

Життєздатність ерготичних систем в складних умовах

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

Стаття присвячена аналізу проблеми життєздатності складних динамічних систем та пошуку уніфікованих засобів її дослідження. Показники життєздатності найбільш повно відображають особливості функціонування систем в складних умовах. При цьому основними причинами зниження життєздатності сучасних ерготичних систем є проблеми не прогнозованості людино-машинної взаємодії. Вони обумовлені індивідуальними особливостями функціонування елементів системи, для системного аналізу яких використовують різноманітні не взаємозв'язаних параметрів, показників і критеріїв. При забезпеченні безпеки функціонування ерготичної системи в складних умовах домінуючими стають питання уніфікації засобів отримання, обробки і відображення інформаційних потоків різної природи від її елементів та визначення характеру їх взаємозв'язку. Для їх вирішення необхідно виявляти динамічну структуру інформаційних потоків, для чого використовується уніфікований підхід, в основі якого – принципи системної динаміки.

Ключові слова: життєздатність, ерготичні системи, структура функціонування, просторово-часові характеристики, інформаційні потоки, параметрична геометризація.

Вступ

Проблеми безпеки, надійності і стійкості динамічних систем сьогодні є одними з пріоритетних для сучасних енергетичних, технологічних, транспортних комплексів, які функціонують в складних умовах. Складність управління ними обумовлює необхідність врахування людино-машинної взаємодії в системі «людина – техніка – середовище» (СЛТС). Дійсно, прагнення подолати зростання ризиків техногенних катастроф збільшили кількість джерел інформації (сенсорів, біосенсорів, детекторів й ін.) та засобів їх оброблення, відображення і аналізу. Однак усупереч очікуванням та незважаючи на широке використання цифрових технологій та значні ресурси, що вкладаються в забезпечення безпеки, наслідки техногенних катастроф зростають. Однією з домінуючих причин є те, що в складних умовах (аварійних, непередбачених, екстремальних) проявляються індивідуальні особливості функціональних характеристик елементів складної систем, що індуковані зовнішніми і внутрішніми чинниками. Наслідком цього з одного боку є феномен «людського чинника», коли теоретично надійна система на практиці переходить у стан відмови по причині помилкових дій або психофізіологічної відмови оператора. А з іншого – під дією зовнішніх впливів проявляється індивідуальність датчиків, сенсорів, біосенсорів і т.п., які є джерелами інформації про функціональний стан (ФС) елементів складних динамічних систем. Це призводить до нових проблем (достовірності інформації і інших). Отже, на сьогодні різноманіття підходів, методів та засобів аналізу функціонування складних систем не вирішує головну проблему життєздатності їх функціонування в непередбачених умовах та потребує пошуку нових шляхів їх вирішення.

1. Аналіз проблеми безпеки складних динамічних систем

Аналіз функціональних відмов сучасної техніки свідчить, що рівень безпеки СЛТС істотно знижує відсутність ефективних засобів: а) ідентифікації перехідних функціональних станів при дії стрес-чинників діяльності та середовища; б) прогнозування нестійких функціональних станів людини-оператора; в) оцінювання пси-

хофізіологічних ризиків та «ціни діяльності» оператора; г) відбору та допуску операторів; д) виявлення індивідуальної структури функціонування ключових елементів системи «людина – техніка – середовище» (ЛТС).

Звідси неоднозначність інформації і не прогнозоване виникнення проблемних (складних, аварійних, позаштатних) ситуацій при впливі стрес-чинників (екологічного, інформаційного та інших) на ФС елементів СЛТС різної природи і, особливо, ФС людини-оператора (ЛО). Спроби вирішити ці проблеми в рамках існуючих підходів призвели до збільшення різноманітності: 1) джерел інформації про ФС елементів СЛТС; 2) методів отримання, оброблення, представлення і аналізу інформації про їх функціонування. Однак це не дозволило забезпечити надійність і достовірність інформації про ФС елементів СЛТС і привело до розуміння обмеженості методів дослідження шляхом нормування, згладжування, неврахування артефактів і т.п. Загалом, наслідком є проблеми допуску та контролю, он-лайн моніторингу, ідентифікації ФС людини-оператора, яка є найменш надійним елементом СЛТС. Отже, на сьогодні не в повній мірі вирішено проблеми людино-машинної взаємодії, а існуюча різноманітність методів дослідження життєздатності і засобів для її аналізу заважає вирішенню проблем безпеки СЛТС у складних умовах.

Вважається, що безпеку складної системи слід досліджувати під трьома кутами зору, а саме її надійності, живучості та стійкості. У складних умовах функціонування типові ергономічні властивості систем ЛТС (можливість керувати, обслуговувати, освоювати та населяти) не охоплюють стійкість системи до зовнішнього впливу, в той час, як саме стійкість відноситься до загальносистемних інтегральних властивостей систем, що характеризують їх динамічну поведінку та виживання в екстремальних умовах. Ці властивості взаємопов'язані, тому необхідно враховувати, що вони не є простою сумою властивостей елементів системи, тобто не є інтегративними. Тому «живучість» чи «життєздатність», як здатність системи зберігати основні властивості, потрібна для виконання необхідних функцій в складних умовах, що не передбачені умовами експлуатації, які можуть викликати функціональні відмови елементів системи. Її досліджують у багатьох областях (бізнесі, технології, економіки, психології тощо). Тому активно розвивається теорія життєздатності складних систем в працях Р. Ешбі, Р. Мілера, С. Біра, С. Мадді, О. С. Разумовського, М. Ю. Хазова й інших.

Сьогодні спостерігається новий етап розвитку теорії життєздатності складних систем: життєздатність економічних і соціальних систем, металевих конструкцій, людини та складних технічних систем тощо. Саме життєздатність як здатність функціонувати всупереч впливу обставин та руйнуючих чинників здатна пояснити існування феномену «людського чинника» та великої кількості відмов в складних системах, що керуються людиною. У цьому зв'язку надзвичайно актуальна проблема безпеки систем ЛТС трансформується у проблему виявлення системоутворюючих чинників, що породжують приховані зв'язки між її елементами. Зокрема, нові системні проблеми контролю стійкості, керованості і т.п. свідчать про те, що життєздатність кожного елементу систем ЛТС залежить від збалансованості внутрішніх взаємозв'язків та їх узгодженості з іншими. Різноманіття просторово-часових особливостей сигналів функціонування обумовило використання різних методів оброблення і аналізу, які для елементів СЛТС можуть бути не ефективними, або не сумісними. Так, використання стандартизованих методів аналізу технічних та електрофізіологічних сигналів не дозволило уникнути проблем неоднозначності, артефактів управління, ідентифікації перехідних станів та ін. Тому для їх аналізу активно розвиваються як нові методи обробки (вейвлет-перетворення і т.ін.), так і нові підходи до моделювання (кіберфізичний тощо). Незважаючи на ак-

тивний розвиток нових підходів і методів дослідження, не вирішено коло взаємопов'язаних проблем людино-машинної взаємодії в складних системах. Очевидною є наявність системного протиріччя в дослідженні СЛТС – намагання систему дослідити несистемно, використовуючи добре розвинуті підходи та методи, але до кожної підсистеми окремо. Їх аналіз виявив існування *проблеми* дослідження функціонування різних за природою елементів складної системи не взаємозв'язаними підходами, методами, параметрами і критеріями, що на пряму призводить до зниження життєздатності системи загалом. Це дало можливість зробити висновок, що для вирішення протиріччя необхідні універсальні – підхід, параметри, показники і критерії. Тому *метою* роботи є дослідження і засоби системного аналізу життєздатності складних систем у складних умовах.

2. Життєздатність складних динамічних систем – концепції та підходи

Термін «життєздатність» з'явився на початку ХХ ст. завдяки А. А. Богданову, який описав життєздатність як динамічну стійкість у звичайних умовах середовища. Він показав, що в рамках системи елементи – нежиттєздатні, нестійкі або ненадійні – можуть утворити життєздатне, стійке і надійне ціле. Тобто, життєздатна система може складатися з різних за життєздатністю елементів. Розвиваючи концепцію гомеостазу, запропоновану У. Кенноном в 1932 р, У. Р. Ешбі зробив спробу формалізувати поняття життєздатності, точніше, здатності до виживання, яку він розуміє як здатність системи зберігати свої характеристики в заданих межах. У 50-х роках ХХ століття, спираючись на закон необхідної різноманітності Ешбі, Ст. Бір побудував формалізовану модель складної життєздатної системи (Viable System Model, VSM). При цьому життєздатна система повинна складатися з життєздатних підсистем і самостійно здійснювати деякі специфічні функції. Після цього з'явився ряд робіт (Р. Еспежо і Р. Харнден і ін.) по адаптації VSM до потреб організації складних систем в бізнесі. У 70-х рр. активного розвитку отримали моделі життєздатності, які були вперше розвинені і отримали математичну форму в техніці і в прикладних науках, де технічні системи розглядаються як гібридні системи. Розумовський О. С., Хазов М. Ю. трактують життєздатність в більш широкому, системному сенсі – як поєднання стійкості системи та її адаптивності, яка забезпечує безпеку, надійність і оптимальність [1]. Тобто поняття життєздатності включає різні аспекти і є міждисциплінарним. Відзначимо евристичний підхід до встановлення законів принципової життєздатності систем, вперше сформульованих Альтшуллером Г. С. [2]. В їх основі – загальні принципи розв'язання технічних суперечностей шляхом розподілу протилежних властивостей чи дій у просторі або часі.

Системний підхід до дослідження життєздатності систем різної природи О.С. Розумовського та М.Ю. Хазова [1] узагальнив проблеми опису життєздатності живих систем, суспільства й людини, а також гібридних систем. Вони визначили проблеми збереження властивостей життєздатних систем та сформували напрямки розвитку теорії життєздатних систем.

З психологічної точки зору С. Мадді описав життєстійкість (hardiness) як характеристику особистості, яка є ключем до стресостійкості. Тому життєздатність людини в складних умовах функціонування ґрунтується на баченні різних шляхів вирішення проблем і позитивному досвіді вибору оптимального, а також у впевненості у своєму функціональному здоров'ї. Також С. Мадді показав, що життєздатність формується з дитинства шляхом певних взаємодій з оточуючим середовищем. Він виявив чинники, що позитивно і негативно впливають на формування життєздатних переконань. Установлені життєздатні установки, а також чинники, що сприяють розвитку життєстійкості, дозволили С. Мадді створити тренінг життєстій-

кості. Результати дослідження впливу тренінгу життєстійкості на успішність, здоров'я і взаємини з людьми учасників показали, що життєстійкість як ключ до життєздатності не вроджена риса, а така що розвивається.

Сьогодні спостерігається взаємопроникнення ергономіки, нейроекономіки і нейробиології з метою використання досягнень в дослідженні людського мозку і фізіології діяльності [3]. Зароджується нейроергономіка, яка спрямована на вирішення низки актуальних проблем життєздатності людино-машинної взаємодії в ергатичних системах, що функціонують в складних умовах [4, 5].

Необхідно також зазначити, що ергономіка і людський чинник, які об'єднує нейроергономіка, є однією з важливих дисциплін в більшості технічних університетів світу. Її міждисциплінарність важлива для розробників технічних систем будь-якої природи [3-6].

3. Індивідуальність функціонування як проблема забезпечення життєздатності елементів СЛТС

Оскільки проблема життєздатності СЛТС в складних умовах напряду пов'язана із взаємодією елементів різної природи – біологічної (людини) та технічної, то саме індивідуальність ФС їх елементів та приховані зв'язки між ними породжують проблеми – ефективності управління і стійкості системи та її безпеки. Дійсно, у звичайних умовах життєздатність елементів ергатичної системи забезпечують вимоги різних стандартів, в яких реалізовано різні: підходи, методи, параметри, критерії, алгоритми, програми тощо. Однак, в складних умовах експлуатації їх недостатньо. На це вказують техногенні катастрофи, які відбуваються частіше на керованих людиною системах. Їх аналіз, як правило, вказує на домінантність в забезпеченні життєздатності систем людського чинника, його нейроергономічних, психофізичних, психофізіологічних і психологічних аспектів.

Безсумнівно, причин зниження життєздатності набагато більше. Вони – в індивідуальності джерел інформації, різноманітності засобів обробки сигналів і їх нелінійності, багатомасштабності процесів, а також в спрощених моделях, що використовують в автоматизованих системах управління. Результат – не прогнозованість поведінки навіть однакових за показниками сенсорів і систем в екстремальних умовах. Так, характерною особливістю діяльності людини в СЛТС (при виконанні диспетчерських, технологічних, управлінських функцій) є не прогнозоване виникнення проблемних (складних, аварійних, позаштатних) ситуацій внаслідок утоми чи впливу несприятливих, екстремальних стрес-чинників екологічного, інформаційного, виробничого, соціального походження на її ФС. Традиційні дослідження «людського чинника», що базуються на визначенні «ціни» діяльності, професійного здоров'я, індивідуальної норми, не дозволили вирішити проблему індивідуальності поведінки людини. Саме індивідуальність – психологічна, психофізіологічна, особистісна – визначає, чи буде «ціна» діяльності оператора допустимою або стане непомірно високою для конкретної людини.

Індивідуальність людини проявляється в її стресостійкості, яка відображає безліч взаємопов'язаних характеристик, що істотно ускладнює її визначення. Стресостійкість як здатність людини протистояти негативному впливу стрес-чинників обумовлена індивідуальним комплексом вроджених і надбаних психофізичних, психологічних і фізіологічних властивостей і процесів. Саме стресостійкість забезпечує людині-оператору надійне і безпечне функціонування під час трудової діяльності в складних та екстремальних умовах. Оскільки, згідно з С. Мадді, стресостійкість є передумовою життєстійкості, то саме від стресостійкості оператора та

здатності до її формування в процесі навчання та діяльності напряду залежить життєздатність СЛТС.

Отже, саме індивідуальність є підґрунтям появи цілого комплексу проблем людино-машинної взаємодії. Урахування індивідуальності дозволяє підвищити ефективність людино-машинної взаємодії та забезпечити сумісність та узгодженість функціонування підсистем СЛТС різної природи.

Системний аналіз цих взаємозв'язаних проблем дозволив установити основні причини, що перешкоджають життєздатності елементів СЛТС. Це прояв в екстремальних умовах динамічної індивідуальності, динамічної несумісності, просторово-часової динамічної неузгодженості елементів СЛТС, та труднощі у врахуванні технологічної і генетичної спадковості перехідних ФС елементів. Їх проявом є суперечливість, неоднозначність та недостовірність результатів аналізу інформації про функціонування СЛТС.

4. Структурно-функціональний підхід до дослідження життєздатності елементів СЛТС

Безпека системи ЛТС – це такий її стан, при якому вплив на неї потоків енергії, інформації та речовини не перевищує допустимих меж. Однак вплив стресчинників на функціонування системи ЛТС може бути різним (сприятливим, несприятливим та нейтральним), а реакція на цей вплив буде пропорційною у відповідності з принципом Ле Шательє-Брауна. При цьому система може адаптуватись шляхом перебудови структури функціонування за рахунок переструктурування зв'язків між її елементами, зберігаючи при цьому свою життєздатність. Отже, саме внутрішня узгодженість структури робить її відносно стабільною при взаємодіях із середовищем. В ході розвитку системи її ступінь життєздатності, стійкості і надійності може зростати, якщо її елементи стабільні, а середовище стійке і гармонізоване.

Таким чином, узагальнення принципів загальної теорії систем і теорії життєздатності і стійкості систем дозволяє сформулювати загальні необхідні умови існування життєздатної системи:

1) Безпека, стійкість і надійність системи забезпечується взаємодоповненістю елементів, підсистем, системи і середовища, властивостей і функцій компонентів, жорсткістю і лабільністю відношень.

2) Безпека, стійкість і надійність системи забезпечує додаткове збереження і зміни в самих різних сенсах; додатковими і відповідними властивостями системи і середовища тощо (принцип динамічної взаємодоповненості).

Таким чином, для ефективного дослідження життєздатності системи ЛТС необхідно оперувати поняттями гармонійна структура, стабільність стану, відгук на зовнішній вплив та виявляти структурно-функціональну перебудову в системі у відповідь на збурення.

Пошук шляхів розв'язання питань щодо аналізу життєздатності складних систем дозволив розробити міждисциплінарний структурно-функціональний підхід до дослідження індивідуальності функціонування об'єктів живої і неживої природи, тобто їх життєздатності [7]. В його основу покладено перетворення одновимірного інформаційного потоку в трьохвимірну замкнуту траєкторію динамічних подій. Проекціями цієї траєкторії є індивідуальні графічні образи (сигнатури 1-го і 2-го порядків), в конфігураціях яких реалізується природна декомпозиція інформаційного потоку на динамічні, енергетичні і інформаційні цикли. Використання для їх аналізу ентропії Больцмана і ентропії Колмогорова, а також взаємозв'язаних динамічних параметрів інформаційних потоків та взаємодоповнюючих статистичних показників упорядкованості і збалансованості протифазних складових циклу функціонування

дозволяє системно аналізувати результати дослідження функціонування будь-яких елементів динамічної системи під трьома взаємодоповнюючими кутами зору [8]. Структурно-функціональний підхід до дослідження індивідуальності дозволив установити наступне:

- роль індивідуальності елементів системи різко зростає в умовах нестабільності середовища, тобто при впливі стрес-чинників;
- зростання ентропії неминуче приводить до стагнації системи;
- головна спрямованість еволюції системи в складних умовах – це забезпечення її життєздатності, тобто її стійкості, оптимальності структури і функцій, надійності та ефективності;
- в результаті будь-якої дестабілізації система все одно прагне зберегти життєздатність і стійкість, оптимізувати свою структуру функціонування (принцип максимуму Понтрягіна);
- при нестійкості будь-які, навіть слабкі флуктуації можуть зруйнувати систему (висновок з синергетики).

Таким чином, застосування підходу та його інструментарію надають нові можливості: дослідження сумісності функціонування елементів СЛТС різної природи в складних умовах; експрес-ідентифікації перехідних функціональних станів й дослідження змін функціонування елементів СЛТС впливом стрес-чинників [9]. При цьому для прогнозування їх життєздатності можна використовувати термодинамічні критерії стійкості й оборотності.

Висновки

Проблема життєздатності складних систем є надзвичайно актуальною в умовах сьогодення та зростаючих проблемах безпеки. Складність проблеми забезпечення життєздатності СЛТС формує комплекс завдань для різних галузей знань – від проектування різних систем до навчання майбутніх спеціалістів, що в подальшому будуть забезпечувати існування цих систем. Встановлено, що основною проблемою забезпечення життєздатності СЛТС є різноманітність методів дослідження та засобів (параметрів, показників і критеріїв), що застосовують для аналізу сигналів сенсорів їх функціональних станів. При цьому індивідуальність динаміки зміни ФС елементів може призводити до просторово-часової неузгодженості функціонування елементів системи та втрати життєздатності СЛТС. Обґрунтовано системний підхід до дослідження життєздатності складної системи, в основі методології якого – просторово-часова візуалізація структури взаємозв'язків в сигналах, що відображають функціонування різних елементів системи, в яких відображаються ергономічні закони взаємної адаптації. Це дозволило системно досліджувати особливості функціонування елементів СЛТС і використовувати при цьому фундаментальні принципи, закони та критерії.

Запропонований структурно-функціональний підхід може бути адаптований для системного аналізу функціонування систем, ефективність яких залежить від людського чинника (набір, відбір надійних елементів СЛТС, онлайн ідентифікація критичних перехідних станів тощо). Для усіх елементів системи надзвичайно актуальним є моніторинг ФС в реальному режимі часу (наприклад, для операторів АЕС, льотчиків, водіїв) та забезпечення системи контролю та підтримки функціонального стану водія.

Список літератури

1. Хазов, М. Ю. Учимся быть богом: создание жизнеспособных систем [Текст] / М. Ю. Хазов. – Новосибирск, 1992. – 336 с.
2. Альтшуллер, Г. С. Как стать гением: жизненная стратегия творческой личности [Текст] / Г. С. Альтшуллер, И.М. Верткин. – Минск: Беларусь, 1994. – 479 с.
3. Venda, V.F. Dynamics in ergonomics, psychology, and decisions: Introduction to Ergodynamics [Text] / V.F. Venda, Y.V. Venda. – Norwood, NJ.: Ablex Publishing Corporation. – 1995. – 503 с.
4. Parasuraman, R. Neuroergonomics: research and practice [Text] / Theor. Issues Ergon. Sci., 2003. – vol. 4, nos. 1–2. – Pp. 5–20.
5. Parasuraman, R. Neuroergonomics: a review of applications to physical and cognitive work [Text] / R. Parasuraman, R. Mehta. – Front Hum Neurosci., 2013. – 7: 889.
6. Dul, Jan. A strategy for human factors/ergonomics: developing the discipline and profession [Text] / Jan Dul, Ralph Bruder and all. // Ergonomics. 2012. – Vol. 55, No. 4. – P. 377–395.
7. Mygal, V. P. An interdisciplinary approach to study individuality in biological and physical systems functioning [Text] / V.P. Mygal, A.V. But, G.V. Mygal, I.A. Klimenko // Scientific Reports, Nature Publishing Group. 2016. – № 6. – P. 387–391.
8. Hereditary functional individuality of semiconductor sensors [Text] / V. P. Migal, A. V. But, G. V. Migal, I. A. Klymenko // Functional Materials. – 2015. – Vol. 22, № 3. – P. 387–391.
9. Мигаль, В. П. Киберфизический подход к исследованию функционирования динамических систем [Текст] / В. П. Мигаль, Г. В. Мигаль. – Электротехнические и компьютерные системы. – 2016. – № 22 (98). – С. 354–358.

Надійшла до редакції 05.03.2018

Жизнеспособность эргатических систем в сложных условиях

Статья посвящена анализу проблемы жизнеспособности сложных динамических систем и поиска унифицированных средств ее исследования. Показатели жизнеспособности наиболее полно отражают особенности функционирования систем в сложных условиях. При этом основными причинами снижения жизнеспособности современных эргатических систем являются проблемы не прогнозируемости человеко-машинного взаимодействия. Они обусловлены индивидуальными особенностями функционирования элементов системы, для системного анализа которых используют многообразие не взаимосвязанных параметров, показателей и критериев. При обеспечении безопасности функционирования эргатической системы в сложных условиях доминантными становятся вопросы унификации средств получения, обработки и отображения информационных потоков различной природы от ее элементов и определения характера их взаимосвязи. Для их решения необходимо проявлять динамическую структуру информационных потоков, для чего используется унифицированный подход, в основе которого – принципы системной динамики.

Ключевые слова: жизнеспособность, эргатические системы, структура функционирования, пространственно-временные характеристики, информационные потоки, параметрическая геометризация.

Viability of Ergonomic Systems in Complex Conditions

The article is devoted to the analysis the problem of the viability of complex dynamic systems and the search of unified means of its research. Viability indicators most fully reflect the features of the functioning of systems in difficult conditions. At the same time, the main reasons of the viability reduction of modern ergatic systems are problems of unpredictability the human-machine interaction. They result by individual features of the functioning of elements of system, for the analysis of which a variety of non-interconnected parameters, indicators and criteria are used. The issues of unification of means of obtaining, processing and displaying information flows of various nature and determining the nature of their interrelations become dominant at ensuring the safety of ergatic system functioning at difficult conditions. To solve them, it is necessary to evince the dynamic structure of information flows, for that a unified approach based on the principles of system dynamics is used.

Key words: viability, ergatic system, structure of functioning, spatio-temporal characteristics, information flows, parametric geometrization.

Відомості про автора:

Мигаль Галина Валеріївна – д-р. техн. наук, доцент, професор кафедри автомобілів і транспортної інфраструктури Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна, e-mail: mygal.galina@gmail.com.