

І.В. Пулеко, к.т.н., доц.
О.Р. Рихальський, к.т.н., доц.
П.П. Топольницький, к.т.н., доц.
Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова
Національного авіаційного університету
В.О. Чумакевич, к.т.н., доц.
Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного

МЕТОДОЛОГІЯ СЦЕНАРНОГО АНАЛІЗУ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛІННЯ КОСМІЧНИМИ АПАРАТАМИ

В статті запропоновано методологію сценарного аналізу для вирішення завдань якісного та надійного управління космічними апаратами при дослідженні ризиків та продовженні термінів експлуатації за рахунок побудови оптимальних сценаріїв управління.

Постановка проблеми. Розробка та експлуатація сучасних складних людино-машинних систем, до яких повною мірою належать космічні системи (КС), для підвищення їх ефективності вимагає вдосконалення процесу управління, що, враховуючи складність та ймовірнісний характер зовнішніх впливів і поведінки системи, створює певну проблему управління. Зупинимось на підході вирішення даної проблеми під час організації процесу управління в космічній системі на етапі активного існування.

Загальноприйнято, що під управлінням космічним апаратом (КА) розуміється процес цілеспрямованої зміни стану КА з метою успішного виконання ним задач за цільовим призначенням [1]. Стан КА характеризується: параметрами руху, поточним значенням показників працездатності та якістю розв'язання задач бортовою спеціальною апаратурою. В основу технології управління КА покладено вирішення завдання прогнозування його руху та технічного стану у прив'язці до часу або координат місцезнаходження КА. Стан засобів наземного комплексу управління (НКУ) та наземного спеціального комплексу (НСК) характеризується поточними значеннями показників працездатності та якістю розв'язання задач наземною апаратурою.

Прогнозування руху космічного апарата, засноване на добре розроблених алгоритмах на основі вирішення диференціальних рівнянь збуреного руху КА. При цьому вплив збурюючих факторів враховується на рівні прийнятих їх моделей і принципово не може бути врахований повністю.

При аналізі, а тим більше прогнозі технічного стану КА багато факторів, що впливають на показники працездатності апаратури (які визначаються за телеметричними параметрами), або взагалі неможливо точно передбачити, або для їх оцінки використовуються наближені статистичні методи. Незважаючи на широку практику використання суто статистичних методів і наявність величезних обчислювальних потужностей, їхнє практичне застосування принципово обмежено лише випадками обробки ретроспективних даних кількісного характеру за телеметричними параметрами, що монотонно змінюються. Інакше кажучи, у разі застосування статистичних методів прогнозування відбувається описом майбутнього технічного стану, яке фактично є продовженням або екстраполяцією минулого. Ця обставина суттєво обмежує можливості зазначених методів.

При плануванні знімання району спостереження неможливо повністю автоматизувати цей процес через те, що роботу ряду складових системи управління та процесів, які в ній проходять, складно або неможливо формалізувати. Прикладами таких процесів є: врахування поточного стану атмосфери, оптимізація задіяння чергової зміни, раціональне використання ресурсу наземних та бортових технічних засобів та багато інших.

Слід також враховувати, що в Україні прийнята однопунктна технологія управління та замкнений цикл управління, що вносить додаткові часові та технічні обмеження до процесу управління КА.

Таким чином, фактично всі процеси управління КА за своєю суттю не є повністю монотонними функціями часу, можуть мати різноманітні зламо- та стрибкоподібні зміни, які пов'язані з розривами монотонності процесів і мають характер суттєво нелінійних явищ.

Тому в сучасних умовах усе актуальнішим стає нове завдання управління КА — репрезентувати майбутній стан КА, який не можна інтерпретувати як звичайне продовження минулого стану, оскільки цей майбутній стан КА може набувати принципово відмінних форм, порівняно з тим, що було відомо в минулому. Зазначена проблема дістала назву передбачення [2]. Можна вважати, що передбачення — це процес прийняття рішень для складних технічних систем із людським фактором щодо їхньої можливої поведінки в майбутньому. Такий процес зводиться до застосування окремих методів у певній послідовності із встановленням чітко визначених взаємозв'язків між ними. Він може бути сформованим за допомогою більш універсальної методології, відомої як сценарний аналіз [3, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні спроби одержати об'єктивні знання про майбутнє були пов'язані переважно з розробленням нових і застосуванням традиційних методів математики і статистики. У результаті було створено цілу групу потужних методів: метод часових рядів, регресійного аналізу, імітаційного моделювання, економетричні моделі тощо, що широко висвітлено в літературі, весь перелік якої надавати тут немає можливості. Зупинимося на джерелах, що висвітлюють останні досягнення в предметній області досліджень.

У роботі [1] детально висвітлено питання управління КА. Тут розглянуто методи прогнозування руху та планування всіх видів робіт з КА. В роботах [2, 5] надано приклади вирішення завдань прогнозування технічного стану КА, за допомогою методів кореляційно-регресійного аналізу та самонавчальних систем. Усі вони належать до класу так званих методів кількісного прогнозування і їх застосовують для приблизного «визначення» майбутньої поведінки певної змінної величини або системи взаємопов'язаних змінних величин на заздалегідь відомому часовому інтервалі.

Теоретичні основи застосування сценарного аналізу викладено в [3, 4].

Слід підкреслити, що універсальних і досконалих підходів до вирішення цієї проблеми сьогодні немає. Є лише спроби побудови можливих сценаріїв розвитку тих чи інших явищ у майбутньому. Але принципово відмінністю від попередньої практики розв'язання таких задач є те, що використовувані для цього методи мають не тільки кількісний, а й якісний характер.

Формулювання цілей дослідження. Метою даної роботи є розробка загальної методології сценарного аналізу при управлінні КА як інструмента, що використовується при системному підході до вивчення космічних систем.

Досягнення мети потребує вирішення таких завдань:

- розробки теоретичного базису методології;
- систематизації математичного апарату методу.

Суть проблеми полягає в розробці такої методології управління, що дозволяла б якісно та надійно здійснювати управління КА в умовах часткової апріорної невизначеності, мінімізувала ризики та дозволяла продовжити терміни експлуатації космічних систем за рахунок побудови оптимальних сценаріїв управління.

Одним із варіантів рішення цієї проблеми є врахування експертних оцінок на основі методології сценарного аналізу. Частково елементи даної методології використовуються вже зараз при організації управління КА у разі виникнення позаштатних ситуацій, коли для прийняття рішення застосовується Головна оперативна група управління (ГОГУ), яка складається з досвідчених фахівців з окремих видів забезпечення процесу управління КА.

Викладення основного матеріалу. Практика використання методології передбачення базується, насамперед, на застосуванні інтуїції, досвіду, знань та умінь експертів у різних предметних областях для розв'язання задач стратегічного планування і прийняття рішень. Побудову сценаріїв управління КА можна забезпечити за допомогою універсальної сукупності засобів та підходів, що носить назву методології сценарного аналізу [3]. У загальному випадку ця методологія є комплексом математичних, програмних, логічних і організаційних засобів та інструментів для визначення послідовності застосування окремих методів, взаємозв'язків між ними і взагалі формування самого процесу передбачення. Таким чином, з математичної точки зору метод сценарного аналізу – це метод декомпозиції задачі прогнозування з врахуванням експертних оцінок, що передбачає виділення набору окремих варіантів розвитку подій (сценаріїв), які в сукупності охоплюють всі можливі варіанти розвитку подій. При цьому кожен окремий сценарій повинен допускати можливість достатньо точного прогнозування, а загальна кількість сценаріїв повинна бути досягнутою. Окремою категорією сценарного аналізу, що дає змогу проводити кількісну оцінку, є ризики.

Загальна схема здійснення методології сценарного аналізу в КС при управлінні КА може бути представлена на рисунку 1.

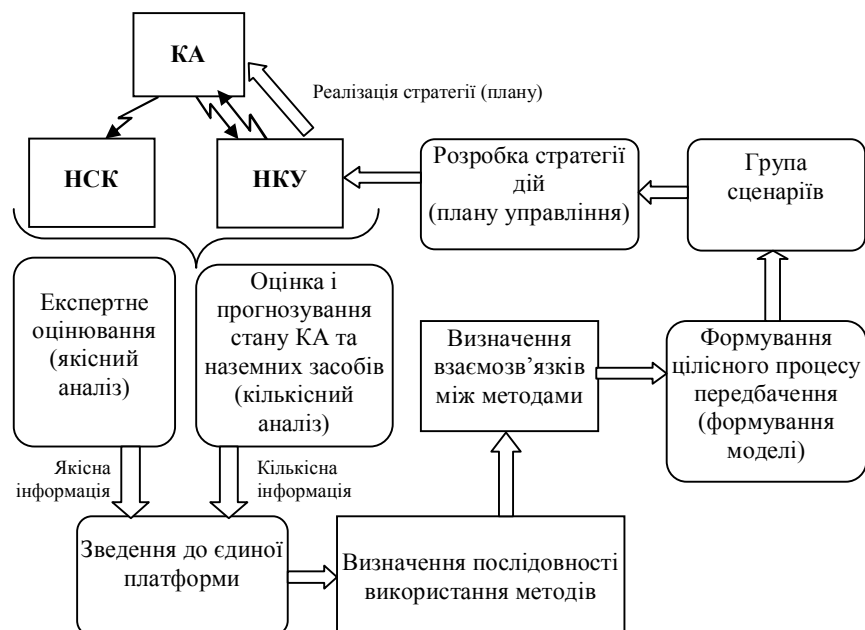


Рис. 1. Загальна схема здійснення методології сценарного аналізу в КС

Спочатку за допомогою методів якісного і кількісного аналізу вивчають проблему управління та об'єкт передбачення, виділяють можливі ризики. Об'єктами передбачення у КС

є система автоматизованого управління КА та технічні засоби НКУ і НСК. Після чого якісну та кількісну інформацію зводять до єдиної платформи. Потім визначають послідовність використання окремих методів і встановлюють взаємозв'язки між ними. Це дозволить далі сформувати цілісний процес передбачення і розробити групу сценаріїв майбутньої поведінки об'єкта передбачення (складної системи з людським фактором). Аналізуючи характеристики та особливості кожного з розроблених сценаріїв, Головна оперативна група центру управління польотом (ЦУП), що приймає стратегічні рішення, відбирає цікаві для неї сценарії, виробляє план дій щодо об'єкта передбачення і забезпечує реалізацію цього плану управління.

Під сценарієм у даній роботі будемо розуміти гіпотетично чи математично спрогнозований опис можливого стану КА та його здатності до виконання цільових задач. Досягненню цього стану КА повинна передувати реалізація певної комбінації факторів.

Реалізація методу сценарного аналізу може бути представлена у вигляді декількох етапів:

- побудова моделі досліджуваного об'єкта, виділення ключових факторів впливу та можливих ризиків, результуючих критеріїв, визначення та узгодження шкали оцінки;
- стрес-тестування отриманої моделі;
- складання та аналіз альтернативних сценаріїв на основі моделі;
- синтез оптимальних чи раціональних стратегій;
- тестування на історичних даних (бек-тестування);
- формування висновків.

Розглянемо виділені етапи сценарного аналізу.

Побудова моделі КС є одним із найбільш складних і відповідальних етапів сценарного аналізу і може розглядатися як самостійне наукове дослідження. Цей етап потребує визначення результуючих критеріїв оцінки якості роботи системи, параметрів оцінки цих критеріїв та факторів, що призводять до певного впливу на визначені критерії.

Під результуючими критеріями в сценарному моделюванні розуміється результат якого-небудь аспекту функціонування моделі, що трактується як настання ризикової події. Результуючі критерії можуть бути двох видів: настання яких-небудь негативних подій (поломка бортової апаратури, невиконання програми роботи) і не настання яких-небудь позитивних подій (не проведено зйомку, не записано на борт програми управління тощо).

Безумовно, точно виміряти вплив якого-небудь фактора на той або інший критерій моделі у зв'язку зі складністю й багатогранністю космічних систем і процесів в них є дуже проблематичним. Фахівець вимушений оперувати загальними закономірностями, відомими науці, тому ефективність сценарного аналізу багато в чому визначається професіоналізмом, ерудицією та науковою інтуїцією експерта, що складає модель.

Наступне не менш важливе питання цього етапу – визначення найбільш значущих внутрішніх і зовнішніх факторів. Складність полягає в тому, що значущість того або іншого фактора впливу статистично можна визначити лише за допомогою регресії, проте при цьому слід припустити наявність лінійної залежності між результируючими критеріями моделі і виділеними факторами, що у багатьох випадках можна зробити тільки з дуже великими допущеннями. Тому доцільніше використовувати якусь комбінацію експертних і математичних методів, де за допомогою одних визначається первинний перелік, а інших – виділяються найбільш статистично значущі фактори.

Далі для кожного виділеного фактора визначаються сценарії можливої поведінки. Всі комбінації таких сценаріїв визначають множину сценаріїв поведінки КА чи всієї КС. При побудові сценарію управління можна використати емпіричну, дев'ятикрокову процедуру [3], надану на рисунку 2.

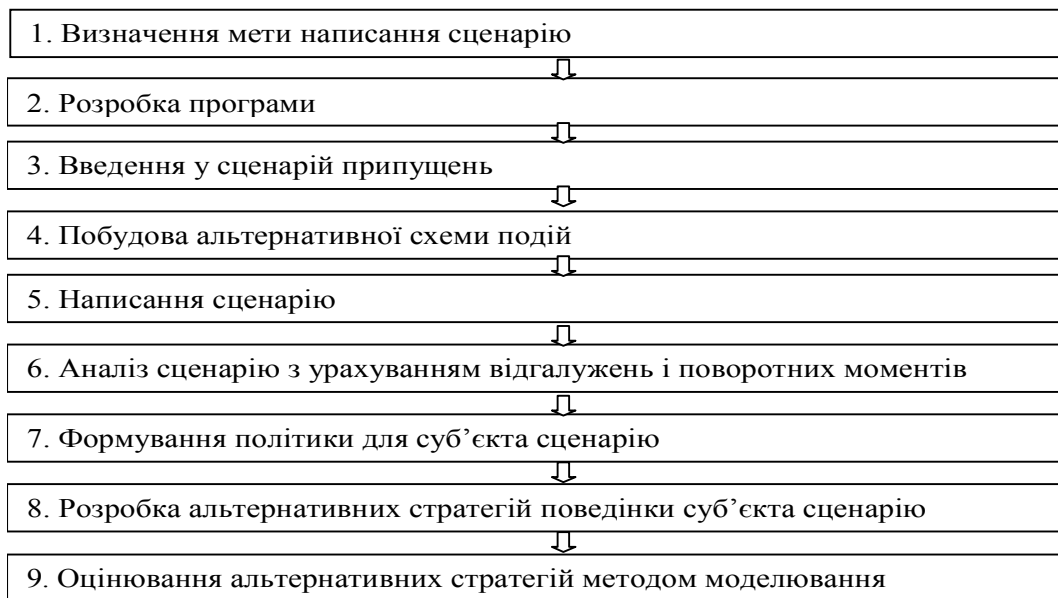


Рис. 2. Процедура побудови сценаріїв

Шкала оцінки повинна відповідати цілям проведення сценарного моделювання. Можливе застосування шкал найменувань, порядкової, інтервалів, відношень, різниць чи абсолютної [10]. Так оцінки експертів доцільно вимірювати в якісних шкалах – у порядковій шкалі чи шкалі найменувань, у той час як інформацію про стан КА доцільно оцінювати у кількісних шкалах. Далі шкали узгоджуються між собою.

Вже на первинному етапі при побудові моделі виникає проблема з оцінкою правдоподібності залежностей різних критеріїв і факторів у моделі. Слід зазначити, що вразливим місцем моделі є експертна думка або неформалізована частина методу. Тому спочатку доцільно, не дивлячись на складність КС, гранично спростити модель при обов'язковому збереженні основних якісних властивостей. Наприклад, на початковому етапі пропонується спиратися на побудовані раніше в [9] моделі КС.

Таким чином, створювана модель при максимальному спрощенні повинна зберігати якісні властивості об'єкта, формалізація зв'язків моделі повинна відображати природу взаємодії факторів, що впливають на результируючі критерії.

Стрес-тестуванням є аналіз впливу екстраординарних (екстремальних) подій на ризики у КС. У процесі управління ризиком за допомогою стрес-сценаріїв вивчається дія маловірогідних подій на результат роботи. Традиційно до таких подій належать несправності, відмови апаратури та ін. Кількість стрес-сценаріїв у ідеалі повинна наближатися до максимально можливої, відображаючи повну картину стійкості до стресу управління. Природно, що створюючи такі сценарії, насамперед, необхідно забезпечити їх логічну несуперечність. Як стрес-сценарій може бути прийнята відмова апаратури, що відбулася у минулому чи в іншій КС, з обов'язковою адаптацією його до сьогоденних умов. Проте для КС які, як правило, є унікальними створити сценарії, побудовані на основі історичних даних, досить складно і ці сценарії не завжди можуть охопити весь спектр можливих різких змін стану системи.

Для усунення даного недоліку необхідно застосовувати побудову гіпотетичних сценаріїв на основі експертної оцінки. Головною проблемою в даному процесі є оцінка їх правдоподібності. Оптимальний підхід при побудові гіпотетичних стрес-сценаріїв – варіювання поведінкових характеристик факторів і

критеріїв моделі, оцінка їх кореляції і конструюванні на їх основі складних маловірогідних ситуацій або подій.

Застосування стрес-тестування не дивлячись на відносну суб'єктивність сценаріїв дозволяє з мінімальними витратами оцінити стійкість до стресу системи, визначити якнайгірші сценарії розвитку ситуації, виділити найбільш значущі для нормального функціонування КС чинники, виробити ряд превентивних мір.

При складанні альтернативних сценаріїв використовуються ті ж принципи, що і для стрес-тестування, але з іншою логікою – досліджуються не маловірогідні події, а опрацьовується максимально глибокий ряд альтернативних подій, вірогідність настання яких співрозмірна з тими, що вже є. Проте опрацьовування великої кількості альтернативних варіантів розвитку подій достатньо трудомісткий і ресурсоємний процес та застосовується у разі отримання вкрай негативних прогнозів за виділеними чинниками.

За звичайних умов при складанні альтернативних сценаріїв доцільно створювати три або кратну трьом кількість можливих варіантів розвитку ситуації – оптимістичний, найбільш вірогідний або базовий і песимістичний. Розглядання альтернативних сценаріїв майбутнього дозволяє передбачати появу негативних подій, врахувати виявлені ризики і заздалегідь підготувати заходи по запобіганню їх наслідкам.

Важливою проблемою залишається питання ймовірнісної оцінки того або іншого варіанта розвитку подій. Також не завжди за виділеними факторами є необхідна статистика (історичні дані), що дозволяє розрахувати вірогідність реалізації різних прогнозів, особливо, якщо це стосується похідних сценаріїв від настання відразу декількох альтернативних подій.

Таким чином, якщо на першому етапі відбувається побудова моделі за допомогою виділення основних факторів і результируючих критеріїв, а на другому визначаються їх критичні значення, то на третьому етапі – найбільш вірогідний діапазон змін або перелік вірогідних дискретних значень виділених факторів і критеріїв. Далі конструюються сценарії засновані на настанні двох і більше альтернативних подій, оцінюється вірогідність їх настання, робляться оперативні заходи.

Головним завданням етапу *синтезу оптимальних чи раціональних стратегій* є оптимізація діяльності з управління ризиками. Проведені дослідження відкривають нові траєкторії поведінки ризикових позицій і ключових факторів, що впливають на них. За наслідками даної роботи розробляються пропозиції щодо розробки нового і вдосконалення вже існуючого інструментарію управління ризиками.

Тобто на даному етапі ГОГУ, володіючи певними даними про потенційні ризики, формує перелік конкретних заходів з підвищення ефективності процесу управління ризиками. Але перед впровадженням запропонованих нововведень необхідно провести їх апробацію на історичних і гіпотетичних даних, іншими словами провести бек-тестування.

Суть *бек-тестування* полягає в апробації методологічних розробок на історичних і гіпотетичних даних, унаслідок чого з'являється можливість порівняти результати застосування методології з дійсністю й оцінити її ефективність. Бек-тестування залишається головним і, мабуть, найнадійнішим засобом визначення ефективності технологій управління ризиками.

Процедура проведення бек-тестування складається із двох фаз: перша – тестування на історичних, гіпотетичних і змішаних даних, друга – повторення тестування на раніше спроектованих альтернативних сценаріях. Природно будь-яка методика або модель, побудована експертним шляхом, допускати певну кількість помилок (першого і другого роду). Тому головним завданням на першій фазі бек-тестування є максимально точно визначення діапазону можливих погрішностей і відповідність його прийнятному рівню. Друга фаза – це повторення етапу побудови альтернативних сценаріїв з метою перевірки збільшення ефективності.

Таким чином, бек-тестування покликане, по-перше, визначити і мінімізувати ризик допущення помилки в методології управління ризиками і, по-друге, контролювати відповідність нових технологій управління ризиками.

На останньому етапі сценарного аналізу (*формування висновків*) відбувається затвердження запропонованих нововведень з управління ризиками або підтвердження адекватності існуючої моделі КС чи сценаріїв управління.

Не дивлячись на те, що сценарний аналіз методологічно представлений нами як процес, що послідовно проходить шість стадій, існує можливість, коли перехід до наступної стадії втрачає сенс або неможливий, тоді така послідовність порушуватиметься. Таким чином, забезпечується зворотний зв'язок між різними стадіями методу і однозначність його застосування. Так, якщо на етапі бек-тестування виявлено, що запропоновані нововведення не відповідають необхідному рівню, то відбувається повернення на попередні стадії. Якщо на етапі стрес-тестування або побудови альтернативних сценаріїв адекватність існуючої моделі не підтверджується, то відбувається повернення до першого етапу і все повторюється знову. Кінцевим результатом проведення сценарного аналізу є не розпливчатий

аналітичний висновок, а однозначний висновок про адекватність існуючих або нових методологій і сценаріїв управління в КС.

У процесі систематизації математичного апарата сценарного аналізу необхідно розглянути методологію застосування регресійного і кореляційного аналізу.

Регресії в різних своїх проявах покликані аналізувати залежності між статистичними даними. Метою регресійного аналізу є відшукання виду залежності між досліджуваними даними для проведення подальших досліджень. Побудова регресії означає не тільки знаходження якого-небудь зв'язку між даними, але й оцінку точності цього зв'язку. Це передбачає, як мінімум, можливість отримувати оцінки необхідних параметрів з апіорі заданою точністю. Сценарний аналіз як метод прогнозування якраз і потребує таких моделей, оскільки, знаючи вид залежності між аналізованими даними, можна з'ясувати, що відбудеться з об'єктом моделювання при деякому варіюванні параметрів. Залежно від ситуації необхідно знати, що трапиться з об'єктом при критичній зміні яких-небудь параметрів, що впливають на нього і як поведеться об'єкт, що вивчається, при різних сценаріях розвитку подій.

Для КА виділяють певні кількісні характеристики якості його функціонування, які можуть бути досягнуті при конкретному стані його бортових систем та наземних елементів управління. Значення характеристик міняється залежно від деяких факторів, що можуть змінюватися в процесі управління. Це може бути, наприклад, технічний стан певних бортових систем чи дії персоналу НКУ. Далі необхідно побудувати регресійні рівняння (тобто визначити вид зв'язку) і після цього проаналізувати ступінь впливу цих факторів. Якщо чинник один і вважається, що зв'язок повинен бути лінійним, то вдаються до лінійного регресійного аналізу; якщо факторів декілька, за умови лінійної залежності, використовують множинний (багатовимірний) регресійний аналіз. Якщо лінійний вид зв'язку, а саме він є найпростішим, за якихось причин не підходить, то удаються до нелінійного регресійного аналізу.

Розглянемо загальний випадок множинного регресійного аналізу. Нехай об'єкт виражається чисельною характеристикою Y і виявлено декілька факторів X_1, X_2, \dots, X_n , від яких залежить Y (одновимірному регресійному аналізу залежна змінна залежить тільки від одного параметра). Нехай є статистична вибірка $\{Y^j, X_1^j, X_2^j, \dots, X_n^j\}$, $j = \overline{1, k}$, де k – кількість елементів вибірки.

Рівняння регресії має вигляд:

$$Y = \sum_{i=1}^n a_i \cdot X_i + b. \quad (1)$$

Завдання полягає в тому, щоб знайти коефіцієнти a_i, b , $i = \overline{1, n}$ такі, щоб гіперплощина, визначена цими коефіцієнтами, проходила якомога ближче до точок $(Y^j, X_1^j, X_2^j, \dots, X_n^j)$, $j = \overline{1, k}$ або, що те ж саме, – помилка статистичних даних була мінімальною. Варто звернути увагу на той факт, що, якщо в одновимірному випадку для визначення коефіцієнтів прямої достатньо, щоб вибірка складалася не менше ніж з 2-х значень, то в багатовимірному випадку, об'єм вибірки повинен бути не менше $n + 1$.

Для знаходження коефіцієнтів a_i, b , $i = \overline{1, n}$ скористаємося відомим методом найменших квадратів, що дозволяє знайти оптимальні значення коефіцієнтів у сенсі мінімізації суми квадратів похибок:

$$\delta_j = (Y^j - \sum_{i=1}^n a_i X_i^j - b)^2; \quad (2)$$

$$F(a_1, a_2, \dots, b) = \sum_{j=1}^k \delta_j = \sum_{j=1}^k (Y^j - \sum_{i=1}^n a_i X_i^j - b)^2; \quad (3)$$

$$F(a_1, a_2, \dots, a_n, b) \rightarrow \min. \quad (4)$$

Для вирішення цього завдання безумовної мінімізації необхідно вирішити систему з $n + 1$ рівнянь. Рівняння одержують прирівнюванням до нуля часткових похідних за всіма невідомими функціями F , а саме: a_1, a_2, \dots, a_n, b .

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial a_1} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial F}{\partial b} = 0 \end{array} \right\}. \quad (5)$$

Отримаємо оптимальні значення коефіцієнтів a_i^*, b^* , що дасть можливість визначити рівняння регресії:

$$Y^* = \sum_{i=1}^n a_i^* \cdot X_i + b^*. \quad (6)$$

Адекватність побудованої моделі визначається коефіцієнтом детермінації R^2 :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^* - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}. \quad (7)$$

В багатовимірному випадку коефіцієнт детермінації коректують, враховуючи декілька мір свободи:

$$R_{kor}^2 = 1 - \frac{k-1}{k-(n+1)}(1-R^2), \quad (8)$$

де R^2 – нескоректований коефіцієнт детермінації; k – об'єм статистичної вибірки; n – кількість незалежних змінних у рівнянні регресії.

Дуже низький коефіцієнт детермінації свідчить про те, що модель погано описує статистичні дані.

Зручно використовувати матричну форму запису цього методу. Введемо такі нові позначення:

$$\bar{Y} = \begin{pmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_k \end{pmatrix}, \quad \|X\| = \begin{pmatrix} X_1^1 & \dots & X_{n+1}^1 \\ \dots & \dots & \dots \\ X_k^1 & \dots & X_{n+1}^k \end{pmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ b \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Тепер весь набір статистичних даних можна об'єднати в одне векторне рівняння:

$$\bar{Y} = \|X\| * \bar{B}. \quad (10)$$

Для знаходження коефіцієнтів a_1, a_2, \dots, a_n, b необхідно вирішити рівняння:

$$\frac{\partial F}{\partial \bar{B}} = 0, \quad (11)$$

де

$$F = (\bar{Y} - \|X\|\bar{B})^T (\bar{Y} - \|X\|\bar{B}),$$

після спрощення, отримаємо:

$$\bar{B}^* = (\bar{X}^T \bar{X})^{-1} \bar{X}^T \bar{Y}. \quad (12)$$

Таким чином, ми обчислили вектор оптимальних невідомих коефіцієнтів \bar{B}^* , необхідних для побудови рівняння регресії.

Викладені вище методи регресійного аналізу, які ґрунтуються на гіпотезі про лінійність моделі. Але якщо лінійна одно- або багатofакторна модель погано описує дані, то необхідно удатися до нелінійного регресійного аналізу. Нелінійний аналіз, ґрунтуючись на точніших підходах, є складнішою формою регресійного аналізу. Але навіть коли він може надати точніші результати, його застосування може бути не завжди виправдане з погляду підвищеної складності.

Найбільш поширеним інструментом регресійного аналізу є множинний регресійний аналіз. Він дає можливість вивчити комплексну дію декількох факторів, що є його незаперечним плюсом. Разом з цим підвищується складність обчислень.

Розглянемо метод кореляційного аналізу стосовно множинної лінійної регресії. У цьому випадку розрізняють два види коефіцієнтів кореляції:

r_{YX} – коефіцієнт кореляції між незалежною змінною X і функцією відгуку Y (залежною змінною);

$r_{X_i X_j}$ – коефіцієнт кореляції між двома незалежними змінними X_i і X_j :

$$r_{XY} = \frac{Q_{YX_i}}{\sqrt{Q_{X_i} Q_Y}}, \quad (13)$$

де

$$Q_{YX_i} = \sum x_i y - \frac{1}{n} \sum x_i \sum y, \quad Q_{X_i} = \sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2, \quad Q_Y = \sum y^2 - \frac{1}{n} (\sum y)^2,$$

а сума береться від 1 до n .

Аналогічно до коефіцієнта кореляції r_{XY} вводиться коефіцієнт кореляції $r_{X_i X_j}$ між незалежними змінними:

$$r_{X_i X_j} = \frac{Q_{X_i X_j}}{\sqrt{Q_{X_i} Q_{X_j}}}. \quad (14)$$

Таким чином, ми можемо прослідкувати зв'язок між параметрами нашої моделі.

Для того, щоб дізнатися зв'язок між функцією відгуку Y і декількома незалежними чинниками X_1, X_2, \dots, X_i складається матриця R_K , що містить коефіцієнти взаємних кореляцій між всіякими парами з набору $\{X_1, X_2, \dots, X_i, Y\}$:

$$\|R_K\| = \begin{vmatrix} 1 & r_{YX_1} & \dots & r_{YX_K} \\ r_{X_1Y} & 1 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 1 & r_{X_kX_k} \\ r_{X_kY} & \dots & r_{X_kX_i} & 1 \end{vmatrix}. \quad (15)$$

Матриця R_K є симетричною, оскільки $r_{YX} = r_{XY}$ і на головній діагоналі розташовані одиниці й кореляція між двома рівними елементами $r_{XX} = 1$. Після цього обчислюється коефіцієнт множинної кореляції:

$$R = \sqrt{1 - \frac{D}{D_{11}}}, \quad 0 < R < 1, \quad (16)$$

де D – детермінант матриці R_K ; D_{11} – додатковий мінор 1-го елемента матриці R_K .

Цей показник дає можливість визначити залежність загального впливу факторів X_1, X_2, \dots, X_i на Y . Чим ближче значення R до одиниці, тим краща якість прогнозів моделі, побудованої за статистичними даними, тим точніше обрані критерії описують функцію відгуку.

Таким чином, математичний апарат сценарного аналізу є системою формалізованих методів, головним завданням яких є вивчення тісноти зв'язку окремих факторів і критеріїв моделей і ступеня їх взаємодії, визначення критеріїв оцінки гіпотез, регламентація ймовірнісних оцінок, що об'єктивно склалися.

Висновки з даного дослідження й перспективи подальших досліджень у цій галузі. У статті розроблено теоретичний базис методології сценарного аналізу в задачах управління космічними апаратами, застосування якого надає можливість розв'язання прикладних задач управління. Як математичний апарат сценарного аналізу, розглянуто методи регресійного та кореляційного аналізу.

Головною перспективою розвитку математичного апарата сценарного аналізу є максимально можлива формалізація експертної частини методу за допомогою розробки методології застосування методів нечіткої логіки і нечітких множин, нейронного програмування, вейвлет-аналізу.

На жаль, у рамках даної роботи немає можливості надати повний опис усіх етапів та методів сценарного аналізу при управлінні КА і навести приклади їх застосування, що планується зробити в подальших публікаціях.

Список використаної літератури:

1. Управління космічними апаратами : підручник / М.Ф. Пічугін, П.П. Топольницький, І.В. Пулеко та ін. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2009. – 280 с.
2. Современная телеметрия в теории и на практике : учебный курс / А.В. Назаров, Г.И. Козырев, И.В. Шитов и др. – СПб. : Наука и техника, 2007. – 672 с.
3. Згуровський М.З. Основи системного аналізу / М.З. Згуровський, Н.Д. Панкратова. — К. : Видавнича група ВНУ, 2007. — 544 с.
4. Згуровський М.З. Сценарний аналіз як системна методологія передбачення / М.З. Згуровський // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2002. — № 1. — С. 7–38.
5. Рихальський О.Р. Інформаційно-радіотелеметричні системи : конспект лекцій / О.Р. Рихальський, І.В. Пулеко, О.М. Кубрак. – Житомир : ЖВІРЕ, 1999. – Ч. 1. – 376 с.
6. Пулеко І.В. Алгоритм статистичної обробки телеметричної інформації з урахуванням стану інформаційно-вимірального каналу / І.В. Пулеко // Вісник ЖІТІ. – Житомир : ЖІТІ, 1998. – № 7. – С. 230–233.
7. Шабатура Ю.В. Теоретичні аспекти побудови телеметричних систем космічних апаратів з часовим представленням виміральної інформації / Ю.В. Шабатура, І.В. Пулеко, В.О. Чумакевич // Військово-технічний збірник. Академія сухопутних військ. – Львів : АСВ, 2011. – № 1 (4). – С. 43–49.
8. Кустовська О.В. Методологія системного підходу та наукових досліджень : курс лекцій / О.В. Кустовська. – Тернопіль : Економічна думка, 2005. – 124 с.
9. Ханцеверов Ф.Р. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли / Ф.Р. Ханцеверов, В.В. Остроухов. – М. : Машиностроение, 1989. – 264 с.
10. Орлов А.И. Репрезентативная теория измерений и ее применения / А.И. Орлов // Заводская лаборатория. – 1999. – Т. 65, № 3. – С. 57–62.

ПУЛЕКО Ігор Васильович – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри геоінформаційних і космічних систем Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

- інформаційні системи;
- моделювання складних ієрархічних систем;
- управління в складних технічних системах.

РИХАЛЬСЬКИЙ Олександр Ростиславович – кандидат технічних наук, доцент Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

- інформаційні системи;
- телеметричні системи;
- складні технічні системи.

ТОПОЛЬНИЦЬКИЙ Павло Петрович – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри геоінформаційних і космічних систем Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

- інформаційні системи;
- телеметричні системи;
- обробка інформації в космічних системах.

ЧУМАКЕВИЧ Віктор Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки та електроніки факультету ракетних військ і артилерії Академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного.

Наукові інтереси:

- теорія функціональної стійкості систем;
- моделювання складних ієрархічних систем;
- електромеханічні керуючі системи;
- навігаційні системи;
- складні технічні системи.

Стаття надійшла до редакції 24.05.2012