

яке пов'язує конструкційні коефіцієнти k_i і k_{smn} з відносними значеннями індукцій χ_s і χ_z у зубцях та в спинці статора відповідно.

Рівняння (11) дає змогу розв'язувати задачі визначення розмірів штампованого листа статора при різних обмеженнях, зокрема, за необхідності отримати певний відносний активний опір обмотки і за заданими конструкційними коефіцієнтами визначати відносні індукції χ_z та χ_s в зубцях і в спинці статора та перевіряти виконання умови $B_z < B_{дон}$.

Також можливе розв'язання задачі знаходження відносної площі пазів при заданому k_i та відомих значеннях відносних індукцій, чи знаходження k_n і перевірка за χ_z величини індукції в зубцях за наперед вибраними з технологічних чи інших міркувань k_i , висотою спинки статора та шириною зубця. Якщо співвідношення між χ_z і χ_s невідомі, можна прийняти $\chi_z \approx \chi_s$.

Описані вище залежності покладені в основу методики проектного розрахунку та оптимізації основних геометричних розмірів вентильних двигунів з постійними магнітами. Результати розрахунків з використанням запропонованої методики свідчать про достатній рівень її адекватності.

1. Ткачук В.І., Біляковський І.Є., Копчак Б.Л. Електропривод крісла-візка на базі вентильних двигунів без давачів у явному вигляді // Вісник Кременчуцького державного політехнічного інституту. – Кременчук, 2009. – С. 145–150. 2. Ткачук В.І., Біляковський І.Є., Біловус Р.О. Методика проектування вентильних двигунів з високоенергетичними постійними магнітами // Вісник КДУ ім. Михайла Остроградського. – Вип. 3/2010 (62). – Ч. 2. – С. 79–82.

УДК 631.51

Ю.В. Шабатура¹, Я.С. Паранчук², В.О. Чумакевич¹

¹ Академія сухопутних військ,

кафедра електромеханіки та електроніки

² Національний університет “Львівська політехніка”,

кафедра ЕАП

ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-СТІЙКИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

© Шабатура Ю.В., Паранчук Я.С., Чумакевич В.О., 2011

Розглянуто особливості структури, роботи та підхід до створення математичних моделей функціонально-стійких систем.

Ключові слова: електромеханічна система, функціональна стійкість, надійність, безвідмовність, адаптивність, відновлюваність, резервування.

The features of the structure, operations and approaches to building mathematical models of functional-stable systems

Key words: electromechanical system, functional stability, dependability, reliability, adaptability, restorability, backing.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Проблемна ситуація, що призвела до дослідження теорії функціональної стійкості, пов'язана з розробкою у кінці ХХ ст. складних автономних технічних систем, що функціонують в екстремальних умовах. Висока вартість і потенційна небезпека відмов складних технічних систем вимагають забезпечення відповідного рівня надійності і безпеки застосування. Традиційні методи, які засновані на

багатократному резервуванню, застосуванню систем вбудованого контролю і елементів з підвищеним рівнем надійності, не дають змоги продовжувати роботу складних технічних систем за наявності визначеного потоку відмов. У традиційних системах автоматичного керування складними технічними системами, які розділені на канали, необхідність введення додаткової апаратної надмірності для забезпечення надійності системи стала принциповим обмеженням цього підходу. Розроблення мікропроцесорних пристроїв керування та контролю працездатності складних електромеханічних систем провідними фірмами (Bosch, Siemens, ABB тощо) дала змогу автоматизувати як захист електромеханічних систем від внутрішніх і зовнішніх впливів (струмовий захист тощо), так і автоматичне їх відімкнення в позаштатних ситуаціях. У більшості відомих складних технічних систем перерозподіл ресурсів у середині системи неможливий. Особливістю складних електромеханічних систем є однотипність позаштатних ситуацій, на які налаштовані ці системи, однакова природа їх датчиків та сигналів і цифрове керування процесами. Отже, у разі відмови, або скритого дефекту програмованого контролера вся робота складної системи є неправильною, що може спричинити значні матеріальні, а іноді, і людські втрати. Отже, пошук шляхів підвищення надійності й безвідмовності роботи електромеханічних систем є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сьогодні як основні властивості складних систем за дії деяких чинників зовнішнього та внутрішнього середовища розглядають: надійність, стійкість, живучість, адаптивність. Кожна з цих властивостей не відображає того, що розуміється під функціональною стійкістю системи, навіть усі у комплексі вони також не можуть її характеризувати, оскільки не відображають одночасно активний характер властивості функціональної стійкості за дії невідомих збурень, "осмислений" відбір тих якостей, які повинні бути збережені і за рахунок чого це збереження можна одержати [1, 2]. У роботах професора О.А. Машкова вперше введено поняття функціональної стійкості динамічної системи, "як властивості системи, що полягає в здатності виконувати хоча б встановлений мінімальний обсяг своїх функцій при відмовах в інформаційній, обчислювальній і енергетичній частинах системи, а також дії впливів зовнішнього середовища, які передбачені умовами". Ці дослідження були продовжені в роботах [2–5] для різних класів складних систем.

Отже, поняття функціональної стійкості складної технічної системи може розглядатись як властивість системи виконати завдання за регламентованої кількості змін у стані самої системи, тобто зберігання її працездатності після прояву в ній допустимої кількості відмов і дії зовнішніх збурень.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями

Неможливість перерозподілу ресурсів між каналами обмежує можливість формування функціонально-стійкого керування. Дослідження [1–5] показали, що технологічною основою забезпечення функціональної стійкості є створення інформаційно-керуючих комплексів, які дозволили комплексувати ресурси системи і здійснювати їх перерозподіл, що забезпечує її функціональну стійкість [1–4]. Було встановлено, що принциповою умовою забезпечення властивості функціональної стійкості є можливість перерозподілу наявних ресурсів усередині системи. Завдання забезпечення функціональної стійкості можна розглядати як вид завдань адаптивного оптимального управління "у великому", що припускають оптимальне використання на кожному етапі або режимі функціонування системи усіх ресурсів (енергетичних, інформаційних, обчислювальних), що розташовуються, для досягнення головної для цього етапу мети при дотриманні багатьох обмежень.

В основі методів синтезу функціонально-стійкого керування лежить можливість синтезу оптимального керування в детермінованій постановці, яка впливає з так званого принципу розподілу, який для нелінійних систем дає субоптимальне рішення у вигляді з'єднання системи субоптимального оцінювання і системи оптимального або субоптимального управління, синтезовані для детермінованих умов.

Формулювання цілей статті

Наявність цифрових засобів керування та спостереження за роботою електромеханічних систем дають змогу використовувати теорію функціональної стійкості з врахуванням особливостей

систем. Як свідчить література [8, 9], сучасні мікропроцесорні засоби мають функцію перепрограмування та розширення своїх можливостей.

Виклад основного матеріалу дослідження

з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Для інформаційно-керованої електромеханічної системи, що описується нелінійними рівняннями, і відмовама у вигляді стрибкоподібної зміни структури, запропонований критерій функціональної стійкості у формі спеціального графа.

Розглядається граф $\Gamma = \{S, J\}$, де S – множина вершин графа $S = \{x_i, y_j, u_k\}, i = [1, \dots, n], j = [1, \dots, l], k = [1, \dots, m]$, відповідних компонентам векторів X, Y, U ; J – множина дуг графа, відповідних наявності функціонального зв'язку між компонентами $J = \{(X_i, Y_j), (Y_j, U_k), (U_k, X_i)\}$.

Оскільки дані відмови відповідають зміні функціонального зв'язку між компонентами векторів X, Y, U , то динамічна система може бути функціонально стійкою, якщо за відмови існує шлях $A = (X_i, \dots, U_k)$, що включає усі компоненти векторів X та U .

Для розподілених інформаційно-керуючих систем, які описуються у вигляді неорієнтованого графа $G(V, E)$, $v_i \in V, e_{ij} \in E, i, j = 1, \dots, n$, з суміжною матрицею

$$A = \| a_{ij} \|, \quad i, j = 1 \dots n, \quad a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } e_{ij} \in E; \\ 0, & \text{при } e_{ij} \notin E. \end{cases} \quad (1)$$

де множина вершин V відповідає безлічі вузлів комутації розмірності n , а множина ребер E – множина ліній зв'язку між вузлами комутації, був запропонований інший критерій: функціональна стійкість забезпечуватиметься, якщо між якою-небудь парою вузлів комутації знайдеться хоч би один маршрут передачі інформації.

Перевага цього критерію полягає в тому, що з'являється можливість кількісно оцінити функціональну стійкість поточної структури розподілених інформаційно-керуючих систем на підставі простих зовнішніх ознак.

Також на різних етапах роботи необхідно виконувати таку послідовність дій.

На етапі проектування для реалізації принципу необхідно:

1. Вибрати необхідний вид або види надмірності інформації. Йдеться про структурну надмірність, тобто задача зводиться до визначення необхідної кількості мікропроцесорних засобів, їх місцерозташування та функції роботи в часі.
2. Забезпечити роботу спеціальної програми, що дає змогу системі функціонувати незалежно.
3. Забезпечити завадостійкість на конструктивно-технологічному рівні.
4. Забезпечити високий рівень надійності, відмовостійкості і живучості комплектуючих елементів.

Окрім введення в систему надмірності на етапі проектування повинен бути розроблений і закладений алгоритм формування поновлювального управління, що відбиває наслідки нештатних ситуацій. Для цього необхідно:

1. Реалізувати можливість виявлення нештатної ситуації (НС).
2. Ідентифікувати НС.
3. Локалізувати дію НС на систему.
4. Відбивати наслідки НС шляхом перерозподілу ресурсів.

Розглянемо алгоритм виявлення і відбивання відмов функціонально-стійкого бортового інформаційно-керуючого комплексу.

Отже, складна електромеханічна система є багатопозиційною системою, принцип дії якої ґрунтується на обчисленні параметрів роботи виконавчих механізмів, порівняння її з заданою програмою та вироблення відповідних керуючих впливів. В [6, 7] наведено вимоги стійкої роботи електромеханічних систем. Звідси витікають основні вимоги до забезпечення функціональної стійкості складних електромеханічних систем.

1. Забезпечити в зоні видимості споживача достатню кількість джерел інформації про стан елементів системи

$$N_{vid(p)}^U > N_{vid(p)min}^U ;$$

$$N_{vid(p)}^I > N_{vid(p)min}^I ,$$

де $N_{vid(p)}^U$ – кількість джерел інформації про напругу елементів системи; $N_{vid(p)min}^U$ – мінімальна кількість джерел інформації про напругу елементів системи; $N_{vid(p)}^I$ – кількість джерел інформації про струми елементів системи; $N_{vid(p)min}^I$ – мінімальна кількість джерел інформації про струми елементів системи.

2. Забезпечити працездатність всіх елементів електромеханічної системи

$$\forall x_{vid(i)} \in X_{vid} \Leftrightarrow w_i(t) = 1, t \in]0, t[;$$

$$\forall y_{vid(j)} \in Y_{vid} \Leftrightarrow J_j(t) = 1, t \in]0, t[,$$

де $X_{vid} = \{x_i\}$ – безліч працездатних джерел інформації про напругу елементів системи; $Y_{vid} = \{y_j\}$ – безліч працездатних джерел інформації про струм елементів системи; $w_i(t)$ – булева функція, що набуває значення 1, якщо джерело інформації про напругу елементів системи знаходиться в працездатному стані і 0 – у непрацездатному стані; $J_j(t)$ – булева функція, що набуває значення 1, якщо джерело інформації про струм елементів системи знаходиться у працездатному стані і 0 – у непрацездатному стані; t – поточний час експлуатації.

3. Забезпечити розміщення джерел інформації про елементи системи, що виключає перешкоди

$$\forall x_{vid(i)}^r \in X_{vid}^r \Leftrightarrow w_i^r(t) = 1, t \in [0, t[,$$

де $X_{vid}^r = \{x_i^r\}$ – безліч працездатних ліній передачі інформації від джерел інформації про напругу елементів системи; $w_i^r(t)$ – булева функція, що набуває значення 1, якщо лінія передачі інформації від джерел інформації про напругу елементів системи в працездатному стані і 0 – у непрацездатному стані;

4. Забезпечити працездатність апаратури складної електромеханічної системи

$$\forall z_k \in Z \Rightarrow m_k(t) = 1, t \in [0, t[,$$

де $Z = \{z_k\}$ – множина електромеханічної системи (ЕМС); $m_k(t)$ – булева функція, що набуває значення 1, якщо ЕМС перебуває в працездатному стані і 0 – у непрацездатному стані.

Ефективність функціонування складної електромеханічної системи кількісно оцінюється точнісними характеристиками виконання команд керування.

Визначимо P_n як ймовірність розв'язання задач із заданою якістю. Висувається вимога до значення цього показника

$$P_n > P_n^{\min} . \tag{2}$$

Умова (2.5) є необхідною, але недостатньою для функціональної стійкості складної ЕМС і є ознакою функціональної стійкості.

Дійсно, цілком можливий такий стан системи, за якого дотримання цієї умови задовольнятиме споживача за точністю і надійністю, але лише до появи нештатної ситуації, оскільки не буде можливості відбивати її наслідки, тобто система буде працездатною, але не функціонально стійкою.

Отже, для кількісного оцінювання функціональної стійкості ще необхідні показники, які характеризують здатність парирувати наслідки нештатних ситуацій, що, своєю чергою, визначається наявністю надмірності і можливістю нею управляти.

В умовах невизначеності це можна описати так.

Нехай A – подія, що полягає в тому, що ЕМС має властивість парирувати наслідки нештатних ситуацій, зумовлених умовами, тоді ймовірність цієї події – $P(A) = P_{\text{пар}}$.

Враховуючи попередні міркування можемо записати, що

$$A = A_I \cap A_{кер}; A \cap (\overline{A_I} \cup \overline{A_{кер}}) = \emptyset, \quad (3)$$

де A_I – подія, яка полягає в наявності надмірності; $A_{кер}$ – подія, яка полягає в тому, що є можливість керувати надмірністю.

Тоді, $P(A_I) = P_I$ – імовірність наявності надмірності або резерву у системі; $P(A_{кер}/A_I) = P_{кер}$ – імовірність того, що є можливість керувати надмірністю, або ймовірність керувати надмірністю.

Наявність надмірності в системі залежить від багатьох факторів. Розглянемо програмну надмірність, суть якої – додаткові (резервні) обчислювачі (цифрові регулятори) або програмне забезпечення, що перебувають в “гарячому” або “холодному” резерві.

У деяких випадках система функціонує достатньо малий час і тоді для підтримання необхідного рівня функціональної стійкості доцільно мати додаткові обчислювачі (цифрові регулятори) в “гарячому” резерві. Не вимагається реалізації алгоритму поновлюючого керування і $P_{кер}=1$.

Потрібно зазначити, що сучасні давачі малогабаритні і недорогі, тому можливе їх розміщення на об’єктах, призначених для виконання інших основних функцій. Наприклад, одним давачем можна спостерігати за низкою параметрів, дублюючи їх фізично у «гарячому» резерві.

Мікропроцесорні засоби малогабаритні, але не є дешевими виробами, тому важливо враховувати їх розміщення на об’єктах. Один мікропроцесорний засіб може обслуговувати декілька об’єктів і резервування можливе лише програмне. Багатофункціональність таких пристроїв вимагає розв’язання декількох задач, спрямованих на створення сприятливих умов роботи електромеханічних засобів. Необхідно відзначити, що завантаженість програмами повинна забезпечувати не менше третини запасу програмних ресурсів.

Отже, алгоритм формування поновлюючого управління повинен враховувати не тільки необхідність забезпечення функціональної стійкості складної електромеханічної системи, але і вплив виконання додаткових функцій на якість розв’язання основних задач, безпосередньо пов’язаних з виконанням певної (поставленої) задачі.

У загальному вигляді

$$P_{кер} = P_{кер}(F_I), \quad (4)$$

де F_I – чинники, що впливають на поновлююче керування.

Отже, імовірність парирования нештатної ситуації розраховується так:

$$P_{нар} = P_I P_{нар}. \quad (5)$$

У разі забезпечення властивості функціональної стійкості висувається вимога:

$$P_{нар} > P_{нар}^{\min}. \quad (6)$$

де $P_{нар}^{\min}$ – мінімально допустиме для забезпечення функціональної стійкості значення ймовірності відбивання наслідків нештатних ситуацій під час функціонування складної ЕМС.

Підкреслимо, що система, яка здатна парировати наслідки нештатних ситуацій, але не задовольняє споживача якістю інформації, не є функціонально стійкою. Отже, одночасне виконання (2) і (6) є необхідною і достатньою умовою функціональної стійкості складної електромеханічної системи.

Висновки

1. Розроблено концептуальні засади забезпечення функціональної стійкості складної електромеханічної системи, що містять поняття, стратегію забезпечення, показник, критерій, галузь, межу і запас функціональної стійкості та виражають основну ідею створення високоефективної системи.

2. Функціональна стійкість складної електромеханічної системи – це її властивість, що полягає в здатності виконувати хоча б установлені нормативними вимогами мінімальний обсяг своїх функцій в нештатних ситуаціях, передбачених умовами.

3. Стратегія забезпечення функціональної стійкості складної електромеханічної системи являє собою комплекс заходів, що поєднані загальною метою і спрямовані на розв'язання відповідних задач на всіх етапах життєвого циклу системи для формування і підтримки властивості функціональної стійкості.

4. Загальна ідея стратегії забезпечення функціональної стійкості полягає у створенні необхідної надмірності і можливості використовувати її для подальшої під час експлуатації локалізації, а також і відбивання наслідків нештатних ситуацій. Для цього розв'язуються задачі оптимізації надмірності в системі; відбивання наслідків нештатних ситуацій за рахунок введеної надмірності; забезпечення відновлення системи.

5. Особливість формування поновлюючого керування при так званому “гарячому” і “холодному” резерві, полягає в тому, що алгоритм повинен враховувати не тільки необхідність забезпечення функціональної стійкості складної електромеханічної системи, але і вплив виконання додаткових функцій.

1. Повышение эффективности бортовых информационно-управляющих комплексов на основе обнаружения и парирования отказов в процессе управления: Отчет о НИР/ КВВАИУ. – № 09026. – К.: КВВАИУ, 1990. – С. 226–264. 2. Машков О.А., Вихляев А.Ю., Запара А.В. Методы моделирования функционально-устойчивых информационно-управляющих комплексов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1993. – № 4. – С. 86–92. 3. Барабаш О.В., Козелков С.В., Машков О.А. Понятійний апарат функціональної стійкості розподілених інформаційно-керуючих систем // Зб. наук. праць НЦ ВПС ЗС України. – 2005. – Вип. 7. – С. 87–95. 4. Машков О.А., Кононов А.А. Обеспечение функциональной устойчивости бортовых информационно-управляющих комплексов авиационно-космических систем // Зб. наук. праць. – К.: КІВПС, 1998. – №3. – С. 24–29. 5. Машков О.А., Чумакевич В.О., Шуренок В.А. Шляхи створення та дослідження функціонально-стійкої моделі вимірювально-обчислювального комплексу // Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. праць НАН України, ІПМЕ. – 2003. – Вип. 24. – С. 40–47. 6. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Маляр А.В. Моделювання електромеханічних систем із стохастичним принципом керування // Електромеханіка. Теорія і практика: Пр. наук. техн. конф., присвяченої 100-річчю від дня народження Тихона Губенка. – Львів-Славськ, 1996. – С. 127–129. 7. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Маляр А.В. Дослідження електромеханічної системи, що перебуває під дією випадкових збурень // Труды конф. с междунар. участием “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. – Харьков: Основа, 1995. – С. 104–107. 8. www.schneider-electric.ru. 9. www.abb.ru