

## ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВА ТЕХНІКА

УДК 681.51:007.52

**В.В.Чепкій<sup>1</sup>**, к.т.н., доц.**В.В. Скачков<sup>1</sup>**, д.т.н., проф.**О.М. Єфимчиков<sup>1</sup>**, к.т.н., доц.**О.Д. Єльчанінов<sup>2</sup>**, к.т.н., доц.**А.С. Дудуш<sup>3</sup>**, к.т.н.<sup>1</sup> Військова академія (м. Одеса), Україна<sup>2</sup> Національна академія Національної гвардії України, м. Харків<sup>3</sup> Харківській національній університет Повітряних Сил імені І. Кожедуба, Україна

### КОНЦЕПТУАЛІЗАЦІЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ МОДЕЛІ ІНТЕГРАЛЬНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ «НАЗЕМНИЙ РОБОТОТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС – НАДСИСТЕМА – ПРОБЛЕМНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ЕКСПЛУАТАЦІЇ»

Досліджується конфігурація взаємодії «наземний робототехнічний комплекс (РТК) – надсистема – проблемне середовище експлуатації» як «об'єкт-система». Системно-цілісне представлення інформаційно-технологічних процесів в компонентах заявленої моделі здійснюється на основі концептуального підходу. Завдяки цьому відбувається осмислення знань предметної області інтегральної конфігурації, поєднуються її декларативна і процедурна форми. Останні дозволяють наближено описати інтегральну складність динамічної організації інформаційної взаємодії компонентів РТК в середовищі експлуатації, схематизувати зв'язки понять, відносини, механізми управління, які відображують тенденції референтного поля «об'єкта-системи». За цієї дескрипції формуються концептуальні специфікації предметної області інтегрального «об'єкта-системи», розробляються логічна структура, змістовна модель та блок-схема заявленої конфігурації, а також скоректовано цільові і поведінкові функції компонентів наземного РТК, задано критерії оцінки ефективності функціонування наземного РТК в проблемних ситуаціях і неорганізованих середовищах.

**Ключові слова:** концептуалізація, предметна область, метрика, наземний робототехнічний комплекс, проблемне середовище, модель адаптивного управління, критерій ефективності.

#### Постановка проблеми. Аналіз останніх досягнень і публікацій

Багатопредметність, гетерогенність та полісистемність модельної конфігурації «наземний РТК – надсистема – проблемне середовище експлуатації» обумовили складність інтегрування заявлених компонентів у цілісний образ «об'єкт-система» [1-4]. Інтегральна складність останнього є предметом міждисциплінарних досліджень, методологічною преамбулою для яких можуть служити стратегії тріадного представлення процесу технологічної взаємодії, науково-технічної раціональності, енергоінформативної інваріантності та інформаційної взаємодії в умовах апріорної невизначеності [5, 6]. Утворюючи органічний базис для системного аналізу в сфері теоретичної робототехніки та її додатків, такі стратегії припускають формування концептуального ядра, здатного надати розрізненням між собою галузям наукового знання властивості цілісності [1, 3].

Представляючи розгорнуту систему ключових положень, що визначає загальну спрямованість і спадкоємність дослідження, концептуальне ядро являє собою конструктивну модель для дескрипції, формалізації та систематизації знань предметної області інтегральної конфігурації інформаційно-технологічної взаємодії наземного РТК з надсистемою за призначенням в умовах проблемного

середовища експлуатації. В більшості публікацій з робототехнічної тематики така модельна інтенція, зазвичай, стосується лише окремих об'єктів роботизації, базових компонентів, неконфліктних середовищ експлуатації та результатів оцінювання їх за різними критеріями ефективності. Разом з тим, в деяких статтях [3, 7, 8] ставились питання та висловлювались ідеї стосовно формування концептуального ядра як інтегральної (міжпредметної) платформи. Більш того, в ряді наукових робіт [4, 5, 8, 9] були висунуті гіпотетичні припущення відносно евентуальності інтеграційних процесів, здатності їх утворювати нові інформаційно-технологічні простори взаємодії ієрархічних структур, встановлювати точки біфуркації, породжувати властивості нетипові для окремих зразків наземних робототехнічних комплексів. Поточне аналітичне дослідження, зміст якого оголошено в заголовку роботи, спрямоване на визначення програми реалізації анонсованих заяв і гіпотетичних припущень на практиці. Основу такої програми складає модернізована під нестандартні задачі військової робототехніки парадигма концептуалізацій. Концептуалізація в модельному інструментарії розробки міжпредметної платформи для «об'єкта-системи» є першою теоретичною формою процесу осмислення знання предметної області задекларованого варіанта інтегральної конфігурації [3, 7, 9].

**Мета дослідження** – концептуалізація інтегрального представлення предметної області в модельній конфігурації «наземний РТК – надсистема – проблемне середовище експлуатації».

### Постановка задачі

Прийняте рішення на досягнення оголошеної мети базується на розумінні предметної області, як кола наукових інтересів, що характеризується визначеною множиною об'єктів дослідження, методами та інструментами концептуального проектування та заданими класами розв'язуваних задач. Предметна область проекту інтегрування наземного РТК в надсистему спеціального призначення за складних умов експлуатації вивчає клас конфліктних інформаційно-керованих систем взаємодії (КІКСВ). В таких системах функціональні завдання РТК пов'язані з боротьбою за точність, достовірність, повноту та своєчасність отримання інформації щодо поточного стану сил і засобів з обох сторін конфлікту. Представлена на рис. 1 логічна структура КІКСВ інтерпретує процес осмислення – концептуалізацію предметної області заявленої конфігурації. В логічній структурі КІКСВ наземний РТК розглядається як інтегрована складова, що належить до класу інформаційно-керованих систем з рефлексією [10-12]. В умовах інформаційного протистояння останні можуть цілеспрямовано впливати на системи рефлексії противника з метою її спотворення, направлення за вигідним для себе варіантом розвитку або виключення з процесу протидії.

В контексті формулювання задачі важливо визначитись з метрикою – функцією, що встановлює відстань в метричному просторі КІКСВ [2]. Введення адекватних метрик означає створення абстрактної моделі властивостей РТК, наближення її до істинної геометрії «об'єкта-системи», спрощення процедури опису основних властивостей моделі. Виходячи з такої логіки пропонується:

- в ході системного опису прийому і обробки сигналів, що надходять від джерел електромагнітних випромінювань та звукових хвиль, використовувати геометричну метрику;
- під час опису процесів експлуатації ввести функціональну метрику, яка використовує автономний час та електричні величини: струм, напруга, потужність, частота, фаза та інші;
- в процесі опису цілеспрямованої поведінки наземного РТК з метою досягнення заданого критерію (цільової функції) вибирати метрики ефективності [2];
- за інформаційного підходу до опису апріорної невизначеності в задачах оптимізації складних систем впроваджувати ентропійну метрику [13, 14, 15];
- за опису тактико-технічних властивостей інтегрованого РТК застосовувати просторово-часову метрику: автономний час роботи; параметри спланованих маршрутів, трас, карт місцевості, температурних полів, які характеризують розміри, форму, структуру реального середовища.

Інтегральна складність статичної та динамічної організації КІКСВ вимагає дескрипції «об’єкта-системи» та базових компонентів його на двох рівнях концептуалізації:

- на модельному рівні концептуалізації – опис інтегральних властивостей (ступеню невизначеності) КІКСВ зводиться до подання реальних і уявних його компонентів спрощеними або евристичними моделями – моделями четвертого, п’ятого типу за класифікацією Пайерлса [2]. Формування цих моделей здійснюється на підставі експериментальних даних, апарату виявлення і моделювання закономірностей, що впливають із процесів спостереження та випробування;
- на формалізованому рівні концептуалізації – опис поточного стану КІКСВ, включаючи усі типи невизначеності, здійснюється за допомогою точних або наближених математичних засобів.

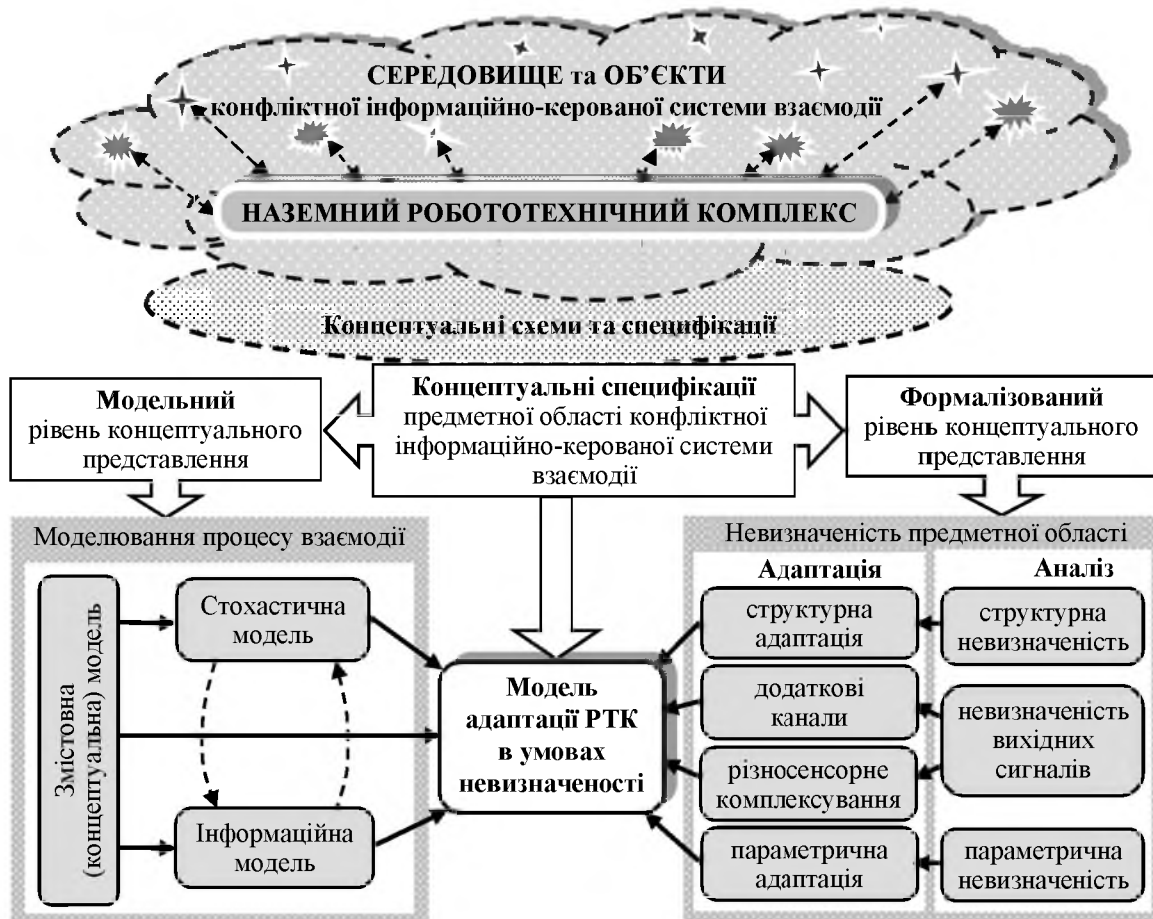


Рис. 1. Логічна структура конфліктної інформаційно-керованої системи взаємодії

Зазначені рівні концептуалізації в межах структури логічних формалізмів надають можливість: виявити структуру предметної області моделі занотованої інтегральної конфігурації, уточнити цільові функції надсистеми за призначенням, визначити поведінкові характеристики наземного РТК, сформувати концептуальну схему та вибрати критерії оцінки ефективності функціонування наземного РТК в проблемних ситуаціях та неорганізованих середовищах.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Змістова частина даної роботи складається із завдань наступної спрямованості:

- докладання концептуального підходу до складання простору зовнішніх та внутрішніх метрик ефективності функціонування наземного РТК в конфліктній інформаційно-керованій системі взаємодії, визначення глобального та локального критеріїв оцінки ефективності;
- застосування модельного рівня концептуалізації для опису змістовної моделі «об’єкта-системи» в заявленій інтегральній конфігурації;

- використання математичної форми для опису концептуальної схеми адаптивного управління роботою РТК до вимог надсистеми та умов проблемного середовища експлуатації;
- формування концептуальних специфікацій предметної області об'єкта дослідження, формалізація та схематизація процесів взаємодії, а також розробка реального варіанту конструкції адаптивного РТК з різносенсорними каналами отримання інформації.

### 1. Концептуальний підхід до формування метричного простору та критеріїв оцінки

У вирішенні поставленої задачі концептуальному підходу належить методологічна роль. Примітність її полягає в поєднанні декларативної і процедурної форм подання міжпредметних знань теоретичної робототехніки, в можливості наближено висловлювати інтегральну складність статичної та динамічної організації функціонування і поведінки РТК в керованому просторі інформаційно-технологічної взаємодії та завдяки цьому сформуванню атрибутів предметної області, зокрема:

- концептуальну схему – абстрактну специфікацію логічної структури КІКСВ, яка представляє вихідні дані стосовно об'єктів предметної області, їхньої поведінки та обмежень цілісності. Схема описується мовою концептуального моделювання, яка визначає модель вибору оптимальних параметрів управління поведінковими функціями РТК в інтегральній конфігурації «об'єкт-система»;
- концептуальні специфікації – абстрактні представлення узагальненого знання предметної області на відповідних рівнях концептуалізації, які обумовлюють властивості об'єктів КІКСВ та їхній взаємозв'язок. Абстрактність забезпечує незалежність опису предметної області від реалізацій специфікацій та конкретних джерел вихідних даних. В поставленій задачі використовуються специфікації онтологій: метрики ефективності, критерії оцінки, показники властивостей.

Ефективність розглядається як узагальнений показник оцінювання інформаційно-технологічних процесів самої КІКСВ та порівняння однорідних систем між собою. Оптимальність поведінки наземного РТК, його здатність виконувати поставлені завдання, ступінь пристосування РТК до умов середовища КІКСВ визначається ефективністю функціонування. Зазначена комплексна властивість типова для операцій експлуатації наземного РТК і залежить від властивостей конкретного зразка РТК, цільових параметрів надсистеми та характеристик зовнішнього середовища.

Згідно логіки занотованих постулатів розробляється концептуальна схема предметної області інтегральної конфігурації «об'єкт-система». За схемою, що наведена на рис. 2, властивості наземного РТК класифікуються за належністю їх до загальносистемних, структурних та операційних груп. В контексті цих ознак вводяться зовнішня та внутрішня метрики ефективності функціонування. У загальному випадку вказані метрики вибираються за двома аспектами:

- за першого аспекту, ефективності функціонування розглядається як цільовий результат операцій у вигляді миттєвої ситуації, внутрішнього стану зразка наземного РТК, надсистеми за призначенням та умов зовнішнього середовища, що створились на момент завершення дій;
- за другого аспекту, ефективність функціонування визначається оптимальним алгоритмом взаємодії властивостей РТК, надсистеми та середовища, який забезпечує цільовий результат.

Ефективність результату операції та алгоритму забезпечення цільового результату описується векторною метрикою:  $\mathbf{e}_M = e_{рез}, e_{рес}, e_{опер}$ . Складові метрики  $e_{рез}, e_{рес}, e_{опер}$  пов'язані з показниками результативності, ресурсомісткості, оперативності (рис. 2), які відображують операції, що властиві для складних інтегральних структур КІКСВ.

Цілеспрямованість операцій в КІКСВ та оптимальність прийняття рішень стосовно умов функціонування РТК в інтегральній конфігурації визначаються глобальним критерієм ефективності:

$$J_G = \iiint J_0[G, W, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \xi(t)] p[\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \xi(t)] d\mathbf{X} d\mathbf{Y} d\xi(t), \quad (1)$$

де  $J_0(\bullet)$  – миттєва оцінка значення показника ефективності;  $G$  – область можливих рішень  $\mathbf{g}$ ;  $W$  – простір умов виконання операції  $\mathbf{w}$ , що поєднує декілька підпросторів:  $W_\xi$  – заданих заздалегідь

параметрів  $\zeta \in W_\zeta$ ,  $W_\eta$  – невідомих факторів зовнішнього середовища  $\eta \in W_\eta$ ,  $W_\xi$  – параметрів невизначеності внутрішнього стану об'єкта  $\xi \in W_\xi$ ,  $p[\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \xi(t)]$  – щільність спільного розподілу вхідних впливів  $\mathbf{X}$ , стану об'єкта роботизації  $\mathbf{Y}$  та фактору внутрісистемної невизначеності  $\xi(t)$ .

Складність вибору критерію (1) пов'язана із ієрархічною структурою КІКСВ та невизначеністю ситуації під час прийняття рішення. За таких обставин доцільно [7, 13] обмежитись миттєвою оцінкою значень показника  $J_0$ , тоді:  $J_0 \equiv J_0[G, W, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \xi(t)]$  або ввести локальні критерії. Зокрема:

- за умови недетермінованого середовища вибирається локальний критерій:  $J_L = J_L(\mathbf{g}, \zeta)$ , де  $\mathbf{g}$  та  $\zeta$  – векторні величини сукупності рішень та параметрів організованих (відомих) факторів;
- за умови конфліктного (невизначеного, детермінованого) середовища локальний критерій приймає такий вид:  $J_L = J_L(\mathbf{g}, \zeta, \eta)$ , де  $\eta$  – параметри невизначених факторів, наявність яких переводить оптимізаційну задачу у задачу прийняття рішення в умовах апіорної невизначеності.

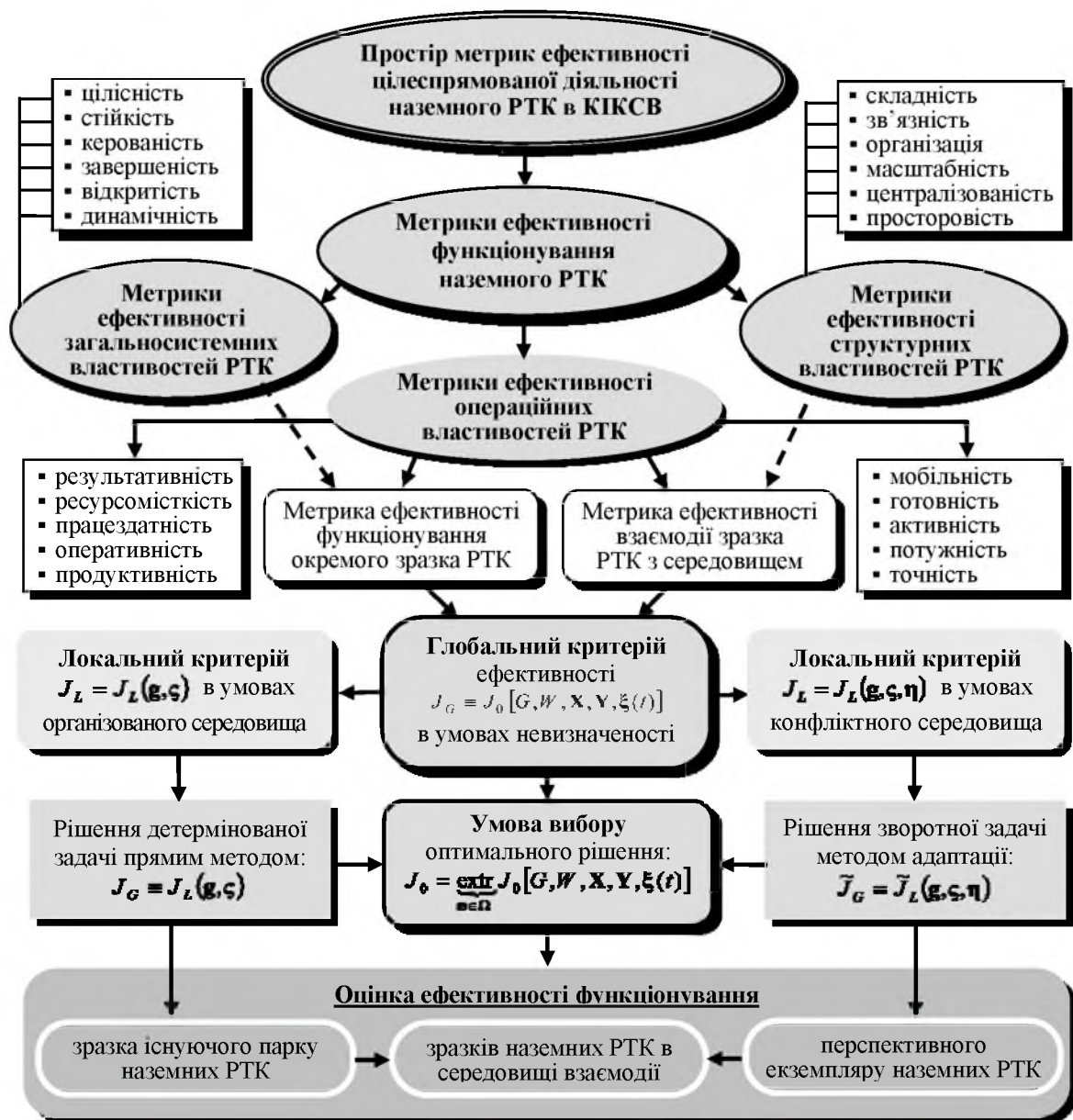


Рис. 2. Концептуальна схема оцінки ефективності функціонування наземного РТК в КІКСВ

Математичне представлення критерію ефективності визначає правило оптимального управління операцією, яке зводиться до пошуку екстремального значення цільової функції:

$$J_G \equiv J_0 = \underset{w \in \Omega}{\text{extr}} J_0[G, W, X, Y, \xi(t)], \quad (2)$$

де  $\Omega$  – множина допустимих параметрів управління  $w$ , які у відповідності до заданих обмежень визначають область можливих рішень  $G$  та простір умов виконання відповідних операцій  $W$ .

За модальності функції (2), відповідно заданих умов  $\zeta \in W_\zeta$  та урахування невідомих факторів  $\eta \in W_\eta$ , вирішення оптимізаційної задачі зводиться до пошуку правила  $g \in G$ , яке забезпечує екстремальне значення показника ефективності  $J_G$ . Механізм пошуку визначається класом задач:

– прямі задачі характерні для дослідження існуючих РТК та відповідають на питання, яким буде обраний показник ефективності  $J_G$  за прийняття конкретного рішення  $g$ , тобто пов'язані зі знаходженням наслідків відомих (заданих) причин. Прямі задачі коректні за Ж. Адамаром. Рішення цієї задачі базується на формулі (1), яка дозволяє висловити глобальний  $J_G$  або декілька локальних  $J_{L_i}$  показників ефективності через задані умови  $\zeta$  та елементи рішення  $g$ ;

– зворотні задачі властиві дослідженням перспективних зразків наземних РТК та пов'язані зі з'ясуванням причин відомих наслідків. Некоректні за Ж. Адамаром зворотні задачі виникають, якщо характеристики об'єкта недосяжні для безпосереднього спостереження. За цих обставин постає питання: як у межах заданої множини умов  $\zeta$  знайти рішення  $g = \tilde{g}$ , що наближає оцінку критеріального показника ефективності  $J_G$  до максимуму. Остання визначається таким чином:

$$\tilde{J}_G \equiv \tilde{J}_0 = \underset{\omega \in \Omega}{\max} J_0[\tilde{G}, W, X, Y, \xi(t)]. \quad (3)$$

Задача знаходження оцінки максимуму функції (3) належить до класу так званих «варіаційних» задач, які здебільшого вирішуються стандартними методами. Алгоритм пошуку максимальної оцінки критеріального показника  $\tilde{J}_G$  та пов'язаного з нею оптимального рішення  $\tilde{g}$ , вибирається виходячи з особливостей цільової функції  $J_G$  та виду обмежень, що накладаються на рішення.

Клас обмежуючих умов, так званих обмежень другого роду, утворює ситуаційна невизначеність у вигляді двох складових: апріорних даних та поточних відомостей щодо характеристик і параметрів невідомих зовнішніх факторів  $\eta$ . Невизначеність апріорних даних – ключова проблема оптимальності. Засобом подолання її виступає поточна інформація, що добувається під час спостереження або експерименту. Поточні відомості безпосередньо накопичують початкові відомості, а опосередковано знижують розмірності ситуаційної невизначеності. Як відомо [3, 6, 7, 15], ситуаційна невизначеність ускладнює процедуру оптимізації та унеможливує застосування традиційних методів рішення задачі. В класичній літературі [2, 6, 14, 15] для поповнення апріорної інформації шляхом активного використання поточної інформації рекомендовано адаптивний підхід. Останній дає потрібний результат і в умовах неясності з видом досліджуваного процесу, а також прийнятний у випадках, коли використання звичайного підходу можливе, але обмежене ресурсними витратами або ускладнене обсягом обчислень.

Характерна риса адаптивного підходу полягає в накопиченні та миттєвому використанні поточної інформації для усунення ситуаційної невизначеності з метою оптимізації показника ефективності  $J_G$ . Позитиви адаптивного підходу [14, 15] дозволяють ототожнювати процес адаптації з процесом оптимізації в умовах ситуаційної невизначеності. В значній мірі такі дії залежить від прийнятного варіанту опису ситуаційної невизначеності щодо законів розподілу ймовірностей для всіх величин, ситуацій, процесів, що відносяться до референтного поля «об'єкта-системи».

## 2. Змістовна модель адаптації РТК до вимог надсистеми та умов середовища

Згідно теореми Тюрінга інтегральна складність змістовної моделі КІКСВ буде такою ж, як і сама система. За таких обставин доцільно застосувати багатомодельний підхід, за якого формування змістовної моделі КІКСВ здійснюється за рахунок часткових моделей, кожна з яких представляє базову сторону системи. Багатомодельний підхід дозволяє виявити змістовні грані та граничні рівні абстракції операційних властивостей КІКСВ, а також шляхом декомпозиції визначити ієрархічні рівні стратифікації характеристик «об'єкта-системи» та вибирати апарат формалізації. Математична форма дескрипції операційних властивостей КІКСВ дає можливість подолати класичні протиріччя стохастичного процесу оптимізації цільової функції  $J(G, W)$  в умовах невизначеності та сформулювати модель адаптивного управління характеристиками наземного РТК.

**Методологічна проблема формування змістовної моделі.** Організація гарантованого функціонування РТК в умовах ситуаційної невизначеності визначається суперечливими вимогами стійкості та мінливості. Оптимальне співвідношення між цими вимогами відображується в структурі КІКСВ і залежить від ступеню нестационарності середовища та характеру взаємодії з ним наземного РТК. Дійсно, структура КІКСВ повинна бути одночасно і гнучкою, і стійкою за будь-якої ступені мінливості, динамічності середовища та рівня випадковості, невизначеності та антагоністичності процесу взаємодії. Очевидно, що статистична модель КІКСВ в спробі відобразити з максимальною точністю, як випадкові параметри середовища, так і випадкові параметри наземного РТК, виявляється функцією множини стохастичних змінних. Отже, основна методологічна проблема статистичної моделі КІКСВ в її багатомірності. Остання, на перший погляд, немає прийняттого рішення.

Вихід з даної ситуації пов'язаний з наявністю певних закономірностей у випадкових процесах зовнішнього середовища. Впливаючи на структуру і простір рішень КІКСВ таке середовище (дії противника) за будь-якої випадковості має певні закономірності та надмірності [14]. Надмірність, як характеристика середовища експлуатації РТК, та власна надлишковість, як внутрішня закономірність системи, відображають інваріантні характеристики КІКСВ і стійкість інтегральної конфігурації. Відповідно, процедура формування змістовної моделі КІКСВ пов'язана з рішенням багатофакторних задач в межах заданої ефективності та вирішення задачі в межах різних якісних станів:

- по-перше, з встановленням кількісних співвідношень між надмірністю середовища і здатністю систем робототехнічного комплексу виживати в цьому середовищі. Специфіка взаємодії структур КІКСВ та наземного противника на рівні потоків інформаційної невизначеності відображується інформаційною моделлю;

- по-друге, з установленням параметричної залежності між функціональною (інформаційною) ефективністю наземного РТК та витратами енергетичних ресурсів. Специфіка енергоінформаційної взаємодії наземного РТК з характеристиками надсистемою за призначення, основними параметрами зовнішнього середовищем та структури КІКСВ описується стохастичною моделлю.

**Стохастична модель.** Стохастична математична модель встановлює ймовірнісні співвідношення між входом  $\mathbf{X}$  і виходом  $\mathbf{Y}$  наземного РТК. За припущення, що  $\mathbf{X}$  – стан середовища, а  $\mathbf{Y}$  – стан РТК, як об'єкта роботизації  $\Xi$ , останній можна представити оператором перетворення  $F_{\Xi}$  стану середовища в стан об'єкта. В реальності стан наземного РТК, який представлено моделлю  $F_{\Xi}$ , змінюється під впливом вектора вхідних процесів середовища  $\mathbf{X}(t) \in \mathbf{X}$  та відображується вектором вихідних процесів  $\mathbf{Y}(t) \in \mathbf{Y}$ , як результату перетворення:

$$\mathbf{Y} = F_{\Xi}(\mathbf{X}) \Leftrightarrow \mathbf{Y}(t) = F_{\Xi}[\mathbf{X}(t)]. \quad (4)$$

Наявність випадкових чинників може породжувати наступні ситуації:

- наземний РТК описується детермінованою моделлю (4), на вхід якої надходить адитивний випадковий процес  $\mathbf{X}(t) = \mathbf{S}(t) + \boldsymbol{\eta}(t) + \mathbf{n}(t)$ , де  $\mathbf{S}(t)$  – корисний сигнал;  $\boldsymbol{\eta}(t)$  – зовнішній шумовий

процес;  $\mathbf{n}(t)$  – внутрішній шум. На виході моделі спостерігається випадковий процес (сигнал)  $\mathbf{Y}(t)$ . Модель відображає реальні фізичні процеси в усередненому значенні;

– наземний РТК представляється стохастичною моделлю, на вхід якої можуть надходити детермінований процес  $\mathbf{X}(t) = \mathbf{S}(t)$ , випадкові процеси  $\mathbf{X}(t) = \boldsymbol{\eta}(t)$  або  $\mathbf{X}(t) = \mathbf{n}(t)$ , а також їхня суміш.

На виході стохастичної моделі завжди спостерігаються випадкові процеси  $\mathbf{Y}(t)$ . Модель найбільш адекватно відображає фізичні процеси в умовах впливу зовнішніх і внутрішніх шумів.

Характеристики операційних властивостей стохастичної моделі визначаються через закони розподілення їхніх ймовірностей. За надання пріоритету стохастичній моделі доцільно враховувати:

– перше, в задачах з невисокою точністю результатів моделювання, перевага надається детермінованій моделі, як найбільш простій в реалізації і аналізі;

– друге, в задачах, коли процеси  $\mathbf{n}(t)$  сумірні з детермінованими  $\mathbf{S}(t)$ , детермінована модель недопустима, отримані результати не відповідають реальним процесам. Системотехнічні пристрої РТК, що працюють з сигналами слабкої інтенсивності, описуються стохастичними моделями;

– третє, для наземних РТК, як структурної складової КІКСВ характерна невизначеність щодо свого стану, властивостей експлуатації, змісту умов проведення операції та інше. В таких структурах стохастична невизначеність приймає форму інформаційної невизначеності, відносно якої стохастичний підхід не має канонізованих форм і засобів.

**Інформаційна модель.** Не матеріалізований прототип поведінки РТК, що вербально, графічно або знаками описує значимі для КІКСВ процеси, вхідні і вихідні дані, управляючи якими можна моделювати виклики детермінованої ситуації та оцінювати реакцію на них об'єкта дослідження. Основу інформаційної моделі складає однойменний підхід, що оперує такими категоріями як інформаційна невизначеність, ентропія, негентропія, міра інформації та інші [7]. Метричною мірою апіорного різноманіття дій (збурень середовища), що впливають на роботу наземного РТК, виступає ентропія, яка визначається співвідношенням Шеннона:  $H(\mathbf{X}) = -\sum p(\mathbf{X}) \ln p(\mathbf{X})$ ,  $p(\mathbf{X})$  – функція розподілу зовнішніх збурень  $\mathbf{X}$ . Наявність в конструкції РТК систем адаптивного управління, зменшує впливи зовнішніх збурень до величини апостеріорної (умовної) ентропії:  $H(\mathbf{X}/\mathbf{Y}) = -\sum p(\mathbf{X}/\mathbf{Y}) \ln p(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \leq H(\mathbf{X})$ . Тут  $p(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$  – розподіл зовнішніх збурень за наявності управляючих впливів;  $H(\mathbf{X})$  – апіорна (безумовна) ентропія. За такого представлення ентропійна метрика Шеннона та її модифікації визначається величиною знятої невизначеності  $I = H(\mathbf{X}) - H(\mathbf{X}/\mathbf{Y})$ .

В поточних дослідженнях ентропійна метрика  $I$  інформаційної моделі розглядається як:

– оцінка середньої кількості отриманої інформації щодо поточного стану компонентів РТК;  
 – кількісна міра ефективності системи адаптивного управління;  
 – критеріальний показник оптимальної обробки інформаційних даних та прийняття адекватного рішення щодо зменшення потоку ентропії.

Узагальнюючи сказане, слід відзначити, що застосування інформаційної моделі дозволяє:

– перевести поняття «невизначеність» з якісного на кількісний рівень з обґрунтуванням обсягу необхідної інформації для усунення ситуаційної (апіорної) невизначеності в задачах оптимізації;  
 – проаналізувати критерії ефективної роботи наземного РТК в надсистемах за призначенням;  
 – синтезувати інтегральний показник ефективності КІКСВ та правило його визначення;  
 – оцінити динаміку втрат інформації на виході структур РТК в наслідок агресивного впливу зовнішнього середовища та непереборних внутрісистемних дестабілізуючих факторів;  
 – на основі ентропійних показників якості провести порівняльний аналіз існуючих, модернізованих та новостворених структур наземного РТК, оцінити рівень взаємодії їх з параметрами надсистеми та обґрунтувати ефективність прийнятих рішення в умовах апіорної невизначеності.



**Модель адаптації РТК.** Гетерогенне представлення процесів цілеспрямованої зміни параметрів і структури РТК, яке полягає у визначенні критеріїв функціонування і виконанні їх шляхом адаптивного управління. Зобов'язання моделі адаптації РТК розглядаються за двох аспектів [14, 15]:

– за першого аспекту, як процес пристосування характеристик РТК до умов фіксованого середовища. В цьому контексті моделювання підсистеми адаптивного управління зводиться до формування алгоритму узгодження передавальних характеристик систем РТК і середовища інформаційної взаємодії. За успішного узгодження максимізується критерій ефективності  $J_G$  ;

– за другого аспекту, як процедура пошуку параметрів середовища взаємодії, адекватних операційним властивостям наземного РТК. За логікою моделювання адаптивне управління передбачає корегування передавальної характеристики зовнішнього середовища з метою максимізації критерію ефективності  $J_G$  або припускає активний пошук середовища інформаційної взаємодії, передавальна характеристика якого забезпечує оптимальний результат.

Ототожнюючи адаптацію з процесом управління, змістовна модель адаптації відображує організацію цілеспрямованого впливу на параметри і структури РТК, за якого цільова функція  $J_G$  досягає екстремуму. Зазначена модель дозволяє досліджувати наземні РТК різних поколінь [16]. В основу поточних досліджень покладена спрощена за модель адаптації як особливого типу управління наземним РТК. За визначення Я.З. Ципкіна «... процес зміни параметрів і структури системи, а можливо, і керуючих впливів на основи поточної інформації з метою досягнення певного, зазвичай, оптимального стану системи за початкової невизначеності та мінливих умов роботи» [14].

В розвиток логіки побудови спрощеної моделі створюється система управління з різносенсорними каналами  $\mathbf{D}_X$ , якими можуть бути  $\mathbf{X}$  входи наземного РТК, і каналом адаптивного управління  $\omega = \omega(\mathbf{U})$ , за допомогою якого можна впливати на стан об'єкта управління  $\Xi_\Omega$ . Окреслена конструкція визначає форму і зміст залежності  $F_{\Xi_\Omega} = F_\Xi[\mathbf{X}, \omega(\mathbf{U})]$  стану досліджуваного об'єкта  $\mathbf{Y}$  від впливу керованого  $\omega(\mathbf{U})$  та некерованих  $\mathbf{X}$  входів. На практиці залежність  $F_{\Xi_\Omega}$  є алгоритмом, вид якого з точністю до параметрів  $W_{C_\Xi}$  описує структуру  $C_\Xi$  модельного оператора  $F_{\Xi_\Omega}$ . За цією декомпозицією базовими складовими моделі  $F_{\Xi_\Omega}$  вважаються на первинному рівні параметричний підпростір  $W_{C_\Xi}(\mathbf{U})$ , а на вторинному рівні – структурний підпростір  $C_\Xi(\mathbf{U})$ . В прив'язці до вказаної ієрархії факторний простір управління  $\omega(\mathbf{U})$  природно розподіляється на два підпростори: підпростір управління структурою наземного РТК  $\omega_C(\mathbf{U})$  та підпростір управління параметрами  $\omega_W(\mathbf{U})$  цієї структури, зокрема:  $\omega(\mathbf{U}) : \{\omega_W(\mathbf{U}), \omega_C(\mathbf{U})\}$ . Зроблені уточнення дозволяють переписати вираз (4) у такому вигляді:

$$\mathbf{Y} = F_{\Xi_\Omega} [W_{C_\Xi}(\mathbf{U}), C_\Xi(\mathbf{U})] = F_\Xi [\mathbf{X}, \omega(\mathbf{U}), W_{C_\Xi}(\mathbf{U}), C_\Xi(\mathbf{U})], \quad (5)$$

де  $\mathbf{U} \equiv \mathbf{D}_X \mathbf{X}$  – вибірка реалізацій спостереження;  $F_{\Xi_\Omega}$  – модельний оператор перетворення, що враховує наявність фактору управління  $\omega(\mathbf{U}) \in \Omega$ .

Маючи в розпорядженні модель  $F_\Xi[\mathbf{X}, \omega(\mathbf{U}), W_{C_\Xi}(\mathbf{U}), C_\Xi(\mathbf{U})]$ , яка зв'язує вихід  $\mathbf{Y}$  об'єкта роботизації  $\Xi$  зі станом  $\mathbf{X}$  середовища взаємодії і оптимальними факторами управління  $\omega(\mathbf{U})$  та підставляючи (5) в (2), отримуємо вираз для функціонала глобального критерію ефективності:

$$J_G \equiv J_0 = \underset{\omega \in \Omega}{\text{extr}} J_0 \{G, W, \mathbf{X}, \xi(t), F_\Xi[\mathbf{X}, \omega(\mathbf{U}), W_{C_\Xi}(\mathbf{U}), C_\Xi(\mathbf{U})]\}. \quad (6)$$

Операторна форма (6) відображує концептуальне ядро змістовної моделі адаптивного РТК з каналом управління. Блокову конструкцію змістовної моделі утворюють модульні елементи, які за призначенням об'єднані глобальним критерієм ефективності (цільовою функцією). За логікою об'єднання модель найкраще позиціонується з блок-схемою, що наведена на рис. 3.

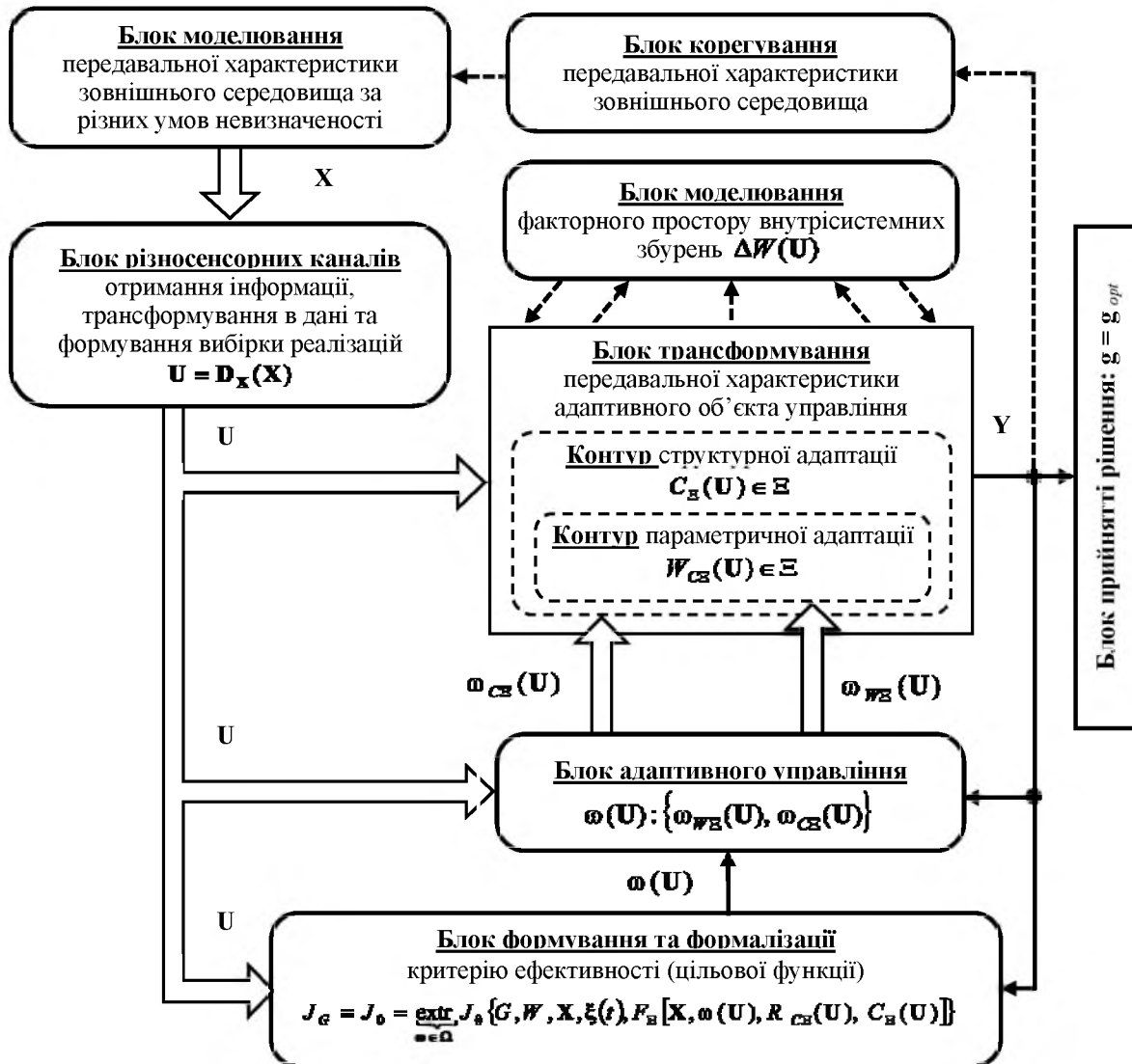


Рис. 3. Блок-схема моделі адаптації РТК до вимог надсистеми та умов середовища експлуатації

В представленій блок-схемі адаптація, як специфічний процес управління ситуацією, змодельована в декількох аспектах практичної реалізації.

За першого аспекту управління ситуацією розглядається, як цілеспрямований процес впливу на проблемне середовище експлуатації. За такого аспекту адаптація подається:

- як засіб досягнення заданої цільової функції (ланка зв'язку відображена суцільною лінією).

Дане твердження ґрунтується на розумінні того, що адаптація адекватна оптимізації в умовах зовнішньої та внутрісистемної невизначеностей. За інтервалу спостереження  $T \rightarrow \infty$  ( $T = 0$  – власне адаптація), незмінності властивостей наземного РТК, середовища його експлуатації має місце рівність  $J_G = \tilde{J}_G$ , а отже, для вирішення задачі адаптації допустимо використати методи оптимізації. Неприйнятні часові витрати можна зменшити за рахунок скорочення бази спостережень  $U(t)$ . Однак при цьому знизиться ефективність кожного кроку ітерації, оскільки оцінка  $\tilde{J}_G$  стає дуже грубою. Зниження ефективності механізмів адаптації компенсується оперативністю процедур;

– як засіб компенсації несприятливих змін у середовищі, які порушують виконання цільових умов (ланка зв'язку відображена пунктирною лінією). Дане твердження базується на формальній відмінності процедур адаптації і компенсації стосовно джерел інформації для пристрою управління. В процесі компенсації вихідною інформацією для синтезу управління  $\omega(U)$  є стан  $X$  середовища, а в ході адаптації правило управління  $\omega(U)$  синтезується на основі інформації стосовно стану  $Y$  наземного РТК. На відміну від компенсації, в алгоритмах адаптації задача оптимізації функціонала (6) вирішується за «зашумлених» реалізацій та невідомої структури функціоналів [7, 13-15].

За другого аспекту фактор адаптації моделюється ієрархічним процесом  $\omega(U) \in \Omega$  підтримання показника ефективності наземного РТК в оптимальному стані незалежно від впливів будь-яких збуджень. При цьому фізична конструкція наземного РТК накладає на процес управління вимогу  $\omega(U) : \{\omega_W(U), \omega_C(U)\}$ . Декомпозиція фактору управління  $\omega(U)$  на структурні  $\omega_C(U)$  і параметричні  $\omega_W(U)$  процеси дозволяє ефективно вирішувати задачу адаптації будь-якої складності. За такої точки зору адаптивне управління РТК здійснюється за допомогою як параметричного вектору  $W_{C\Xi} = W_{C\Xi}(U)$  – параметрична адаптація, так і структури  $C_{\Xi} = C_{\Xi}(U)$  – структурна адаптація [13, 15]. Причому, на верхньому рівні ієрархічної конструкції РТК проводиться адаптація структури  $C_{\Xi}$ , а на нижньому рівні – адаптація параметрів  $W_{C\Xi}$  цієї структури.

В модельному варіанті адаптація РТК (рис. 3) представлена двоконтурним ланцюгом управління. Кожний контур працює в різних часових режимах: темп параметричної адаптації значно вище темпу структурної. На кожен крок структурних змін об'єкта припадає весь цикл параметричної адаптації. Вибір оптимальної структури параметричного вектору  $\{C_{\Xi opt}, W_{\Xi opt}\}$  екстремізує критеріальний показник ефективності  $J_G$  незалежно від зміни ситуації.

За третього аспекту фактор адаптивного управління представляється алгоритмічним процесом функціонування РТК в «реальних» умовах середовища, коли відсутня інформація щодо моделі технологічної взаємодії. Оптимізаційна задача (6) вирішується шляхом відповідного підстроювання параметричного вектору  $W(U) = W_{C\Xi}(U)$  або структури наземного РТК за результатами спостереженнями  $U \equiv D_X X$ . Тут  $D_X = D_{X(m \times k)}$  – прямокутна  $(m \times k)$ -мірна матриця передаточних функцій каналів різносенсорних датчиків. Перетворення вимірюваних величин середовища  $X$  в форму  $U$  дозволяє сформулювати критерій ефективності  $J_G$  в термінах параметрів електромагнітних полів (сигналів), що пов'язані з вимірюваними величинами, але не тотожні їм.

Узагальнюючи сказане, важливо відзначити ключове значення поданої моделі для синтезу процесу управління  $\omega(U)$  на стадіях оптимального і адаптивного проектування. В першому випадку потрібно обчислювати функціонал  $J_G(\bullet)$ , в іншому випадку можна обмежитись оцінкою миттєвих значень  $\tilde{J}_G(\bullet) = J_0(\bullet)$ . Остання спрощує модельний варіант системи адаптивного управління РТК.

Отже, представлена змістовна (концептуальна) модель та її схематична модифікація являють собою цілісні та несуперечливі уявлення (образ) вирішення поставленої задачі адаптивного управління наземним РТК в предметній області інтегральної конфігурації «об'єкт-система». Адекватність розробленої моделі буде перевірена в подальших дослідженнях за допомогою математичних методів.

## Висновки

Викладений в статті матеріал порушує одне з ключових питань теоретичної робототехніки – синтез концептуального ядра як міжпредметної платформи для представлення загальнодоступних специфікацій предметної області «об'єкт-система» будь-якої інтегральної складності. На завершальному етапі синтезу

такого «інтегрального» ядра відбувається перетворення концептуального підходу в повноцінну концепцію шляхом формування змістовної моделі адаптації наземного РТК, яка враховує наявність і порядок використання певного ресурсу.

Інтерпретація концептуальних специфікацій предметної області конфігурації «наземний РТК – надсистема – проблемне середовище експлуатації» в подальшому дозволяє визначитись: перше, з критерієм оптимального об'єднання інформаційних потоків в ситуації надлишковості інформаційної системи датчиків РТК; друге, з базовими положеннями теорії адаптації в класі оптимізаційних задач у межах заявленої модельної конфігурації; третє, з пошуком в сукупності оптимальних алгоритмів адаптації найменш чутливих до дестабілізуючих факторів внутрісистемного походження.

### Список використаних джерел

1. Дialeктика познания сложных систем / Под ред. В.С. Тюхтина. – М.: Мысль, 1988. – 316 с.
2. Бертуланфи Л. Общая теория систем – критический обзор / Л. фон Бертуланфи // Исследования по общей теории систем: Сборник переводов / Общ. ред. В.Н. Садовского, Э.Г. Юдина. – М.: Прогресс, 1969. – С. 23–82.
3. Чепкій В.В. Стратегія технологічної інтеграції наземного робототехнічного комплексу в надсистемі спеціального призначення / В.В. Чепкій, В.В. Скачков, О.М. Єфимчиков та ін. // Зб. наук. пр. Військової академії (м. Одеса). – 2018. – Вип.1 (9). Технічні науки – С.110–121.
4. Каляев И.А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
5. Мосиенко С.А. Концепция построения наземного робототехнического ударного комплекса / С.А. Мосиенко, В.И. Лохтин. – М.: ООО Самполиграфист, 2014. – 124 с.
6. Шевко Д.Г. Адаптивное управление в условиях неопределенности / Д.Г. Шевко // Научное обозрение: технические науки. – 2016. – № 2. – С. 75–78.
7. Чепкій В.В. Синтез інтегрального показника якості адаптивної інформаційно-вимірювальної системи наземного робототехнічного комплексу / В.В. Чепкій, В.В. Скачков, О.М. Єфимчиков та ін. // Зб. наук. пр. Військової академії (м. Одеса). – 2017. – Вип.1 (7). Технічні науки – С. 108–117.
8. Гольшиев Л.К. Концептуальный подход к решению общей задачи синтеза системы стратегического управления динамическим объектом высокой сложности / Л.К. Гольшиев // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2006. – № 2. – С. 28–39.
9. Концептуальный подход к решению задач в астрономии / Н.А. Скворцов, Е.А. Аввакумова, Д.О. Брюхов та ін. // Астрофизический бюллетень. – 2016. – Том 71, № 1 – С. 122–133.
10. Воронников С.А. Интеллектуальная система управления сервисным мобильным роботом / С.А. Воронников, К.В. Ермишин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. Спецвыпуск «Робототехнические системы». – 2012. – № 6. – С. 285–289.
11. Юревич Е.И. Сенсорные системы в робототехнике: учеб. пособие / Е.И. Юревич. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 100 с.
12. Михайлов Б.Б. Автономные мобильные роботы – навигация и управление / Б.Б. Михайлов, А.В. Назарова, А.С. Ющенко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – 2 (175). – С 48–66.
13. Скачков В.В. Энтропийный подход к исследованию информационных возможностей адаптивной радиотехнической системы при внутрисистемной неопределенности / В.В. Скачков, В.В. Чепкій, Г.Д. Братченко, А.Н. Ефимчиков // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2015. – Т. 58, № 6. – С. 3–12.
14. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1968. – 400 с.
15. Растринин Л.А. Адаптация сложных систем / Л.А. Растринин. – Рига: Зинатне, 1981. – 375 с.
16. Русинов В. Состояние и планы развития наземных робототехнических комплексов США / В. Русинов // Зарубежное военное обозрение. – 2013. – №3. – С. 44–56.

## КОНЦЕПТУАЛИЗАЦИЯ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ МОДЕЛИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ «НАЗЕМНЫЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС – НАДСИСТЕМА – ПРОБЛЕМНАЯ СРЕДА ЭКСПЛУАТАЦИИ»

В.В. Чепкий, В.В. Скачков, А.Н. Ефимчиков, А.Д. Ельчанинов, А.С. Дудуш

*Исследуется конфигурация взаимодействия «наземный робототехнический комплекс (РТК) – надсистема – проблемная среда эксплуатации» как «объект-система». Системно-целостное представление информационно-технологических процессов в компонентах заявленной модели осуществляется на основе концептуального подхода. Благодаря этому происходит осмысление знаний предметной области интегральной конфигурации, сочетаются ее декларативная и процедурная формы. Последнее позволяет приблизительно описать интегральную сложность динамической организации информационного взаимодействия компонентов РТК в среде эксплуатации, схематизировать связи понятий, отношения и механизмы управления, отражающие тенденции референтного поля «объекта-системы». Исходя из этой дескрипции, формируются концептуальные спецификации предметной области интегрального «объекта-системы», разрабатываются логическая структура, содержательная модель и блок-схема заявленной конфигурации, а также скорректированы целевые и поведенческие функции компонентов наземного РТК, заданы критерии оценки эффективности функционирования наземного РТК в проблемных ситуациях и неорганизованных средах.*

**Ключевые слова:** концептуализация, предметная область, метрика, наземный робототехнический комплекс, проблемная среда, модель адаптивного управления, критерий эффективности.

## CONCEPTUALIZATION OF THE SUBJECT AREA OF THE MODEL OF INTEGRATED CONFIGURATION “GROUND-BASED ROBOTIC COMPLEX – SUPERSYSTEM – PROBLEM OPERATING ENVIRONMENT”

V. Chepkyi, V. Skachkov, O. Yefymchykov, O. Yelchaninov, A. Dudush

*The article studies the interaction configuration « ground-based robotic complex (GRC) – supersystem – problem operating environment» as «object-system». System-holistic view of information technology processes in model structures is based on a conceptual approach. The result is understanding the knowledge of the domain of the integral configuration, combination of its declarative and procedural form. This helps to approximately describe the integral complexity of the dynamic organization of information interaction of the GRC components in the operating environment, to schematize the connections of concepts, relations, control mechanisms that reflect reference field trends of the «object-system». Based on the description conceptual specifications of the subject area of the integral “object-system” are formed, logical structure, informative model and block diagram of the declared configuration are developed. Target and behavioral functions of components of the GRC are also adjusted, set criteria for evaluating the effective functioning of the GRC in problem situations and unorganized environments.*

**Keywords:** conceptualization, subject area, metric, ground-based robotic complex (GRC), problem environment, adaptive control model, performance criterion.