

УДК 043.5

Л. В. Кузьмич, к.т.н.

Національний авіаційний університет, м. Київ

МЕТОДИ ОБГРУНТУВАННЯ СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТА ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СКЛАДНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Обґрунтовано підходи щодо формування теоретичних основ системного аналізу та синтезу функціонування складних інженерних конструкцій на прикладі контролю напружено-деформованого стану в умовах їхньої експлуатації.

Ключові слова: безпека, надійність, живучість, морфологічний аналіз, конструкція, об'єкт, автоматизована система, діагностування.

Постановка проблеми

На сучасному етапі проектування більшості складних технічних об'єктів забезпечення його надійності та безпеки вирішується згідно поширеного принципу: аналіз надійності та безпеки не виконується за умови дотримання діючих нормативів.

Розробка технічних завдань, передескізне проектування, техніко-економічне обґрунтування проекту виконуються без врахування або часткового врахування вимог щодо умов безпеки. На стадії робочого проекту з використанням основних вимог ДСТУ, норм та іншої нормативно-технічної документації створюються принципові та структурні схеми, передбачаються норми і регламенти з безпеки експлуатації. Виготовлення, доводка та випробовування виконуються у відповідності до технічних умов та ДСТУ. Додатковий аналіз безпеки та надійності не виконується.

Експлуатація нових та діючих об'єктів здійснюється у відповідності до наявних інструкцій з проведенням у необхідних випадках технічного контролю. Експлуатаційні відмови реєструються спеціальними комісіями та службами контролю. Більш складні аварії і катастрофи розслідуються спеціальними міжвідомчими комісіями. За результатами роботи цих органів приймаються конструкторські та технологічні рішення, спрямовані на недопущення нових відмов та аварій [1].

Для складних інженерних конструкцій, окрім традиційних критеріїв міцності та надійності, слід відокремити похідні з теорії надійності в окремі нові критерії – живучість та безпека.

Аналіз останніх досліджень

Загальний комплекс робіт по визначенню вихідного та залишкового ресурсу, живучості та безпеки елементів складних технічних об'єктів, таких як гідроелектростанції, ракетно-космічні комплекси, літальні апарати, об'єкти суднобуду-

вання, атомні станції тощо обов'язково повинен включати в себе дослідження навантажень, напружень та деформацій. На сьогоднішній день існує ряд методів для здійснення таких досліджень, зокрема розрахунковий метод, аналітичний, метод кінцевих елементів, варіаційно-різницевий метод, метод граничних інтегральних рівнянь на моделях із застосуванням фотопружності, голографії, низькомодульних матеріалів тощо [2-4].

Невизначеність компонентів моделі проектування складної технічної системи призводить до необхідності розгляду задачі прийняття рішення про її синтез з позиції системного підходу, тобто проведення дослідження за послідовно спадаючими рівнями узагальнення з врахуванням комплексу міжрівневих та внутрішніх взаємозв'язків. Верхній рівень прийняття рішення по синтезу складної конструкції є концептуальним. В якості координуючої основи дослідження ієрархії та аспектів складної конструкції можна застосувати концепцію управлінської системи, сформульовану С. В. Яблонським [3]. Так, для складної технічної системи дана концепція має таке тлумачення: «Складна технічна конструкція, як управлінська система, діє на інший об'єкт методом керування з метою спрямування останнього у відповідний стан чи позицію». Дана концепція дозволяє виконати формалізацію мети для складної технічної конструкції, побудувати ієрархію її підсистем, визначити дерево цілей і задач.

Далі виконуються комплексні програмні дослідження і проводиться уточнення розрахункового ресурсу [5-7]. Хоча пошук системних підходів до прийняття рішень при проектуванні складних конструкцій здійснюється постійно, необхідність у них з кожним роком стає більш значимішою.

Вирішення проблеми зниження вартості технічного обслуговування складних інженерних конструкцій можливе на основі впровадження

технічної діагностики як сукупності засобів і методів безперервного контролю. Саме такий контроль можливий за рахунок впровадження автоматизованих систем діагностування (АСД).

Досвід створення АСД технічного обладнання дозволяє визначити ряд основних принципів щодо розробки таких систем [6, 8-10]. Слід відзначити також, що формулювання і систематизація основних положень функціональності та технологічності складних технічних систем дозволяють визначити круг задач, які підлягають вирішенню внаслідок побудови такої АСД. У випадку розгляду складних металевих конструкцій в умовах експлуатації, на передній план постає питання діагностування напружено-деформованого стану таких конструкцій.

Важливе значення для створення АСД мають методи діагностування, які визначають трудомісткість діагностування, тривалість та об'єм розрахункових процесів, складність апаратних та програмних засобів, продуктивність системи, надійність діагностичної інформації, ступінь повноти діагностування та глибину пошуку [4, 8].

Формулювання мети

В статті запропоновано підхід до формування теоретичних основ системного аналізу та синтезу функціонування складних інженерних конструкцій на прикладі контролю напружено-деформованого стану в умовах їхньої експлуатації. Також пропонується схема автоматизованого діагностування напружено-деформованого стану складної технічної конструкції.

Виклад основного матеріалу

Оцінювання результатів досягнення мети здійснюється шляхом введення поняття ефективності для складних конструкцій, що враховує стратегію проектування u ($u \in U$ як мінімум ресурсоспоживання для досягнення мети); критерій ефективності технічного рішення, що визначає правила раціональної поведінки складної конструкції у вигляді оптимізації процесів досягнення фіксованої мети $K(u)$; показник ефективності $W(u)$ – інтегральний показник якості складної конструкції. Для запроєктованих складних конструкцій $W(u) \in 0 \div 1$ – скаляр, значення якого має бути максимальним.

Морфологічний аналіз існуючих вимог дозволяє сформулювати наступні визначальні параметри:

$m_{ск}$ – задана маса складної конструкції;

t – задана оперативність;

H – задана відстань переміщення складної системи (висота);

A – ресурсоспоживання, необхідне для досягнення мети.

На основі теорії розмірності [9], що була застосована нами для опису технологічного процесу складної технічної конструкції з рухомими частинами, та здійсненого нами морфологічного аналізу існуючих вимог щодо технологічної ефективності такої конструкції, було визначено вид функції X при параметричному згортанні параметрів:

$$X(T) = G \frac{m_{ск} T H_{max}^2}{t^3 A}, \quad (1)$$

де G – стала прогнозованої ефективності складної технічної системи;

T – час функціонування складної технічної системи на момент здійснення аналізу;

H_{max} – максимальна відстань переміщення складної технічної системи.

На наступному, операційному рівні, вирішується проблема вибору технології складної конструкції (технологічних операцій виготовлення та введення в експлуатацію). Синтез функцій підготовки та введення в експлуатацію здійснюється на основі вирішення задачі Понтрягіна [5] для лінійних та нелінійних рівнянь, що описують технологічні процеси.

Модель технологічних процесів описується системою рівнянь

$$F_i \left(w_i, \dot{w}_i, \dots, w_i^{(k)}, \xi, \dot{\xi}, \dots, \xi^{(k)}, t \right) = 0, \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, l; w_i \in R^q, \xi \in R^s$$

де ξ – узагальнена координата стану складної конструкції з R^q (гладка функція часу);

w_i – змінні з R^s , що характеризують зміну зовнішніх параметрів, таких як тиск, щільність, напруження, температура тощо;

R^q – q -мірний вектор зовнішніх параметрів;

R^s – s -мірний вектор станів складної конструкції.

При такій постановці проблеми синтезу технологій, використовуючи аналітичні положення теорії систем [6], можна довести наступні теоретичні положення:

1. Для технологічних процесів, що описуються лінійними рівняннями, всі агрегати і пристрої, що реалізують процеси просторового переміщення об'єктів складної конструкції, для яких допустиме поняття абсолютного твердого тіла, можуть мати опис цих процесів у вигляді лінійних диференціальних рівнянь.

Дане положення дозволяє сформулювати та довести теорему про те, що мінімальна реалізація процесів просторового переміщення цільового об'єкта при підготовці до експлуатації відповідає на функціонально-аналітичному рівні одному для кожного із цільових об'єктів конструкції.

2. Для технологічних процесів, що

описуються нелінійними рівняннями, всі механічні системи, що забезпечують створення необхідних потоків суцільних середовищ між рухомими частинами і наземною структурою конструкції, описуються фізичними закономірностями у вигляді нелінійних диференціальних рівнянь.

Дане положення дозволяє сформулювати та довести теорему про те, що мінімальна реалізація механічних потокових процесів, котрі супроводжують процес підготовки і введення в експлуатацію конструкції, досягається за умови вибору технологічних функцій, що протікають у вигляді процесів. Дані процеси не мають нестационарну доміанту або допуску їхньої лінеаризації.

3. Структура елемента конструкції, що допускає формалізацію у вигляді поєднання пари елементів, має мінімальну параметричну реалізацію, що відповідає її максимальній ефективності в досягненні поставленої мети, якщо граф у структурі елемента конструкції містить досконале паропоєднання.

Дане положення дозволяє сформулювати та довести теорему про те, що досконалії структурі конструкції при мінімальній затраті ресурсів на реалізацію заданих цілей відповідає дворядний граф з досконалим паропоєднанням.

Мінімізація затрат ресурсів на реалізацію надійної роботи складної технічної системи обумовлює створення та впровадження автоматизованих систем діагностування (АСД).

Можна розглядати АСД як специфічну систему управління, специфіка якої полягає саме в управлінні технічним станом об'єкта діагностування (ОД), і тому при створенні АСД використовуються деякі принципи теорії систем управління та контролю. Отже, АСД є сукупністю об'єкта діагностування, апаратно-програмних засобів та оперативного персоналу.

Включення в систему кожного із названих елементів передбачає їхній взаємозв'язок, взаємний вплив та необхідність узгодження характеристик, що визначає системний підхід до створення засобів діагностування (рис. 1). Це обумовлює необхідність монтування первинних перетворювачів в конструкцію ОД, розробки автоматизованих методів діагностування, а також засобів, здатних надійно функціонувати в умовах експлуатації та своєчасно видавати оператору

інформацію у зручній формі, а також вимагає узгодження енергетичних та часових характеристик елементів АСД.

Конструкція і технологічне призначення об'єкта визначає структуру АСД: види основних та допоміжних діагностичних параметрів, їхні граничні рівні вимірювання та частотні властивості; необхідну точність вимірювання та розрахунку діагностичних критеріїв; вид зв'язку та топологію системи; алгоритми діагностування об'єкта і його структурних одиниць; можливу глибину і точність діагностування; місце знаходження і умови роботи оператора [5].

В якості ОД розглядаємо сталеві конструкції затворів гідротехнічних споруд з єдиним центром управління. Для цих об'єктів розроблені зовнішня система діагностування (СД) та дві вмонтовані СД, що призначені для функціонування у складі об'єктів технологічного обладнання в умовах експлуатації.

Первинність мети та методів для синтезу апаратно-програмних засобів очевидні. Метою діагностування є отримання інформації про технологічний стан ОД, на основі якої здійснюється локалізація відмов і прогнозування залишкового ресурсу, а в ряді випадків здійснюється вплив на об'єкт, що попереджає створення аварійних ситуацій.

В системах більш високого рівня забезпечується автоматичне корегування зміни робочих параметрів та стабілізація технологічного процесу на основі методів адаптивного управління.

На початковому етапі створення АСД на якісному рівні формується мета, яка при практичній реалізації формує набір цілей для блоків, що складають систему. Формування дерева цілей є складною задачею, оскільки необхідне чітке розуміння, що потрібно зробити і скласти точне формулювання термінів, характерних для даної системи.

Для вмонтованих інформаційно-діагностичних систем вихідна мета сформульована наступним чином: отримати інформацію про стан технологічного середовища і технічний стан об'єкта, а також забезпечити безпеку об'єкта при недопустимих змінах параметрів в процесі експлуатації. На основі даної вихідної мети були сформульовані технічні вимоги до системи в цілому та для кожного блоку окремо.

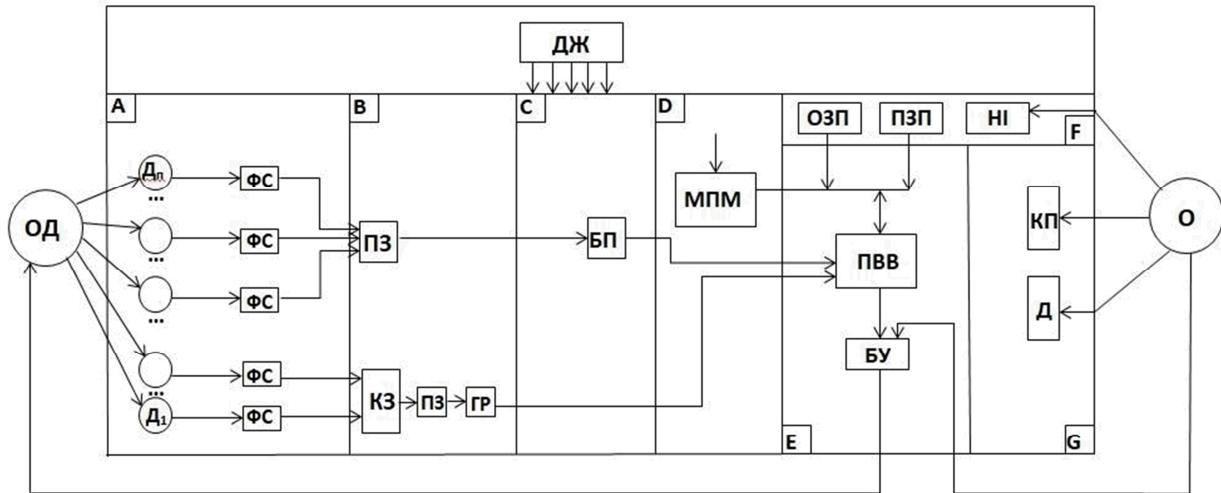


Рисунок 1 – Структурна схема АСД:

ОД – об’єкт діагностування; $D_1 \dots D_n$ – давачі; ФС – пристрій формування сигналів; ПЗ – передавач зв’язку; ГР – схема гальванічної розв’язки; КЗ – концентратор зв’язку; БП – блок перетворення; ДЖ – джерело живлення; МПМ – мікропроцесорний модуль; ОЗП та ПЗП – оперативний та постійний запам’ятовуючий пристрій; НІ – накопичувач інформації; КП – клавішний пристрій; Д – дисплей; БУ – блок управління; ПВВ – пристрій вводу – виводу; О – оператор

Для зовнішньої інформаційно-діагностичної системи вихідна мета сформульована наступним чином: провести вимірювання, порівняти значення робочих параметрів з заданими та оцінити якість виготовлення об’єкта. Ця система реалізована на основі використання ЕОМ, атестованих давачів робочих параметрів, метрологічного та програмного забезпечення.

При створенні АСД важливим є підбір методів діагностування. Саме метод діагностування пов’язує об’єкт, апаратні та програмні засоби в єдину систему, визначає алгоритми програм діагностування і дозволяє шляхом перетворення інформації, що міститься у змінах форми і частотного вмісту діагностичних параметрів, встановлювати взаємозв’язок між ознакою технологічного стану об’єкта і ознакою зміни структури діагностичних сигналів.

При розробці математичного забезпечення використані методи амплітудно-часових інтервалів, метод контрольних рівнів та метод решітчастих функцій. Дані методи виявились ефективними та їхнє використання дозволило розробити алгоритм обробки інформації, провести формалізацію процедури встановлення діагнозу та зробити вибір розрахункового ядра АСД.

Висновки

1. На даний час склалася ціла система критеріїв і запасів міцності, що гарантує працездатність об’єкта при дотриманні заданих умов експлуатації. Однак в деяких нормативних матеріалах не міститься прямих даних, що

кількісно визначають безпеку об’єкта. Більш орієнтованими на кількісне вирішення проблеми безпеки складних конструкцій є наступні критерії: надійність в умовах експлуатації; живучість (стійкість) при утворенні пошкоджень на різних стадіях розвитку відмов, аварій, катастроф; безпека (з врахуванням критеріїв і характеристик відмов, аварій, катастроф). Разом з тим обсяг нормування цих характеристик безпеки і надійності в реальній інженерній практиці надзвичайно малий.

2. На основі морфологічного аналізу складних технічних конструкцій доведено, що: мінімальна реалізація просторового переміщення об’єкта при підготовці до експлуатації відповідає на функціонально-аналітичному рівні одному для кожного із цільових об’єктів конструкції; мінімальна реалізація механічних поточкових процесів досягається за умови вибору технологічних функцій, що не мають нестационарну доміную або допуску їхньої лінеаризації.

3. Запропоновано принципи побудови системи діагностування напружено-деформованого стану складної технічної конструкції, в основі яких закладено теорії систем управління та контролю.

Список використаних джерел

1. Adams, D. Health Monitoring of Structural Materials and Components: Methods with

Applications / D. Adams. – John Wiley & Sons, Ltd., 2007. – 460 p.

2. Фролов К. В. Проблемы безопасности сложных технических систем / К. В. Фролов, Н. А. Махутов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1992. – № 5. – С. 3–11.

3. Яблонский С. В. Некоторые вопросы надежности и контроля управляющих систем / С. В. Яблонский // Математические вопросы кибернетики. – 1988. – № 1. – С. 5–25.

4. Бурау Н. Структурно-функціональний синтез систем діагностики конструкцій в експлуатації / Н. Бурау, О. Павловський, Д. Шевчук // Вісник ТНТУ. – 2013. – Том 72. – № 4. – С. 77–86.

5. Понтрягин Л. С. Обобщения чисел / Л. С. Понтрягин. – М., Наука, 1986. – 120 с.

6. Технические средства диагностирования: Справочник / В. В. Клюев, П. П. Пархоменко и др.: Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.

7. Вальков В. М. Микроэлектронные управляющие вычислительные комплексы: Системное проектирование и конструирование / В. М. Вальков. – Л.: Машиностроение, 1990. – 221 с.

8. Fuels Spills – An Automated Early-Warning System / O. Kuzko, V. Lytvynov, N. Bouraou, Y. Zukovsky, O. Kyrychuk // COMNAP-XXIV Science Symposium Proceedings, Portland, USA, 2012, pp. 77 – 85.

9. Van der Schaf A. J. On Realization of Nonlinear Systems Described by Higher – Order Differential Equations // Mathematical Systems Theory. 1987, Vol. 19, pp. 239–275.

10. Soloman, S. Sensors Handbook / S. Soloman. – McGraw-Hill Inc., 2010, 1424 p.

Надійшла до редакції 08.11.2017

Рецензент: д.т.н., проф. Квасніков В. П., Національний авіаційний університет, м. Київ.

Л. В. Кузьмич, к.т.н.

МЕТОДЫ ОБОСНОВАНИЯ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО АНАЛИЗА И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Обоснованы подходы по формированию теоретических основ системного анализа и синтеза функционирования сложных инженерных конструкций на примере контроля напряженно-деформированного состояния в условиях их эксплуатации.

Ключевые слова: безопасность, надежность, живучесть, морфологический анализ, конструкция, объект, автоматизированная система, диагностирования.

L. V. Kuzmych, PhD

STRUCTURAL-FUNCTIONAL ANALYSIS JUSTIFICATION METHODS AND PRINCIPLES OF THE DIAGNOSTIC SYSTEM OF THE STRESS-DEFORMED CONDITION OF COMPLEX CONSTRUCTIONS

Approaches to formation of the theoretical bases of the system analysis and synthesis of the functioning of complex engineering constructions on an example of a stress-deformed state control in conditions of their operation are grounded.

Keywords: safety, reliability, survivability, morphological analysis, design, object, automated system, diagnostics.