

<https://doi.org/10.15407/knit2024.05.062>  
УДК 537.877

**В. І. ПРИСЯЖНИЙ**, нач. Нац. центру управління та випробувань космічних засобів,  
канд. техн. наук, старш. наук. співроб. Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7825-9037>  
E-mail: vip.17071957@gmail.com

Державне космічне агентство України  
вул. Князів Острозьких 8, Київ, Україна, 01010

## ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІМІТАЦІЙНО-АПАРАТНИХ МОДЕЛЮВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ

**Актуальність.** Радіолокаційні засоби контролю космічного простору є великими наукомісткими технічними системами. Створення радіолокаційних станцій (РЛС) нового покоління — складний процес, пов'язаний не лише з пошуком нових технічних рішень та технологій, а й з оцінкою їхньої ефективності з позицій терміну та вартості створення.

Вітчизняна школа проектування та створення засобів контролю космічного простору має значний науково-технічний потенціал, що дозволяє розробку перспективних РЛС. Розробка таких систем здійснюється, минаючи ряд етапів, які встановлені за нормативним порядком — оскільки створення функціонально закінчених систем та зразка в цілому можливе лише на місці експлуатації, то відразу приступають до виготовлення. Стендове обладнання, що використовується для випробувань виробів, внаслідок своєї монофункціональності не може забезпечити перевірку функціонально закінчених систем.

Забезпечення ефективної реалізації цільових функцій потребує тривалого та дорогого процесу пошуку нових схематехнічних рішень з використанням при цьому розробленої апаратури в якості стенду відпрацювання, що витрачає його ресурс. Вирішення проблеми можливе лише шляхом створення інструменту, який б дозволяв розробнику проводити весь перелік випробувань усієї ієрархії системи безпосередньо у процесі розробки. Такий інструмент може бути створений з використанням імітаційно-апаратних моделювальних комплексів.

**Мета.** Метою роботи є дослідження можливості розробки імітаційно-апаратних моделювальних комплексів для випробувань перспективних наукомістких складних технічних систем.

**Метод.** Використовується метод імітаційного та напівнатурного моделювання.

**Результати** Розроблені основні методи побудови імітаційно-апаратного комплексу та обґрунтовано можливість використання засобів імітації, моделей та штатної технологічної апаратури РЛС для формування його архітектури. Показано, що створення нових комплексів може бути засноване як на використанні вже наявних систем в експлуатованій РЛС, так і на розробці нових елементів.

**Висновки.** Наявність науково-технічного доробку та практичного досвіду у вітчизняного розробника РЛС контролю космічного простору робить реалізацію нового комплексу цілком реалістичним, а реалізація технології випробувань та відпрацювання з використанням імітаційно-апаратного комплексу дозволить зменшити сумарні витрати на розробку.

**Ключові слова:** великі технічні системи, радіолокаційні станції, імітація, модель, імітаційно-апаратний комплекс, випробування.

Цитування: Присяжний В. І. Проектування технічних систем із застосуванням імітаційно-апаратних моделювальних комплексів. *Космічна наука і технологія*. 2024. 30, № 5 (150). С. 62—74. <https://doi.org/10.15407/knit2024.05.062>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## ВСТУП

Ефектом інформаційно-технічної революції кінця ХХ століття є створення нових військових технологій та зростання ролі космічних систем та засобів при вирішенні завдань інформаційного забезпечення військових дій. Відомо, що в сучасних війнах високих технологій центр бойових дій перемістився у повітряний простір, а забезпечення бойових дій — у космічний [1].

Системи контролю космічного простору і раннього попередження є основою створення глобального інформаційного поля, яке у рівній мірі може ефективно використовуватись для рішення поточних та довгострокових завдань. Завдання постійного моніторингу ситуації в космічному просторі є дуже актуальним і, враховуючи бурхливий розвиток ракетно-космічних технологій у багатьох країнах, важливість цього завдання має стійку тенденцію до підвищення.

Сьогодні ситуація у ближньому космосі відрізняється, наприклад, від тієї, що була 15—20 років тому, внаслідок впливу таких факторів, як:

- насиченість навколосезного простору великою кількістю об'єктів (активних, тих, що припинили «активне» функціонування, фрагментів запусків тощо);
- поповнення новими об'єктами;
- необхідність постійного відстеження та оновлення інформації про ситуацію практично в режимі реального часу;
- наявність «тематично орієнтованих» угруповань, що вирішують спеціальні завдання (розвідка, зв'язок, навігаційне забезпечення тощо), які необхідно виділяти на тлі всього різноманіття космічних об'єктів.

Обстановка у ближньому космосі характеризуватиметься досить швидкою мінливістю, яка змусить розробників постійно адаптувати радіолокатори до цих змін.

Аналіз напрямків розвитку космічних систем, а також їхніх тактико-технічних характеристик дозволяє скласти досить повну картину можливостей та тенденцій розвитку космічних систем військового призначення провідних країн.

В даний час у США для контролю космічного простору використовуються радіолокаційні станції — AN/FPS-49, 50, 85, 92 та ін.



Рис. 1. РЛС ККП «Грав» (GRAVES)

Європейське космічне агентство (ЄКА) з 2009 р. реалізує програму створення європейської системи контролю космічного простору (ЄвроККП) «Ситуаційна поінформованість у космосі» (SSAP — Space Situational Awareness Programme).

Так, французькою аерокосмічною лабораторією «Онера» створено і з 2005 р. прийнято на озброєння ВПС Франції бістатичну РЛС ККП «Грав» (GRAVES — Grande Réseau Adapté à la Veille Spatiale) метрового діапазону (центральна частота 143.05 МГц) (рис. 1), яка у межах своєї зони здійснює безперервний контроль і забезпечує виявлення космічних апаратів, що пролітають над територією Франції, а також визначення параметрів їхніх орбіт і каталогізації. Крім того, станція здійснює стеження за низькоорбітальним «космічним сміттям».

У Німеччині Інститутом фізики високих частот і радіолокаційної техніки Товариства Фраунгофера (Fraunhofer-FHR — Fraunhofer Institute for High Frequency Physics) розроблено дводіапазонну (дм/см-діапазони) моноімпульсну РЛС «Тіра» (TIRA — Tracking Imaging Radar), призначену для виконання досліджень на користь розробки методів та способів виявлення та розпізнавання космічних та деяких типів повітряних цілей наземними РЛС. Крім того, «Тіра» задіяна ЄКА у складі ЄвроККП на користь високоточного виміру координат космічних об'єктів штучного походження (рис. 2).

Україна також має засоби контролю космічного простору, і, перш за все, це РЛС 5Н86М «Дніпро-М» Західного центру радіотехнічного спостереження системи контролю і аналізу кос-

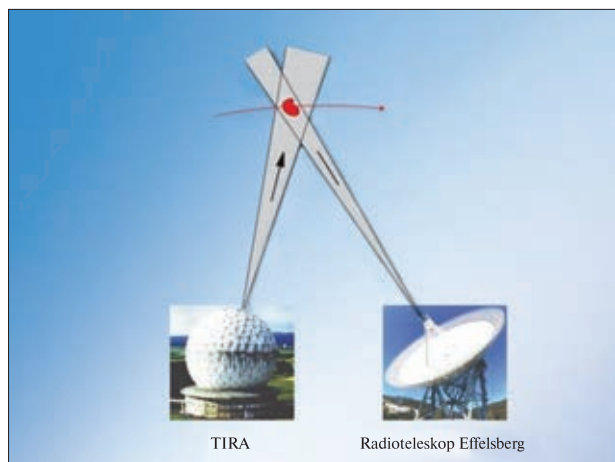


Рис. 2. Загальний вигляд РЛС «Тіра»



Рис. 3. Загальний вигляд РЛС 5Н86 «Дніпро» (Hen House)

мічної обстановки (СКАКО). Вітчизняні розробники за минулий більш ніж піввіковий період брали участь у створенні багатьох поколінь РЛС, що дозволило досить добре відпрацювати та перевірити на практиці методи та методики їхнього створення [6]. Однак постійне зростання вимог до радіолокаційних станцій нового покоління, що розробляються, неминуче призводить до використання широкого комплексу нових системно-технічних, конструкторських і технологічних рішень при їхньому створенні, а отже і самих методів створення РЛС [8].

Розвиток будь-яких технічних систем характеризується циклічністю, зумовленою науково-технічним прогресом, що супроводжується періодичним оновленням технічних систем на більш

досконалі. Ця закономірність наочно проявляється у розвитку наукомістких технічних систем, таких як РЛС 5Н86 «Дніпро» (Hen House) (рис. 3), під час створення яких було використано новітні на той час наукові та технологічні досягнення радіоелектроніки.

Відповідно до «Концепції реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року» [4] щодо створення, та аналізу космічного простору планується розробка нового покоління РЛС типу 5Н86 з цифровою ФАР.

Враховуючи тенденції розвитку засобів повітряно-космічної оборони розвинених держав світу, яка в основному базується на протиповітряній та ракетно-космічній обороні і включає систему контролю космічного простору, слід констатувати, що це актуально і для реалізації багатофункціональності вітчизняної системи контролю [10].

#### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Проблеми, пов'язані з перспективами розвитку космічної галузі України та інфраструктури, що її забезпечує, передбачають розвиток прискореними темпами експериментально-випробувальної бази і, зокрема, вимірювально-обчислювального комплексу та його засобів [14].

Створення РЛС нового покоління — складний процес, пов'язаний не лише з пошуком нових технічних рішень та технологій, а й з оцінкою їхньої ефективності з позицій технічної, технологічної та виробничої реалізації при заданих ресурсних та тимчасових обмеженнях. Основними вимогами щодо сучасних складних технічних систем стають універсальність і мінімальна вартість [7]. При цьому різко посилюються вимоги як до характеристик самого локатора, так і до самого науково-технологічного процесу їхнього створення.

Серед визначальних труднощів розробки слід назвати:

- зростання вимог до рівня тактико-технічних характеристик РЛС;
- скорочення термінів проектування та виробництва РЛС нового покоління;
- скорочення витрат на створення РЛС нового покоління (щодо минулого покоління);

- скорочення експлуатаційних витрат.

Виконання цих вимог неминує призводить до необхідності вдосконалювати системно-технічні, конструкторські та технологічні рішення. До того ж сучасні темпи розвитку радіоелектроніки такі, що кожні 2-3 роки з'являється нова елементна база, абсолютно нові конструкторські розробки та технології, що вимагають свого впровадження не тільки у нові, але і в наявні РЛС, які мають тривалі життєві цикли (до 30 років) та унікальні консервативні структури.

Сучасні методи проектування РЛС та критерії, що лежать в їхній основі, не дозволяють максимально інтегрувати найбільш передові технології та розробки у проєктований зразок через свою орієнтацію на консервативність та індивідуалізм своїх структур і максимальну наступність відпрацьованих конструкторсько-технологічних рішень з мінімізацією впровадження кількості нових елементів з високим ризиком реалізації. Необхідність удосконалення методології створення РЛС нового покоління зумовлена протиріччям між високими вимогами до РЛС, що проєктується, пов'язаними її цільовим призначенням, та фінансовими та тимчасовими обмеженнями на проведення широкого комплексу робіт з розробки нових технологій створення та виробництва систем, блоків, модулів.

Труднощі, а часто і неможливість практичної реалізації натурних випробувань стендового обладнання, вже починаючи з рівня шафи, жорсткі ресурсні обмеження диктують необхідність розробки нових методів та засобів експериментального відпрацювання та випробувань.

Об'єктом дослідження є перспективні наукомісткі складні технічні системи.

Мета роботи — розробка концептуальної основи побудови нового покоління стендового обладнання складних технічних систем з використанням імітаційно-моделювальних та апаратних елементів.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Дана робота передбачає розгляд можливостей використання імітаційно-моделювальних та апаратних елементів при побудові стендового обладнання нового покоління РЛС, а також роз-

робку нових методів та засобів його експериментального відпрацювання та випробувань.

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Проектування складних наукомістких технічних систем типу РЛС 5Н86 має базуватися на спільному використанні систем автоматизації технічного проектування (САПР) та апаратно-програмної експериментальної бази, а технологія проектування — на взаємодії цих компонентів. Накопичений вітчизняним розробником багаторічний досвід дозволив довести цю технологію до високого рівня та успішно використовувати її при проектуванні кількох поколінь РЛС.

Не можна не відзначити, що питання випробувань кожного нового покоління РЛС завжди передбачало розробку нового покоління стендового обладнання. Але наявне стендове обладнання монофункціональне, що призводить не тільки до зростання числа стендів, але і до підвищення трудомісткості і часу. В середньому номенклатура необхідного стендового обладнання для налаштування та випробування РЛС перевищувала 450...500 найменувань, а це вимагало пошуку нового рівня стендового обладнання [17]. Для прикладу на рис. 4 приведено стенд для перевірки цифрових комірок РЛС 5Н20 (ліворуч), який забезпечує перевірку всієї номенклатури комірок і приймальних модулів РЛС 70М6.

Але при створенні складних технічних систем (СТС) неминує виникає питання проведення експериментального відпрацювання, випробувань і натурних експериментів, особливо комплексних. Це є типова процедура, властива будь-якій новій розробці різного рівня складності та новизни, але треба відзначити принципову різницю між нормативним (встановленим) порядком розробки традиційної радіоелектронної техніки та розробкою пристроїв СКАКО. Розробка таких систем ведеться за конструкторською документацією головного конструктора (КДГК), за якою, не провівши більшість встановлених етапів та процедур, відразу приступають до виготовлення. Як показав досвід, це єдиний спосіб зменшення термінів розробки приблизно на 2-3 роки, а усунення недоліків вирішується на етапі виготовлення [5].



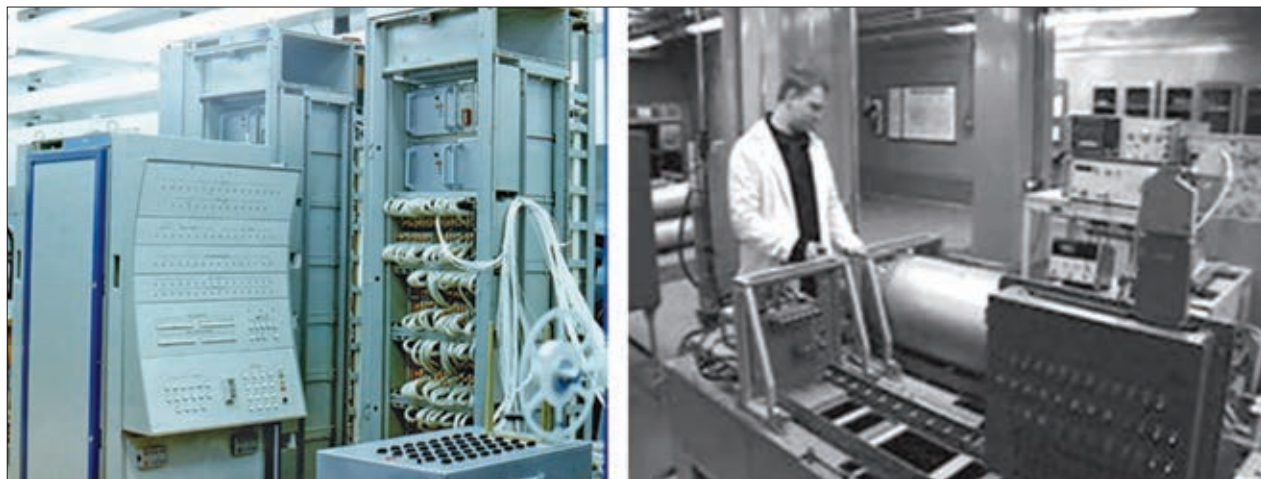


Рис. 4. Загальний вигляд стендів перевірки комірок (ліворуч) та приймальних модулів (праворуч)

Проведення випробувань всіх рівнів ієрархії створюваної РЛС обмежуються функціональним рівнем комірки, блоку та шафи, але не рівнем функціонально закінченої системи (ФЗС). Причина полягає не у здатності розробника розробити програму та методику випробувань для ФЗС, а у неможливості створення відповідного робочого місця для таких випробувань. Наприклад, тільки передавальна система РЛС 5Н20 складається з 1260 передавальних модулів, РЛС 70М6 — з 8000 модулів (а приймальна — з 16000 модулів), створити такі ФЗС у виробника неможливо. Тому створення ФЗС та її випробування проводяться лише на об'єкті експлуатації, а це веде до збільшення ризику помилок розробника, необхідності досліджень та пошуку оптимальних рішень.

Сучасною тенденцією є широке використання при випробуваннях СТС їхніх комплексних імітаційних моделей та моделювальних комплексів [2]. Необхідність застосування комплексних та математичних моделей виникає і при проведенні випробувань компонентів РЛС у зв'язку з труднощами практичної реалізації їхніх натурних випробувань. Сучасна методологія проектування СТС повинна базуватися на суміщеному використанні систем проектування САПР та апаратно-програмної експериментальної бази, а технологія проектування — на взаємодії цих компонентів. Імітаційно-моделювальний стенд

розробника (ІМСР) — це територіально розподілений апаратно-програмний комплекс блочно-модульної архітектури відкритого типу, який забезпечує поетапне функціональне відпрацювання компонентів створюваної РЛС на всіх етапах проектування. Структура стенду розробника ІМСР показано на рис. 5.

Основним завданням стенду розробника ІМСР є проведення моделювання, випробувань та напівнатурного відпрацювання компонентів створюваної РЛС з метою отримання достовірних даних про відповідність їхніх поточних характеристик заданим. Основними методами дослідження у стенді ІМСР є імітаційне та напівнатурне моделювання. Основними компонентами комплексу ІМСР є імітаційний комплекс ІК, апаратно-програмний комплекс АПК та імітаційний моделювальний комплекс ІМК, які взаємодіють через єдине інформаційне середовище. Компонентами комплексу є ЦМП — центральний мікропроцесор, МПКі, МПКа, МПКм — мікропроцесори основних компонентів комплексу ІК, АПК, ІМК, відповідно, АКІ — апаратні канали інтерфейсів. Застосована при побудові стенду периферійність мікропроцесорів кожного комплексу дозволяє суттєво підвищити швидкодію всього стенду.

Для реалізації стенду ІМСР потрібні імітаційні моделі як РЛС, так і всіх конструктивно-ієрархічних рівнів схеми розбиття, а також деякий

функціональний комплект (ФК). До складу ФК повинен входити мінімальний комплект штатних засобів виробів, якісний та кількісний склад яких дозволяє формувати функціонально-алгоритмічні системи РЛС у складі, достатньому для їхнього відпрацювання. Завдяки цьому забезпечується економія часу під час відпрацювання функціональних систем РЛС, яка починається до створення штатних зразків.

У процесі створення РЛС випробування можуть проводитися як зі штатними апаратно-програмними комплексами (АПК), так і з імітаційними моделями та дослідними зразками створюваних компонентів (модулів, блоків).

Стенд розробника призначений для:

- математичного, імітаційного та напівнатурного моделювання функціонування розроблюваних компонентів у складі РЛС;
- функціонального відпрацювання, випробувань та оцінки параметрів компонентів, що розробляються в заданих умовах функціонування;
- попередньої оцінки досягнутих тактико-технічних характеристик РЛС;

Методологія використання ІМСР заснована на представленні процесу створення РЛС на базі апаратно-програмної платформи проектування, що об'єднує системи автоматизації, які використовуються на всіх етапах реалізації проекту.

Сучасні РЛС, що розробляються та приймаються на озброєння, оснащуються комплексом тренажно-імітаційної апаратури, яка виконує функції комплексної математичної моделі процесу функціонування зразка. ІК призначений для імітації сигналу та заводової обстановки. Основними пристроями ІК є імітатори сигналу цілі та заводової обстановки.

Слід сказати, що роботи зі створення таких стендів розпочато вже з перших поколінь РЛС типу 5Н86. Перші імітатори радіотехнічного тракту РЛС використовували штатну електронно-обчислювальну машину (ЕОМ) 5Е71, а у процесі розробки РЛС 5Н86 та 5У83 були створені імітаційні моделі ІМ-86, ІМ-83 на базі ЕОМ 5Е73, для РЛС 5Н79 було створено імітаційну модель ІМ-79. Нині функція імітаційних комплексів обмежена лише перевіркою якості функціонування і є інструментом на етапі експлуата-

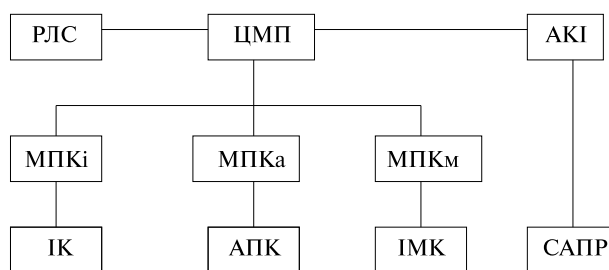


Рис. 5. Структура стенда розробника ІМСР

ції. Але ефективнішим результатом може бути розширення кола користувачів такого комплексу з участю розробника РЛС, тобто вже на етапі проектування.

Імітатор ІК структурно включає дві основні частини — імітатор повітряно-космічної обстановки (ІПКО) та імітатор сигналу апаратури системи прийому та обробки сигналу (ІПОС). Функції ІПКО реалізують імітаційні моделі РЛС та її функціональних систем у процесі імітації роботи РЛС у заданих варіантах цільової обстановки. Досвід щодо створення імітатора ІПКО у вітчизняного розробника було отримано в ході розробки імітаційно-стендової апаратури 5Г98 «Аккорд», модель якого імітувала повітряну обстановку стосовно аеродинамічних цілей. Вперше у світовій практиці розроблено вітчизняну імітаційну модель сигналу станції загоризонтного виявлення типу 5Н32, реалізовану на імітаторі 5Г93. Залежно від ступеня готовності виробів у складі комплексу можуть використовуватись повністю програмні моделі всіх виробів, або комплекс із натурних зразків виробів та програмних моделей виробів, зібраних у стенд та пов'язаних через апаратні канали інтерфейсів (АКІ).

Функції ІПОС реалізує апаратно-програмний функціональний імітатор РЛС. Імітований потік вхідної інформації подається на вхід АПК або його моделі, що випробовується, і ініціює його функціонування. Одним з прикладів імітації радіолокаційного сигналу є імітатор АН/РЛМ-4 компанії ІТТ Exelis, який є сучасним ефективним симулятором радіолокації, призначеним для тестування приймачів радіолокаційних сигналів [15].

Імітаційно-моделювальний комплекс (ІМК) є основним елементом стенду розробника ІМСР

і являє собою моделювальний комплекс, який дублює розроблювану РЛС, середовище функціонування якої замінюється апаратно-програмною моделлю. Використовуючи імітатори цілі та перешкод, а також імітаційні моделі елементів РЛС, стенд здійснює аналіз досягнутих тактико-технічних характеристик (ТТХ) РЛС та її структурно-функціональних систем. Відповідно до НДР шифр ІТСТ-2023/1 вже розроблено першочерговий комплект моделей комірок та модулів системи функціонального контролю РЛС 5Н86, який може використовуватися стендом.

Розроблені моделі зберігаються у базі ІМК і використовуються для випробувань і напівнатурного відпрацювання компонентів РЛС, що розробляються, а саме для:

- відпрацювання та комплексного стикування апаратури та програмного забезпечення (ПЗ) функціонально-алгоритмічних систем РЛС;
- оцінки характеристик функціонування підсистем (складових частин) РЛС у заданій сигнально-перешкодовій обстановці автономно та у складі РЛС у процесі експлуатації;
- відпрацювання основних технічних та програмно-алгоритмічних рішень функціонально-алгоритмічних систем РЛС;
- оцінки виконання вимог ТЗ на створювану РЛС на всіх етапах створення.

Випробування проводяться за комплексною програмою на всіх рівнях відповідно до ієрархії побудови РЛС від нижнього рівня ієрархії до верхнього. Для забезпечення високої достовірності імітаційного моделювання та обґрунтування реалізованості створюваної РЛС, ІМК повинен створюватися на перспективних апаратно-програмних технологічних рішеннях з використанням сучасних інформаційних технологій.

Основними системами ІМК РЛС повинні бути апаратно-програмний функціональний імітатор РЛС та її функціональних систем реального часу, комплексна імітаційна модель РЛС та її функціональних систем і імітаційна математична модель оцінки ТТХ РЛС та її функціональних систем.

Крім апаратних комплексів, до складу РЛС входить функціональне програмне забезпечення (ФПЗ), яке потрібно відпрацювати у процесі ви-

пробувань на стенді. Функціональна апаратура РЛС 5Н86 є функціонально надмірною: у складі РЛС — 12 комплектів передавальної системи ЗПГ, 6 комплектів приймальної системи ПІА, 4 комплекти системи функціонального контролю 4ПК, обчислювальний комплекс 5Е73-4, частину комплектів яких можна використати для створення стендового АПК. З урахуванням функціональної надмірності РЛС як імітатор функції ПОС можна використати один з каналів ПІА, а як комп'ютерні засоби — комплекти обчислювального комплексу 5Е73, які залишилися після модернізації 5Н86. Така концепція побудови стенду дозволить суттєво скоротити терміни та вартість створення. Для суттєвого розширення швидкодії стенду, зменшення енергоспоживання та масогабаритних розмірів доцільно використовувати сучасне покоління мікропроцесорної техніки, яка має на порядок кращі характеристики.

Вхідний потік радіолокаційної інформації, що імітується, повинен повністю відповідати реальним вхідним потокам, що може бути забезпечене застосуванням програмних моделей, які імітують роботу РЛС у заданих умовах. Дуже важливо при такому підході до побудови стенду мати базу моделей систем та характеристик тестування моделей, які будуть використовуватися для порівняльних аналізів, оцінки та прийняття рішень.

Стенд розробника ІМСР, на основі якого здійснюється відпрацювання системотехнічних та інженерних рішень, створюється одноментно, без розробки дослідного зразка. Стенд реалізує різний рівень моделювання — починаючи від моделей нижчих конструктивно-ієрархічних рівнів схем розбиття РЛС, і дозволяє відпрацьовувати задані часові діаграми вихідних сигналів, еквівалентних реальним виробам за складом та значенням, не виконуючи побудову та дослідження повних функціональних моделей. Ці сигнали видаються в інші канали даних та включають в свій склад реальне програмне забезпечення.

Засоби розробки моделей, що входять до стенду, дозволяють створювати моделі, що імітують зв'язки досліджуваного приладу та взаємодію

з ним через апаратні канали передачі даних. Структура програмних та апаратних засобів стенду включає набір програмних інструментів, що забезпечують вирішення завдань, пов'язаних з моделюванням:

- створення імітаційних моделей приладів, а також допоміжних моделей (наприклад, моделі зовнішнього середовища);
- організацію взаємодії моделей, виконання набору моделей, їхньої взаємодії з апаратурою в модельному та реальному часі з можливістю внесення відмов у моделі;
- управління процесом моделювання у діалоговому режимі, або виконання автономного експерименту без участі розробника;
- оперативне відображення результатів моделювання у графічному та табличному вигляді;
- реєстрацію та обробку результатів моделювання.

При проведенні тривалих експериментів, якщо не вживати спеціальних заходів для їхнього прискорення, процес моделювання займе стільки ж часу, скільки робота реального комплексу. Тому у стенді передбачено можливість запуску експерименту у прискореному режимі з оперативним відображенням результатів. Крім того, є випадки, коли модель необхідно запускати в уповільненому режимі, наприклад якщо необхідно відстежити зміни багатьох параметрів протягом заданого інтервалу часу. Для цього є можливість запуску експерименту в уповільненому режимі.

Застосування на ІМСР методів напівнатурного моделювання дає ряд переваг, серед яких:

- висока достовірність одержуваних результатів і можливість завдання найважливіших для випробування виробу умов;
- можливість лабораторних випробувань виробу та його макетних зразків на ранніх стадіях розробки виробу, що дозволяють аналізувати різні алгоритми обробки сигналу;
- можливість організації граничних експериментів, що практично не реалізуються в реальних умовах;
- скорочення термінів натурних випробувань.

Напівнатурне моделювання здійснюється за допомогою імітаторів, об'єднаних в мережі в

єдиний комплекс з математичною моделлю руху цілі. Завданням такого комплексу є відтворення радіосигналів, що надходять на вхід РЛС у процесі її функціонування в реальних умовах.

Для моделювання (імітації) сигналів при напівнатурному моделюванні використовуються методи фізичного та функціонального моделювання. Функціональне напівнатурне моделювання за сучасного рівня розвитку обчислювально-інформаційної та мікропроцесорної техніки дозволяє моделювати роботу РЛС у масштабі реального часу.

При інтеграції сторонніх імітаторів необхідно досліджувати їхні програмні середовища, а стенд повинен мати можливість роботи з різними програмними середовищами, використовуючи вбудовані пристрої узгодження. Імітатори можуть підключатися до центральної системи моделювання стенду через інтернет або через спеціальні інтерфейси, такі як Reflective Method.

Крім того, в мережі імітаторів, об'єднаних в єдиний комплекс, підтримується рефлексивна пам'ять. Рефлексивна пам'ять — це засіб детермінованого обміну загальними даними між різними та незалежними системами [16]. Системи, що використовують загальну рефлексивну пам'ять, утворюють мережу рефлексивної пам'яті, яка є детермінованою, і коли будь-яка система мережі отримує дані та записує їх у свою локальну пам'ять, то такі дані записуються локально в усі інші системи. Усі імітатори комплексу повинні мати інтегровані програми тестування для всіх ієрархічних рівнів.

Важливим елементом комплексу є автоматизовані робочі місця (АРМ) розробників. АРМ комплексу повинні використовувати сучасні комп'ютерні технології побудови та передбачати місце Головного конструктора (ГК) та розробників окремих систем. АРМ виконують функцію управління та конфігурування системи, контролю даних, виконання тестів, а також розробки та налагодження програм користувача системи. Усі АРМ комплексу об'єднуються у спільну мережу та мають можливість доступу до об'єктів випробувань. З АРМ ГК здійснюється керування всім комплексом, вибір об'єктів дослідження, вибір типів та режимів випробувань, вихідних даних,





Рис. 6. Загальний вигляд ЦКДЗ

візуальний контроль відпрацювання на всіх етапах розробки та випробувань та ін. Розрахований на багато користувачів інтерфейс дозволяє одночасно працювати великій розподіленій команді розробників. Всі АРМ повинні мати вбудований контроль підключень та конфігурацій ПЗ, автоматизоване введення та виведення даних у вигляді різних звітів, документування результатів.

Важливо, що значна частина апаратури вироблених та модернізованих виробів РЛС нового покоління є уніфікованою. Відповідно у процесі створення та модернізації РЛС можна використати уніфіковане обладнання стендових випробувань, яке при відпрацюванні наступного виробу у разі потреби доукомплектується лише оригінальною (не уніфікованою) апаратурою даного виробу, а у відпрацюваннях може використовуватися як уніфікована, так і оригінальна апаратура.

В останні роки у технічно розвинених державах світу приділяється велика увага застосуванню принципів мережецентризму у нових зразках. Основною ідеєю при цьому є інтеграція всіх сил та засобів у єдиному інформаційному просторі, що дозволяє багаторазово збільшити ефективність їхнього застосування за рахунок синергетичного ефекту. Явище мережецентризму насамперед пов'язане не з новими зразками озброєння та військової техніки, а з їхнім програмним забезпеченням, тобто з інформаційними технологіями, які дозволяють об'єднати у єдину систему різноманітні і різновидові об'єкти. Мережецентричність є такою властивістю системи, коли інформація, використовувана разом усіма її компонентами, надається своєчасно і «безшовно». Мережецентричність до-

зволяє встановити режим ситуаційної поінформованості завдяки формуванню єдиного для всіх об'єктів цілісного інформаційного середовища і включенню у процес безперервної її актуалізації якомога більшої кількості джерел первинної інформації. До складу системи контролю і аналізу космічної обстановки входять різноманітні самостійні джерела інформації, які працюють у локальних інформаційних середовищах. У складі СКАКО діють радіолокаційні, оптичні, радіотехнічні та програмно-апаратні комплекси. На рис. 6 та 7 приведено загальний вид комплексу центру космічних досліджень та зв'язку (ЦКДЗ) і квантово-оптичної станції «Сажень-С» та антенної системи ППІ-137Д відповідно.

Об'єкти наземної космічної інфраструктури належать також і до інших міністерств та відомств України. Наприклад, засоби Української мережі оптичних спостережень та Української мережі станцій лазерної локації супутників є засобами різної відомчої належності [9].

Для підвищення ефективності та забезпечення відповідності сучасним вимогам Національним центром управління та випробувань космічних засобів (НЦУВКЗ) провадиться системна модернізація наявних та розробка нових радіолокаційних систем. Так, наукове дослідження [11], що враховувало рівень витрати технічного ресурсу РЛС 5Н86, дозволило розробити технологію відновлення працездатності шляхом переведення конструктивно-схемної побудови на перспективну елементну базу провідних світових розробників. Дуже важливо, що технологія переведення зберігає повну взаємозамінність, забезпечуючи вищі характеристики РЛС за мінімальних матеріальних витрат. Проведені роботи зі створення радіотелескопа РТ-32 на базі антенної системи MARK-4В дозволяють отримати основні параметри та основні технічні і експлуатаційні характеристики радіотелескопа, які не поступаються світовим аналогам [12, 13].

Необхідна розробка моделі інформаційної взаємодії та автоматизованого використання інформації та управління просторово рознесених інформаційних систем [3]. Головною задачею розвитку вітчизняної СКАКО є об'єднання засобів різної відомчої належності у цілісну систему,



Рис. 7. Квантово-оптична станція «Сажень-С» (ліворуч) та антенна система ППІ-137Д (праворуч)

і можливим інструментом може бути імітаційно-апаратний моделювальний комплекс. Для цього до наявних імітаційних моделей стану необхідно приєднати розроблені аналогічні моделі нових систем, що дозволить збудувати модель взаємодії та управління усією інтегрованою системою.

Щодо створення мережецентричної системи СКАКО, потрібна розробка низки технологій, де першочерговими мають бути:

- технології інтеграції різних засобів і систем збору інформації, що працюють на різних фізичних принципах у різних діапазонах довжин хвиль, у єдину інтегровану базу даних;
- технології багатоканальної цифрової обробки радіолокаційних сигналів та інформації;
- технології створення надширококутних та супершвидкісних ліній систем передачі даних та зв'язку.

Водночас у науково-методичному плані поки що немає відпрацьованих, перевірених на практиці та досить ефективних методів і способів ідентифікації цілей, об'єднання та ототожнення різнорідних даних, створення єдиного інформаційного поля, які б забезпечували і високу ймовірність виявлення кожної цілі, низькі ймовірності помилкової тривоги та пропуску реальних цілей.

Створення мережецентричної системи з урахуванням стану наявних систем СКАКО та на-

уково-технічного доробку у промисловості та науці є складною комплексною науково-технічною задачею, вирішення якої неможливе без активної участі НАН України, міністерств та відомств сектору безпеки і оборони, науково-дослідних організацій Міністерства освіти та НЦУВКЗ Державного космічного агентства, рішення якої дозволить встановити режим ситуаційної обізнаності та інтеграції до європейської системи контролю космічного простору (SSAP — Space Situational Awareness Programme). Практичне вирішення питань щодо створення мережецентричної системи вітчизняними розробниками та виробниками може бути тільки у разі постановки такого питання.

На етапі формування вітчизняної СКАКО ведеться вивчення системних підходів побудови аналогічних систем, зокрема й європейської, розгляд функціональних вимог до складу коштів і розв'язуваних завдань. Важливим завданням формування вітчизняної СКАКО є ретельне дослідження можливостей інтеграції наявних коштів у єдину інформаційну систему з огляду на сучасні тенденції побудови таких систем.

Одним із напрямків використання ІМСР є авторський супровід у процесі постійної експлуатації. Ефективне вирішення пов'язаних з цим питань можна забезпечити на основі постійного моніторингу стану системи, збору об'єктивної

статистики щодо поведінки комплексів у різних режимах функціонування та організації оперативного аналізу непередбачуваних ситуацій.

Стенд повинен містити модель надійності СТС, завдяки якій реєстрація та накопичення реальних потоків відмов на різних рівнях стає об'єктивним засобом оцінки надійності. При наявності потужних ЕОМ для обробки поточних даних можна побудувати модель поточної надійності кожного елемента, ФЗС і РЛС в цілому.

Додатковий напрямок використання стенду розробника СТС пов'язаний з можливостями навчання спеціалістів для обслуговування РЛС на об'єкті експлуатації. Цей напрямок особливо актуальний на початковій стадії освоєння РЛС, коли найбільш кваліфіковане навчання може здійснити тільки розробник системи. Для цього у базі програм є можливість вибору програм навчання відповідно до заданих сигнально-перешкодних обстановок. Стенд дозволяє здійснювати тренування та навчання персоналу, надаючи керівнику право дистанційного доступу, але лише до програм, що відповідають встановленим варіантам функціонування РЛС. Стенд надає розробнику можливість здійснення оцінювання основних характеристик РЛС, формулюючи ряд сценаріїв навчання, зокрема і граничних, аналізуючи дії персоналу та характеристики функціонування РЛС у цьому варіанті. Отримані результати в ході тренувань документуються та зберігаються у стенді, що дозволяє розробнику проводити аналіз допущених помилок, отримувати реальні оцінки виконання цільових функцій та за необхідності розробляти необхідні способи поліпшення характеристик РЛС.

Для створення реконфігурованої архітектури стенду доцільно використовувати програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС, PLD). Програмована логіка, що виникла протягом кількох останніх десятиліть, дедалі активніше використовується під час реалізації всіх без винятку радіоелектронних систем. Сучасний рівень виробництва ПЛІС відповідає технології 0.22 мкм, що дозволяє використовувати робочу частоту до 300 МГц та збільшити кількість еквівалентних логічних вентилів у схемі до 3...10 млн (фірма «Xilinx»). Як тільки до високої швидкодії ПЛІС додалося ще наднизьке енергоспоживання, стало можливим їхнє використання для реалізації складних інтелектуальних систем. Застосування однієї ПЛІС еквівалентно застосуванню від 8...10 до 50...70 мікросхем середнього ступеня інтеграції. При цьому завдяки зменшенню розмірів корпусів мікросхем значно зменшуються всі економічні характеристики (розміри, маса, габарити, енергоспоживання), суттєво скорочується довжина міжз'єднань і, як наслідок, значно збільшується надійність пристроїв. Для скорочення термінів та витрат на проектування, а також для підвищення можливості експериментального налаштування апаратури доцільно розробляти стенд на основі ПЛІС.

## ВИСНОВКИ

У сучасних умовах комплексні випробувальні моделювальні стенди є ефективним засобом прискорення робіт з розробки, налагодження та впровадження складних технічних систем, інструментом скорочення матеріальних витрат, а також підвищення якісних характеристик формування параметрів нових та модернізованих виробів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Голкін Д. В., Присяжний В. І., Варакута В. П., Худов Г. В. та ін. Особливості застосування космічних систем спостереження для раннього попередження про повітряний напад. *Системи озброєння і військова техніка*. 2006. № 1 (5). С. 36—40.
2. Грызло А. А., Гриб Д. А., Лещенко С. П. Анализ опыта построения имитационных комплексов. *Системи обробки інформації*. 2006. Вип. 5 (54). С. 17—24.
3. Додонов А. Г., Путятин В. Г., Валетчик В. А. Модель взаимодействия пространственно-разнесенных бортовых информационно-управляющих систем. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2004. 6, № 4. С. 75—84.
4. *Концепція реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року*. К.: ДКА України, 2012. 48 с.
5. Кострицкий В. К. *Несекретно о совершенно секретном*. Днепропетровск, 2013. 658 с.
6. Лаврич Ю. Н. Особенности научного обеспечения создания перспективных образцов радиоэлектронной аппаратуры. *Наука та інновації*. 2018. 14, № 1. С. 15—25.



7. Лаврич Ю. М., Бистров М. І., Присяжний В. І., П'яковський Д. В. Реалізація технології подвійного використання засобів контролю космічного простору. *Космічна наука і технологія*. 2023. **29**, № 4. С.127—140.
8. Лаврич Ю. М., Плаксін С. В., Погоріла Л. М., Бистров М. І. Деякі особливості прикладної надійності РЛС ККП. *Космічна наука і технологія*. 2021. **23**, № 3. С.13—26.
9. Присяжний В. І., Яцків Я. С. Про співпрацю Національної академії наук України і Державного космічного агентства України зі створення системи контролю та аналізу космічної обстановки. *Вісн. Нац. академії наук України*. 2021. № 12. С. 85—89.
10. Присяжний В. И., Прибылев Ю. Б., Левенко А. С., Паук О. Л. Перспективы воздушно-космической обороны современной Украины. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2014. № 3 (21). С. 102—106.
11. *Розробка технології відновлення працездатності радіоелектронної апаратури шляхом розробки аналогу виробу, що відмовив. Цифрові комірки 2ТЯ*: Науково-дослідна робота. Київ: Ін-т транспорт. систем і техн. НАН України, 2023. 600 с.
12. Ульянов О. М., Резниченко А. М., Присяжний В. И., Мамарев В. Н., Ожинский В. В. и др. Создание радиотелескопа RT-32 на базе антенной системы MARK-4B. 1. Проект модернизации и первые результаты. *Радиофизика і радіоастрономія*. 2019. **24**, № 2. С. 87—116.
13. Ульянов О. М., Резниченко А. М., Присяжний В. И., Мамарев В. Н., Ожинский В. В. и др. Создание радиотелескопа RT-32 на базе антенной системы MARK-4B. 2. Оценка возможности проведения спектральных наблюдений радиоастрономических объектов. *Радиофизика і радіоастрономія*. 2019. **24**, № 3. С. 163—183.
14. Чумак Б. О., Кулагін К. К., Солонець О. І. Проблемні питання щодо створення вимірально-обчислювального комплексу подвійного призначення. *Зб. наук. праць III Укр. конф. користувачів аерокосмічної інформ.* 2000. С. 100—101.
15. AN/PLM-4 Radar Signal Simulator (RSS) – ITT Exelis Inc. URL: <http://www.exelisinc.com/solutions/AN-PLM-4-Radar-Signal-Simulator/Pages/default.aspx> (Last accessed: 27.05.24).
16. Baek J. A survey on Reflective Memory Systems. *Proc. 15th CISL Winter Workshop* (February 2002, Kushu, Japan). URL: <http://www.exelisinc.com/solutions/AN-PLM-4-Radar-Signal-Simulator/Pages/default.aspx> (Last accessed: 27.05.24).
17. Lavrich Yu. M., Plaksin S. V., Pogorila L. M. Innovative technologies for perspective information systems. *Science and Innovations*. 2022. **18**, № 4. P. 106—119.

## REFERENCES

1. Holkin D. V., Prysiazhnyi V. I., Varakuta V. P., Khudov H. V. та in. (2006). Osoblyvosti zastosuvannya kosmichnykh system sposterezhenia dlia rannioho poperedzhennia pro povitrianyi napad. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, № 1 (5), 36—40.
2. Hryzlo A. A., Hryb D. A., Leshchenko S. P. (2006). Analiz opyta postroeniia imitatsionnykh kompleksov. *Systemy obrobky informatsii*, vyp. 5 (54), 17—24.
3. Dodonov A. H., Putiatyn V. H., Valetchuk V. A. (2004). Model vzaimodeistviiia prostranstvenno-raznesennykh bortovykh informatsionno-upravliaiushchikh system. *Reiestratsiia, zberihannia i obrobka danykh*, **6**, № 4, 75—84.
4. *Kontseptsiia realizatsii derzhavnoi polityky u sferi kosmichnoi diialnosti na period do 2032 roku*. K.: DKA Ukrainy, 2012. 48 p.
5. Kostrzhitskyi V. K. (2013). *Nesekretno o sovershenno sekretnom*. Dnepropetrovsk, 658 p.
6. Lavrych Yu. N. (2018). Osobennosti nauchnoho obespecheniia sozdaniia perspektivnykh obraztsov radyoelektronnoi apparatury. *Nauka ta innovatsii*, **14**, № 1, 15—25.
7. Lavrych Yu. M., Bystrov M. I., Prysiazhnyi V. I., Piaskovskiy D. V. (2023). Realizatsiia tekhnologii podviinoho vykorystannia zasobiv kontroliu kosmichnoho prostoru. *Kosmichna nauka i tekhnologiiia*, **29**, № 4, 127—140.
8. Lavrych Yu. M., Plaksin S. V., Pohorila L. M., Bystrov M. I. (2021). Deiaki osoblyvosti prykladnoi nadiinosti RLS KKP. *Kosmichna nauka i tekhnologiiia*, **23**, № 3, 13—26.
9. Prysiazhnyi V. I., Yatskiv Ya. S. (2021). Pro spivpratsiu Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy i Derzhavnoho kosmichnoho ahentstva Ukrainy zi stvorennia systemy kontroliu ta analizu kosmichnoi obstanovky. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, № 12, 85—89.
10. Prysiazhnyi V. Y., Prybylev Yu. B., Levenko A. S., Pauk O. L. (2014). Perspektivy vozdušno-kosmicheskoi oborony sovremennoi Ukrainy. *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*, № 3 (21), 102—106.
11. *Rozrobka tekhnologii vidnovlennia pratsezdatnosti radioelektronnoi aparatury shliakhom rozrobky analohu vyrobu, shcho vidmoyv. Tsyfrovii komirky 2TIA*: Naukovo-doslidna robota. Instytut transportnykh system i tekhnologii NAN Ukrainy, 2023. 600 s.
12. Ulianov O. M., Reznichenko A. M., Prysiazhnyi V. Y., Mamarev V. N., Ozhynskiy V. V. i dr. (2019). Sozdanie radioteleskopa RT-32 na baze antennoi systemy MARK-4B. 1. Proekt modernyzatsiy i pervye rezultaty. *Radiofizyka i radioastronomiia*, **24**, № 2, 87—116.



13. Uliyanov O. M., Reznichenko A. M., Prisyazhnyi V. Y., Mamarev V. N., Ozhynskiy V. V. i dr. (2019). Sozdanie radioteleskopa RT-32 na baze antennoi systemy MARK-4B 2. Otsenka vozmozhnosti provedeniya spektralnykh nabliudeniya radioastronomicheskikh ob'ektov. *Radiofizyka i radioastronomiia*, **24**, № 3, 163—183.
14. Chumak B.O., Kulahin K. K., Solonets O. I. (2000). Problemni pytannia shchodo stvorennia vymiriuvanno-obchysliuvannoho kompleksu podviinoho pryznachennia. *Zbirnyk naukovykh prats III Ukrainskoi konferentsii korystuvachiv aerokosmichnoi informatsii*. K., 100—101.
15. AN/PLM-4 Radar Signal Simulator (RSS) — ITT Exelis Inc. URL: <http://www.exelisinc.com/solutions/AN-PLM-4-Radar-Signal-Simulator/Pages/default.aspx> (Last accessed: 27.05.24).
16. Baek J. (2002). A survey on Reflective Memory Systems. *Proc. 15th Cisl Winter Workshop* (February 2002, Kushu, Japan). URL: <http://www.exelisinc.com/solutions/AN-PLM-4-Radar-Signal-Simulator/Pages/default.aspx> (Last accessed: 27.05.24).
17. Lavrich Yu. M., Plaksin S. V., Pogorila L. M. (2022). Innovative technologies for perspective information systems. *Science and Innovations*, **18** (4), 106—119.

Стаття надійшла до редакції 27.05.2024

Після доопрацювання 09.07.2024

Прийнято до друку 09.07.2024

Received 27.05.2024

Revised 09.07.2024

Accepted 09.07.2024

V. I. Prisyazhnyi, Ph. D. in Tech. Sci., Associate Prof., Laureate of the State Prize of Ukraine in the field of science and technology, Head of the National Center for Control and Tests of Space

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7825-9037>

E-mail: vip.17071957@gmail.com

National Space Agency

8, Knyaziv Ostrozkih Str., Kyiv, 01010 Ukraine

## DESIGN OF TECHNICAL SYSTEMS USING SIMULATION-HARDWARE MODELING COMPLEXES

**Context.** Radar means of space control are large science-intensive technical systems. The development of the new generation of radar stations is a complex process related not only to the search for new technical solutions and technologies but also to the assessment of their effectiveness in terms of parameters and cost.

The domestic school of designing and creating space control systems has great scientific and technical potential, which allows the development of promising radars. However, the development of such systems is carried out with the exception of several stages, which are established according to the regulatory procedure, since the creation of functionally finished systems and the system as a whole is possible only at the exploitation place, therefore the manufacturing process is started immediately. The bench equipment used for product testing due to its monofunctionality cannot provide the verification of functionally finished systems.

Ensuring the effective implementation of the objective functions requires a long and expensive process of finding new circuit solutions using the developed equipment as a test bench, which consumes its resources. Solving the problem is possible only by creating a tool that would allow the developer to conduct the entire list of tests of the entire system hierarchy directly during the development process. Such a tool can be created using simulation-hardware modeling complexes.

**Objective.** The goal of the work is to study the possibility of developing simulation-hardware modeling complexes for testing prospective science-intensive complex technical systems.

**Method.** The method of imitation and semi-natural modeling is used.

**Results.** The main methods of building a simulation-hardware complex have been developed and the possibility of using simulation tools, models, and standard technological radar equipment to form its architecture has been substantiated. It is shown that the creation of new complexes can be based both on the use of already existing systems in the operational radar and on the development of new elements.

**Conclusions.** The presence of scientific and technical development and practical experience of the domestic developer of the space control radar makes the implementation of the new complex quite realistic, and the implementation of the test technology and practice using the simulation hardware complex will allow to reduce the total development costs.

**Keywords:** large technical systems, radar stations, simulation, model, simulation-hardware complex.