
ТЕОРЕТИЧНА ЕКОЛОГІЯ

УДК 504:620: 681.5.01

ФУНКЦІОНАЛЬНА СТІЙКІСТЬ СКЛАДНИХ ЕКОЛОГІЧНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Машков О.А.¹, Аль-Тамими Р.К.Н.¹, Лами Д.Д.Х.¹, Косенко В.Р.²

¹Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ
dei2005@ukr.net;

²Національний транспортний університет
вул. Суворова, 1, 01010, м. Київ
kosenko_viktoriy@mail.ru

Досліджено функціонально стійкі екологічно складні системи й математичну формалізацію властивості їх функціональної стійкості. Описано перспективні напрями забезпечення екологічної безпеки техногенних систем. *Ключові слова:* екологічна безпека, техногенна система, функціональна стійкість.

Функциональная стойкость сложных экологическо опасных динамических объектов. Машков О.А., Аль-Тамими Р.К.Н., Лами Д.Д.Х., Косенко В.Р. Исследованы функционально устойчивые сложные экологические системы и математическая формализация свойства их функциональной устойчивости. Описаны перспективные направления обеспечения экологической безопасности техногенных систем. *Ключевые слова:* экологическая безопасность, техногенная система, функциональная устойчивость.

Functional stability of complex ecologically hazardous dynamic objects. Mashkov O., Al-tameemi R.K.N., Lami D.J.H., Kosenko V. Functionally stable complex ecological systems and mathematical formalization of the properties of their functional stability are investigated. Perspective directions of maintenance of ecological safety of technogenic systems are described. *Keywords:* environmental security, technical system, functional stability.

Концептуальні засади екологічної політики нашої держави сформульовані у Постанові Верховної Ради України від 5 березня 1998 р. “Основні напрями державної політики України у галузі охорони довкілля, використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки”. Створення системи екологічно збалансованого управління розвитком суспільства спрямовано на відновлення природних

властивостей довкілля, раціональне використання природних ресурсів та ефективний розвиток продуктивних сил країни.

Це потребує системного підходу до теоретичного (математичного) забезпечення екологічної безпеки та створення дієвих соціально-економічних екологічних моделей прогнозування розвитку регіонів. Системний характер вирішення проблем екології умов-

лює необхідність їх органічної кореляції з дією політичних, соціальних та економічних чинників. Це економічні механізми екологічної безпеки; державна система управління екологічною безпекою; нові технології екологічно безпечного розвитку промисловості, енергетики і транспорту; нормативно-правова діяльність у сфері екологічної безпеки; діяльність громадських організацій.

На сьогодні, на жаль, відсутні математичні описи визначених факторів, методики їх кількісного виміру через математичні рівняння.

Автори вперше пропонують застосувати теорію функціональної стійкості складних систем для опису та аналізу екологічно безпечних технологічних систем.

Існуючі численні публікації щодо функціонально стійких систем управління [1-17] зумовлюють необхідність поглибленого аналізу одержаних результатів для їх використання у розробці екологічно безпечних систем.

Екологічно безпечні системи мають забезпечувати дотримання вимог щодо збереження безпечних (комфортних для людини і навколишнього середовища) екологічних стандартів, нормативів, показників після виникнення екологічних аварій (катастроф), можливо з погіршеними характеристиками. Відомі часткові вирішення цієї проблеми: використання резервних інформаційно-вимірювальних систем, толерантних обчислювальних систем, адаптивних систем прийняття та реалізації управлінських рішень.

Постановка завдання. Екологічні системи управління мають відповідати конкретним вимогам:

- надійність об'єкта, його здатність зберігати в часі і у встановлених

межах значення ознак та параметрів і спроможність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах;

- стійкість об'єкта або збереження його робочого стану при впливі вражаючих засобів і непередбачених умов експлуатації;

- безпека об'єкта, що полягає в здатності упередити такі зміни своїх станів і властивостей, які були б небезпечні для людей і навколишнього середовища.

Сьогодні важливо для екологічних систем правильно діагностувати події і розуміти логіку їх розвитку у часі. Це дозволяє завчасно вжити відповідні заходи та розробити алгоритм протиаварійного і відновлюючого управління (дії). Під протиаварійним управлінням будемо розуміти управління, мета якого полягає в запобіганні розвитку аварійних подій, що виникають у складній системі управління. Відновлююче управління – це управління, мета якого полягає в поверненні до стану справності, працездатності або правильності функціонування складної системи управління.

Функціональна стійкість екологічної системи розглядається як властивість, що полягає у здатності задовільняти встановлені, хоча б мінімально, екологічно безпечні вимоги (функції) при внутрішніх пошкодженнях і (або) зовнішніх збуреннях. Реалізація функціональної стійкості екологічних систем може бути досягнута (за аналогією до динамічних систем) введенням в систему управління різних форм надмірності (структурної, функціональної, інформаційної тощо) і підготовленістю оператора до управління об'єктом управління при виникненні відмов і несправностей. Важливо своєчасно виявити початок

зародження екологічної аварії (катастрофи) і запобігти неминучість її розвитку в просторі і в часі.

До причини виникнення позаштатних (аварійних) ситуацій в екологічно небезпечних техногенних об'єктах віднесено порушення:

- в роботі інформаційних систем техногенно небезпечного об'єкта, які викликані різними відмовами, зокрема, інформаційних датчиків або перешкодами в лініях зв'язку;

- що виникають в процесі реалізації самих алгоритмів керування технологічними процесами, коли при роботі обчислювальних пристроїв відбуваються збої в процесорі або елементах (сегментах) запам'ятовуючого пристрою чи людина-оператор робить помилки в управлінні, які пов'язані з людським фактором;

- якщо в процесі реалізації управлінських рішень пошкоджуються виконавчі пристрої чи помилково або несвоєчасно впроваджуються управлінські рішення.

Якщо заздалегідь не передбачити можливість виникнення нештатних (аварійних) ситуацій, на техногенно небезпечному об'єкті управління може статися реальна екологічна аварія та катастрофа. Тому актуальним завданням для забезпечення екологічної безпеки на складних техногенних об'єктах є синтез управлінських рішень в умовах виникнення нештатних (аварійних) ситуацій.

Особливості забезпечення функціональної стійкості техногенно небезпечних екологічних систем

Уперше поняття «функціональна стійкість» і «принципові засади забезпечення функціональної стійко-

сті» були наведені в публікаціях по управлінню складними автономними об'єктами [1-4]. Під функціональною стійкістю системи розуміють її властивість зберігати здатність виконувати свої функції, задачі, цілі. Ці функції визначаються нормативними вимогами. При цьому враховується, що на систему впливають зовнішні збурення, при функціонуванні системи можуть виникати різні відмови, несправності, збої.

Встановлено, що принциповою умовою забезпечення функціональної стійкості системи є можливість перерозподілу ресурсів управління.

У традиційних системах керування динамічними об'єктами (рис. 1) передбачено відповідні канали управління (у складі датчиків, обчислювачів та виконавчих механізмів).

Технологічною основою забезпечення функціональної стійкості системи є комплексування їх ресурсів і можливість їх перерозподілу [5]. При цьому інформаційно-вимірвальна підсистема буде об'єднувати всі джерела інформації, обчислювальна підсистема – всі комп'ютери, а енергетична підсистема – всі виконавчі механізми і джерела енергії (рис. 2).

Математична формалізація властивості функціональної стійкості техногенно небезпечних екологічних систем

У системі (рис. 2) об'єкт керування описується рівнянням у відхиленнях від нормального (безпечного) режиму функціонування:

$$\dot{X}(t) = \cdot F(X(t), U(t), \delta(t), \xi(t), \gamma(t)); \quad (1)$$

інформаційно-вимірвальна підсистема – рівнянням спостережень:

$$Y(t) = f(X(t), \eta(t), \gamma(t)), \quad (2)$$



Рис. 1. Структура традиційних систем автоматичного управління



Рис. 2. Структура бортового інформаційно-керуючого комплексу

де $X(t)$ - n - мірний вектор стану системи; $U(t)$ - m - мірний вектор управління; $Y(t)$ - l - мірний вектор вимірювань; $\gamma(t)$ - n - мірний випадковий вектор, значення якого кількісно характеризує дію відмови на систему; $\gamma_0(t)$ - значення вектора $\gamma(t)$ при нормальному режимі функціонування; $\gamma_i(t)$ - відповідне i -тій відмови; $\xi(t)$ - випадковий вектор гауссівських збурень стану системи з нульовим вектором середніх та кореляційною матрицею

$$\xi(t) \in \Omega_\xi : M[\xi(t)] = 0;$$

$$M[\xi(t) \cdot \xi^T(t')] = Q(t) \cdot (t - t'). \quad (3)$$

$$\eta(t) \in \Omega_\eta : M[\eta(t)] = 0;$$

$$M[\eta(t) \cdot \eta^T(t')] = R(t) \cdot (t - t'), \quad (4)$$

де $\eta(t)$ - випадковий l -мірний вектор гауссівських завад вимірювань з нульовим вектором середніх і кореляційною матрицею.

Обчислювальна та енергетична підсистеми представляються рівняннями:

$$U(t) = u(Y, t), \quad (5)$$

$$\delta(t) = B(t)U(t) + \gamma(t), \quad (6)$$

де $B(t)$ -перехідна матриця управління розміром $n \times m$.

Мета управління полягає у зведенні до нуля координат вектора стану системи (в нашому випадку розглядаються лінеаризовані рівняння системи).

Критерій якості управління має вигляд:

$$I(X(t), U(t) / \gamma(t)) = M \left(\int_{t_0}^{t_k} X^T(t) \cdot \beta \cdot X(t) dt + \int_{t_0}^{t_k} U^T(t) \cdot C^{-1} \cdot U(t) dt \right). \quad (7)$$

Управління $U^*(t)$, яке забезпечує мінімум математичного очікування квадратичного критерію якості (7) для обраної моделі відмов $\gamma(t) \in \Omega_\gamma$ з урахуванням обмежень на область припустимих станів $X(t) \in \Omega_X$ та керувань $U(t) \in \Omega_U$, буде функціонально стійким при виконанні умов:

$$\left| I(X(t_0), U(t_0) / H_0(t_0)) - I(X(t_0), U(t_0) / H_i(t_0)) \right| < \varepsilon, \quad (8)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left| I(X(t), U(t) / H_0(t)) - I(X(t), U(t) / H_i(t)) \right| < \delta(\varepsilon). \quad (9)$$

Математичні умови (8) і (9) визначають математичну формалізацію властивості функціональної стійкості системи управління (1-6). Якщо в початковий момент часу відмова (пошкодження) призводить до погіршення якості функціонування системи управління $I(X, U)$ на величину μ , то функціонально стійке управління через деякий час відновить якість функціонування системи (величина погіршення якості функціонування не перевищить значення $\delta < \varepsilon$). На рис. 3. представлено графічну інтерпретацію властивостей динамічної та функціональної стійкості системи управління.

Отже, функціональну стійкість можна розглядати у вигляді стійкості математичного функціоналу якості системи. Такий підхід принципово відрізняється від властивості стійкості динамічної стійкості системи (стійкості фазових координат об'єкта управління).

Забезпечення функціональної стійкості техногенно небезпечних екологічних систем передбачає інші підходи порівняно з класичною теорією автоматичного регулювання [6-8]. У класичній теорії управління

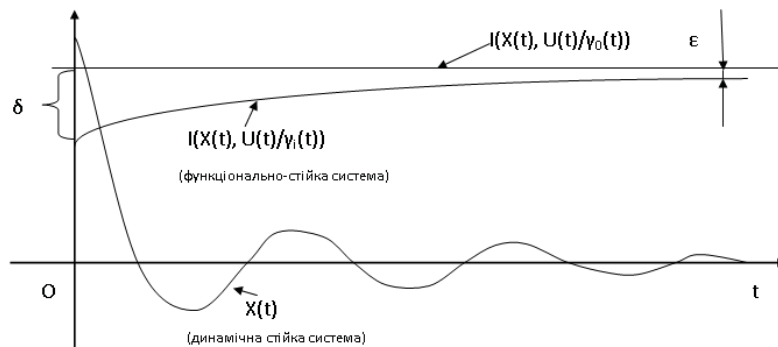


Рис. 3. Графічна інтерпретація властивостей динамічної та функціональної стійкості системи управління

вирішується завдання оптимізації «в малому». При цьому управління визначається за умови оптимізації перехідних процесів за обраними критеріями.

Завдання забезпечення функціональної стійкості техногенно небезпечних екологічних систем, при виникненні позаштатних аварійних ситуацій (відмов) у системі, може бути зведено до задачі адаптивного управління «у великому». Рішення цієї задачі передбачає в системі управління перерозподіл ресурсів (інформаційних, обчислювальних, енергетичних). Це дозволить забезпечити екологічну безпеку.

У роботах [9-12] показано взаємозв'язок понять: «функціональна стійкість», «надійність», «живучість», «відмовостійкість». Визначено, що традиційні методи підвищення надійності, живучості і стійкості до відмов технічних систем спрямовані на зменшення кількості можливих відмов і порушень. Методи забезпечення функціональної стійкості спрямовані на забезпечення виконання найбільш важливих завдань системою управління в разі, коли порушення в системі управління вже відбулися. В основі методів синтезу функціонально стійкого управління лежить принцип поділу, який передбачає послідовне виконання двох процедур: спостереження (оцінювання) і управління.

Особливість методів синтезу функціонально стійких техногенно небезпечних екологічних систем полягає в тому, що вони не передбачають необхідності виявлення причин відмов або пошкоджень [13-14]. Для формування спеціального відновлюючого управління важлива не причина, а наслідок прояву відмови або пошко-

дження в системі управління, порушення (погіршення) екологічних показників.

Технологія забезпечення функціональної стійкості техногенно небезпечних екологічних систем полягає в послідовному виконанні таких процедур.

- організація контролю стану техногенно небезпечної екологічної системи і виявлення чинника порушення (погіршення) екологічних показників;
- ідентифікація відмови або виявлення пошкодженої частини техногенно небезпечної екологічної системи (підсистема, комплекс, вузол, елемент);
- відключення ідентифікованого пошкодженого елемента від загальної системи управління;
- перерозподіл ресурсів системи управління (інформаційні, обчислювальні, енергетичні) щоб система зберегла здатність виконувати задані функції.

Час перехідного процесу у функціонально стійкій системі розглядається як часовий інтервал від початку виявлення відмови до закінчення процедури перерозподілу ресурсів складної системи.

За аналогією з критеріями динамічної стійкості (наприклад, критерії Вишнеградського, Гурвіца, Найквіста, Михайлова, Ляпунова) пропонуються критерії функціональної стійкості. Так, для складних техногенно небезпечних екологічних систем не завжди можливо зробити опис системи у вигляді диференціальних рівнянь. Але одночасно виявляється можливим встановити причинно-наслідкові функціональні зв'язки елементів і підсистем. У цьому випадку доцільно застосовувати математичний апарат теорії графів.

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 компонентів 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 ці відмови відповідають зміні функціонального зв'язку між компонентами векторів X, Y, U , то динамічна система може бути функціонально стійкою, якщо при відмові існує шлях $A = (X_i, \dots, U_k)$, що включає всі компоненти векторів X і U .

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

$$A = \| a_{ij} \|, \quad i, j = 1 \dots n,$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } e_{ij} \in E; \\ 0, & \text{при } e_{ij} \notin E; \end{cases} \quad (10)$$

де множина вершин V відповідає множині вузлів комутації розмірності n , а множина ребер E - множині ліній зв'язку між вузлами комутації, був запропонований інший критерій. Система буде функціонально стійкою, якщо між будь-якою парою вузлів комутації знайдеться хоча б один маршрут передачі інформації.

Особливість цього критерію полягає в тому, що з'являється можливість кількісно оцінити функціональну стійкість складної системи на підставі простих зовнішніх ознак.

Алгоритм виявлення та усунення можливих наслідків відмов у функціонально стійкій техногенно небезпечній екологічній системі

Для виявлення і усунення можливих наслідків відмов у системі формуються образи-еталони наслідків нештатних ситуацій, які викликані відмовами в системі управління. Образи-еталони зберігаються в пам'яті обчислювальних ресурсів (рис. 4) і порівнюються з образами реального (поточного) стану. За результатами порівняння образів робиться висновок про якість функціонування системи. Для кожного випадку відмови формується відповідне управління з метою запо-

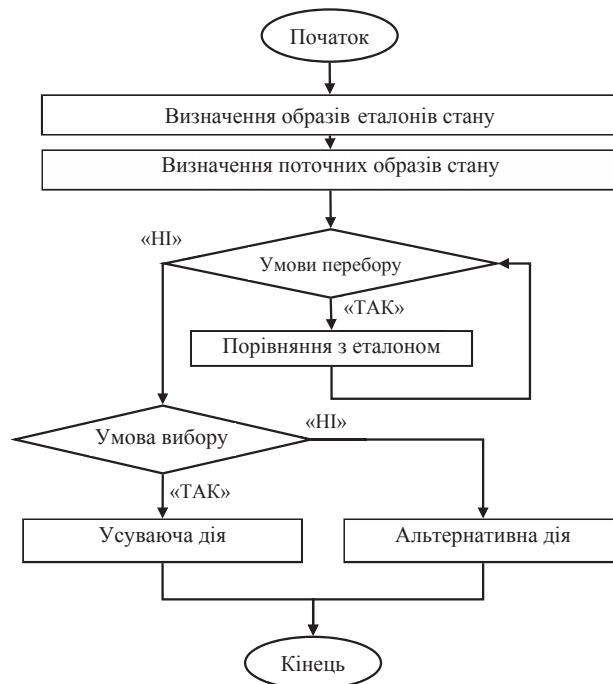


Рис. 4. Алгоритм виявлення та усунення можливих наслідків відмов функціонально стійкого інформаційно-керуючого комплексу

бігання негативних наслідків цієї відмови.

Особливість запропонованого алгоритму полягає в тому, що загальна задача синтезу функціонально стійкої системи поділяється на окремі задачі: синтез алгоритму виявлення відмов і синтез алгоритму усунення можливих наслідків відмов.

Області використання функціонально стійких техногенно небезпечних екологічних систем

Спочатку методи забезпечення функціональної стійкості застосовувалися для вдосконалення технічних можливостей складних технічних систем, які працюють в екстремальних умовах (наприклад, авіаційно-космічні системи). Подальший розвиток інформаційних технологій призвів до появи нових складних систем. З'явилася можливість забезпечити нормальне функціонування систем в умовах малоймовірних нештатних, аварійних ситуацій, які мають дуже серйозні наслідки. Прикладом таких систем є енергетичні системи, хімічні і нафтохімічні комплекси. Компоненти таких систем можуть бути розсосереджені на деякій території, включати різні засоби автоматизованої обробки інформації та управління. На розподілені інформаційно-керуючі системи негативно впливають внутрішні та зовнішні чинники. Внутрішні чинники це відмови, збої, помилки користувачів, корпоративних абонентів. Зовнішні фактори – несприятливі дії зовнішнього середовища.

У роботах [8, 11] визначено, що методи забезпечення спостережності, керованості та ідентифікації динамічних об'єктів не застосовні для тери-

торіально розподілених інформаційно-керуючих систем. Тому необхідні дослідження щодо визначення критеріїв, показників, ознак функціональної стійкості техногенно небезпечних екологічних систем.

Проблеми забезпечення функціональної стійкості сьогодні важливі для систем моніторингу техногенно небезпечних об'єктів з використанням геоінформаційних та аерокосмічних технологій. Введення надмірності (дублювання елементів) у систему призводить до збільшення вартості системи. При цьому не гарантується поліпшення якості функціонування системи. Питанням синтезу оптимальної структури надмірності функціонально стійких систем екологічного моніторингу присвячені роботи [16-17].

Новим перспективним напрямом досліджень є забезпечення функціональної стійкості транспортних засобів (трубопровідних, наземних, повітряних). Завдання досліджень – забезпечити їх нормальне функціонування при можливих відмовах обладнання, каналів зв'язку, а також несанкціонованого втручання. Це дозволить істотно підвищити безпеку застосування транспортних засобів.

Також перспективним напрямком досліджень є забезпечення функціональної стійкості ергатичних (людино-машинних) систем. У цих системах керуючим елементом є людина-оператор. Завдання забезпечення функціональної стійкості ергатичних систем може бути зведено до таких процедур: формалізація та опис дій людини-оператора в замкнутому контурі управління; розподіл функцій між людиною-оператором і апаратно-програмними засобами.

Висновки

Теорія функціонально стійких техногенно небезпечних екологічних систем є результатом системного підходу до вирішення проблеми підвищення екологічної безпеки. При цьому функціональна стійкість є новою властивістю, принципово відмінною від надійності, стійкості, відмовостійкості та динамічної стійкості.

Методи забезпечення функціональної стійкості спрямовані на більш

повне використання технічних ресурсів техногенно небезпечних екологічних систем. При цьому програмним і апаратним засобам відводиться не пасивна роль виконання жорсткої програми, а активний перерозподіл ресурсів для досягнення поставлених цілей функціонування.

Завдання забезпечення функціональної стійкості техногенно небезпечних екологічних систем можна розглядати як одну з актуальних наукових завдань екологічної безпеки.

Література

1. Машков О.А. О функциональной устойчивости бортовых информационно-управляющих комплексов // Вопросы повышения эффективности и качества систем управления полетом и навигации воздушных судов. – К.: КИИГА, 1990. – С. 79-83.
2. Машков О.А. Концепции построения функционально-устойчивых информационно-управляющих комплексов // Тез. докл. 6-й Всесоюзной конференции. – К.: АН УССР, 1991. – Ч. II. – С. 50-51.
3. Машков О.А., Косіков В.В. П'янов О.О. Матеріали патентних досліджень в області створення функціонально-стійких бортових інформаційно-керуючих комплексів / Зб. наук. праць КІВПС, 2000. – №10. – С. 83-92.
4. Машков О.А. Принципы построения функционально устойчивых бортовых информационно-управляющих комплексов // Тез. докл. межвед. научно-технической конференции "Проблемы управления и навигации авиационно-космических систем". – К.: КВВАИУ, 1991. – С. 63-65.
5. Машков О.А. Понятие функциональной устойчивости бортового информационно-управляющего комплекса // Оборудование летательных аппаратов. – К.: КИВВС, 1993. – Ч. III. – С. 25-29.
6. Машков О.А., Барабаш О.В. Проблеми моделювання функціонально-стійких складних інформаційних систем // Центр математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, 2002, с. 137-142.
7. Машков О.А., Барабаш О.В. Понятійний апарат функціональної стійкості розподілених інформаційних систем // Збірник наукових праць Наукового Центру Повітряних Сил ЗСУ. К.: НЦ ПС ЗСУ, 2004. – № 7. – С. 20-26.
8. Машков О.А., Дурняк Б.В., Обідін Д.М. Забезпечення функціональної стійкості складних технічних систем // Моделювання та інформаційні технології /Збірник наукових праць, Інститут проблем моделювання в енергетиці, вип. 64, Київ, 2012, с. 36-41.
9. Машков О.А., Косенко В.Р. Розробка алгоритмів синтезу оновлюючого керування для інформаційно-керуючих комплексів рухомих об'єктів / Моделювання та інформаційні технології / Збірник наукових праць, Інститут проблем моделювання в енергетиці, вип. 62, Київ, 2011, с. 208-225.
10. Машков О.А., Косенко В.Р. Задача синтезу оновлюючого керування при побудові функціонально-стійких бортових інформаційно-керуючих комплексів / Моделювання та інформаційні технології // Збірник наукових праць, Інститут проблем моделювання в енергетиці, вип. 61, Київ, 2011, с. 202-229.

11. Машков О.А., Косенко В.Р. Синтез функціонально-стійкої системи керування рухомим об'єктом із заданими динамічними властивостями // Збірник наукових праць, Інститут проблем моделювання в енергетиці НАН України, вип. 60, Київ, 2011, с. 186-214.
12. Машков О.А., Дурняк Б.В., Сабат В.І., Тупкало В.М., Тупкало С.В. Понятійний апарат теорії процесного управління / Моделювання та інформаційні технології // Збірник наукових праць, Інститут проблем моделювання в енергетиці, вип. 70, Київ, 2013, с. 146-153.
13. Mashkov V.F., Mashkov O.A. Problems of diagnosability with sensor networks when dealing with environment monitoring / Науково-технічний журнал «Інформаційні процеси, технології та системи на транспорті», НТУ, Київ, № 1, 2014, с. 182-191.
14. Mashkov V.F., Mashkov O.A. Problems of organization of test performance in sensor networks applied for environment monitoring / Науково-технічний журнал «Інформаційні процеси, технології та системи на транспорті», НТУ, Київ, № 2, 2014, с. 170-179.
15. Mashkov V.F., Mashkov O.A. Diagnosis of sensor networks applied for environment monitoring / Науково-практичний журнал «Екологічні науки», № 1/2015(7), К., ДЕА, 2015, с. 38-54-20.
16. Бондар О.І., Машков О.А. Інформаційні технології оцінювання впливу техногенних катастроф та діяльності екологічно небезпечних підприємств з використанням даних аерокосмічного моніторингу / Проблеми інформатизації: Матеріали третьої міжнародної науково-технічної конференції. – Київ: ДУТ; Полтава ПНТУ; Катівіце КЕУ; Париж: Університет VII Венсент-Сен-Дені; Орел: ОДУННВК; Харків: ХНДІТМ, 2014, с. 71.
17. Машков О.А., Косенко В.Р. Проблеми побудови функціонально-стійких комплексів екологічного моніторингу з використанням псевдосупутникових технологій / Проблеми інформатизації: Матеріали третьої міжнародної науково-технічної конференції. – Київ: ДУТ; Полтава ПНТУ; Катівіце КЕУ; Париж: Університет VII Венсент-Сен-Дені; Орел: ОДУННВК; Харків: ХНДІТМ, 2014, с. 71.