS for space monitoring, and to substantiate the possibility to use the domestic developer experience in solving reliability problems in new samples.

Method. We use the comparative analysis of the existing standards, the standard of the Chief Designer, and methods of development, manufacturing, and testing of complex technical systems.

Results. Some of the characteristic features of SCRS are given: uniqueness, single production, low repeatability and a wide product range, the impossibility of manufacturing and testing functionally complete systems directly under the manufacturer's conditions. A number of features of design and manufacturing according to the standard of the Chief Designer, which are absent in the existing standards, are considered. The need to develop new regulatory documentation that takes into account the specifics of the design and manufacture of SCRS is justified. From the operational point of view, a number of specific scientific and practical solutions for ensuring the reliability of SCRS of a domestic developer, which can be used in further developments, are presented. It has been established that many terms in the modern theory of reliability do not have an applied focus and do not allow increasing the accuracy of classifying the state of an object. It is shown that the creation of new generations of space monitoring radar stations is accompanied by the emergence of new scientific and practical tasks unknown to science, the solution of which is connected with the use of new scientific ideas and with the own developments of component elements. We have shown that the use of the existing elemental base in the design of space monitoring radar creates difficulties in ensuring the reliability of hierarchical levels since testing by existing standards is possible only for lower levels of hierarchy. It is established that the existing standards of general technical requirements and methods of control and testing for products and radar stations are not always identical, and it is impossible to ensure that by applying a highly reliable element base, we shall receive the same radar station reliability. Obviously, the new stage of ensuring reliability must be associated with the individual reliability of the elements themselves. It justifies the importance of the scientific task associated with the choice of control parameters of the modern generation of radar stations in the conditions of the impossibility of applying traditional control, which requires the interruption of their operation. The temperature as a function of time is proposed as a parameter for estimating the state of products. A number of ways were proposed to ensure the reliability of new generations of space monitoring radar stations based on the use of new information signals, as well as reliability models built into the element base to create a system for collecting, storing, and analyzing information — the same for all stages of the radio-electronic equipment lifetime.

Conclusions. Taking into account the features of the design and manufacture of space monitoring radar stations and the practical experience of a domestic developer to solve reliability problems will ensure the creation of technology of highly reliable generations of space control radars and the development of stations of a “high factory readiness”.

Keywords: space monitoring radar, applied reliability, element base, documentation of the Chief Designer, built-in reliability.