

## ВИБІР ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ЯК ЕТАП СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ДО ПРОЕКТУВАННЯ ВІДМОВОСТІЙКИХ СИСТЕМ

© Ваврук С.Я., Грос В.В., 2012

**Запропоновано функціональну модель відмовостійкої системи, яка забезпечує ефективну алгоритмічну базу для досягнення максимального рівня відмовостійкості за умови дотримання необхідних показників якості функціонування системи.**

**Ключові слова:** функціональна модель, системне проектування, відмовостійкість, критерії ефективності, цільова функція.

**A functional model of the fault-tolerant system was proposed. Functional model provides effective algorithmic base to achieve the maximum level of fault tolerance with respecting the necessary quality of the system.**

**Key words:** functional model, system design, fault tolerance, efficiency criteria, objective function.

### Вступ

Сучасні системи реального часу є багатокомпонентними і різномірними, створеними на базі апаратних, програмних та мережових засобів. Виявлення відмов, їх діагностування та забезпечення відмовостійкої роботи таких систем є складною проблемою на всіх етапах функціонування [1]. Тому одним з важливих завдань є передбачення можливих варіантів недостовірної та неправильної роботи та способів усунення їх впливу вже на ранніх етапах створення системи, а саме на етапі проектування. Одним зі способів розв'язання цієї задачі є розроблення моделей, які повинні базуватися на багатокритерійному системному підході й поєднувати як моделі системи, так і моделі забезпечення відмовостійкості, з аналізом і вибором типів алгоритмів, методів діагностування, шляхів реконфігурування. Визначення параметрів такої моделі є актуальним для організації системного підходу до проектування відмовостійких систем.

### Огляд літературних джерел

Системне проектування – це комплекс робіт, який складається з пошуку, досліджень, розрахунків з метою отримання опису, достатнього для створення нового об'єкта або виробу, його реконструкції, модернізації, що відповідає заданим вимогам [2]. У проектуванні застосовують системний підхід, який полягає у встановленні структури системи, типу зв'язків, визначенні атрибутів, аналізу впливів зовнішнього середовища.

У наш час існує багато методологій, технологій, інструментальних засобів проектування, які відрізняються призначенням та способом синтезу. Проте можна виділити такі базові принципи системного підходу до проектування [3–4]:

1. Розподіл складної ієрархічної системи на ряд підсистем, відтак роздільне їх проектування.
2. Аналіз всіх можливих варіантів побудови системи і вибір тих, що найбільше відповідають поставленим вимогам.
3. Аналіз ефективності та необхідних затрат на реалізацію кожного з можливих варіантів побудови системи для вибору найкращого із них. Критерій ефективності називають ще *цільовими функціями* оптимального проектування.
4. Розроблення моделей найкращих варіантів систем та експериментальне дослідження їх з метою отримання інформації про їх функціонування. Аналіз на моделі ефективності й вартості варіантів.
5. Порівняння варіантів, виконання оптимізації, уточнення границь, задач системи, критерію ефективності або прийняття оптимального варіанта.

Підходи до проектування відмовостійких систем часто є спеціалізованими під конкретну задачу чи область застосування, тому непридатні для проектування складних ієрархічних систем. Так, у [5] розглянуто системний підхід до проектування систем опрацювання сигналів (СОС), проте не оцінюються показники якості функціонування пристрою (наприклад, час та точність опрацювання даних) та обмеження, які на них накладаються. У [6–7] запропоновано метод організації процесу проектування на різних етапах та оцінки його ефективності з погляду глибини аналізу вхідних параметрів. У цих дослідженнях не розглядаються критерії оцінки та порівняння ефективності забезпечення відмовостійкості.

Залишається актуальним завданням виділення множини критеріїв для порівняння та оптимізації систем на етапі проектування. Такі критерії повинні повністю відповідати функціональному призначенню системи (цільовій функції). Наступним кроком є розроблення методів оцінки критеріїв та підходів до оптимізації систем на етапі проектування відповідно до них.

Виділивши критерії цільової функції, необхідно проаналізувати та виділити показники важливості кожного з них. У наш час розроблена велика кількість методів визначення кількісних оцінок важливості критеріїв та сформовані правила їх визначення [8–9]. Проте вони не дають можливості точно визначити важливості критеріїв. І, в результаті, використання різних методів приводить до отримання різних результатів. Залишається питання достовірності таких показників і їх використання в методах аналізу багатокритеріальних задач.

### **Постановка задачі**

Виконання декомпозиції цільової функції відмовостійкої системи для побудови її функціональної моделі. Розроблення підходів до проектування та вибір критеріїв для оптимізації відмовостійких систем для досягнення максимального рівня відмовостійкості з дотриманням необхідних показників якості функціонування системи.

### **Особливості системного підходу в забезпеченні відмовостійкості систем**

Особливості системного підходу до проектування відмовостійких систем розглядатимемо на прикладі підсистем керування та опрацювання радіолокаційної станції (РЛС), завдання призначення якої виконуються за три етапи, на яких до опрацювання інформації ставляться різні вимоги. Це дає можливість охопити широке коло алгоритмів опрацювання.

Проектування РЛС є багатоетапним процесом. Важливість кожного етапу важко переоцінити, проте необхідно пам'ятати, що ціна виявлення та виправлення помилок на кожній наступній ітерації проектування стає вагомішою. Тому невдалий вибір варіанта розв'язання задачі кожного етапу може зробити неактуальними результати подальших кроків проектування.

Першими кроками під час проектування будь-якої системи є визначення її функціонального призначення. Розв'язуючи цю задачу, необхідно описати її функціональну модель. Для цього розглянемо задачу проектування відмовостійкої системи як реалізацію складових частин її цільової функції [3–4]:

- реалізація завдань призначення об'єкта та взаємодії з навколишнім середовищем, зовнішніми об'єктами;
- реалізація завдань забезпечення внутрішньої стійкості системи.

Суть функціонального підходу полягає в абстрагуванні від внутрішньої організації пристрою і розгляду тільки його логіки функціонування [10].

Для формулювання математичного запису функціональної моделі необхідно проаналізувати особливості складових частин цільової функції, виявити об'єкти, необхідні для її реалізації.

Розробляючи функціональну модель реалізації завдань призначення об'єкта, спираються насамперед на досвід створення РЛС аналогічного призначення. Оскільки структура типового РЛС стійка до зміни функціонального призначення, то предметом розробки відмовостійкої системи є функціональна модель реалізації завдань забезпечення відмовостійкості системи, організація інтерфейсу взаємодії цих двох складових цільової функції та оптимального розподілу навантажень (ресурсів) між ними. Останнє зумовлене тим, що наявні ресурси системи обмежені і їх можна використати, з одного боку, на збільшення ступеня корисної дії, тобто пришвидшення виконання завдань призначення об'єкта, з іншого – на підвищення рівня забезпечення відмовостійкості системи.

Основними методами пришвидшення обчислювального процесу є конвеєризація та розпаралелювання, що зумовлює також конструктивну однорідність і модульність, як засоби спрощення

розробки та вартості системи [11]. Тому для кожного з алгоритмів виконується декомпозиція з метою виявлення та оцінювання можливості їх розпаралелювання. Так, використовуючи конструктивну однорідність та розпаралелення, ми отримуємо можливість виконувати оптимізацію функції реалізації завдань призначення системи за ресурсами (часовими та апаратними).

Виявлення відмов, що виникають впродовж обчислення, і надалі реорганізація процесу опрацювання потребують додаткових ресурсів, таких як алгоритми обходу помилки, додаткові елементи, надлишковий час виконання тощо. Тип необхідних ресурсів визначається методом, що використовується для виявлення/корекції [12]. Необхідний рівень відмовостійкості може досягатися введенням різного типу надлишковості (апаратної, програмної часової тощо). Такі методи забезпечення відмовостійкості можуть бути універсальними і спеціалізованими (алгоритмічна відмовостійкість). Одним із критеріїв оцінки методів забезпечення відмовостійкості є ймовірність отримання достовірного результату.

Спільним для цих двох складових цільової функції є розподіл ресурсів (часових та апаратних), який, з одного боку, веде до збільшення показників корисної дії за призначенням, з іншого – до безпечного і гарантоздатного функціонування. Тому важливим моментом є виявлення границь допустимого рівня параметрів для цих складових.

Виконавши декомпозицію *функції реалізації завдань призначення*, отримуємо розподілений у просторі та часі обчислювальний процес, який складається з множини алгоритмів його реалізації  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ , відповідно до структури системи опрацювання сигналів (СОС). Для кожного алгоритму, залежно від об'єму даних, типу сигналу, що опрацьовується, часу та ресурсів, необхідних для виконання, є кілька версій реалізації алгоритму  $A_i = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ,  $A_i \square A$ ,  $1 \leq i \leq n$ .

У межах встановлених обмежень  $\beta = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k\}$ , які визначаються технічним завданням (ТЗ), вибирають можливі алгоритми опрацювання та методи забезпечення відмовостійкості. Причому першочергово визначається множина оптимальних алгоритмів опрацювання  $A_{opt} = \{a_1, a_2, \dots, a_{opt}\}$ ,  $A_{opt} \subseteq A_i$ , тобто таких, які б задовольняли встановлені обмеження  $\beta$ . В множину цих алгоритмів входять також варіанти послідовно-паралельної їх організації. В межах цих алгоритмів та встановлених обмежень  $\beta$  формуються вектори ідентифікаторів  $I_j = \{i_1, i_2, \dots, i_v\}$ ,  $1 \leq j \leq opt$ , які в уніфікованій формі визначають алгоритм опрацювання та спосіб організації його виконання (зокрема розпаралеленням та конвеєризацією). Після цього аналізують ресурси, що залишились, і аналізують та вибирають методи забезпечення відмовостійкості, які можуть бути реалізовані (першочергово аналізуються можливості введення відмовостійкості (виявлення відмов) на алгоритмічному рівні) на основі векторів ідентифікаторів  $I$ . Після досягнення необхідних параметрів відмовостійкості в межах доступних ресурсів виконується оптимізація алгоритму опрацювання для отримання часової надлишковості, яка в ході функціонування системи дасть змогу виконати її реконфігурацію у випадках появи несправностей. Якщо недостатньо ресурсів для реалізації необхідних параметрів (показників) цільової функції, виконується модифікація завдання на проектування.

Побудова функціональної моделі виконується за два етапи (рис. 1). На першому проводиться пошук і вибір оптимальних алгоритмів реалізації завдань призначення системи, методів забезпечення їх відмовостійкості на різних рівнях деталізації. Це етап побудови моделі забезпечення відмовостійкості, яка використовується для систематизації, оптимізації обчислювального процесу. На другому етапі будується функціональна модель системи, яка використовуватиметься як об'єкт дослідження і проектування на наступних етапах системного проектування.

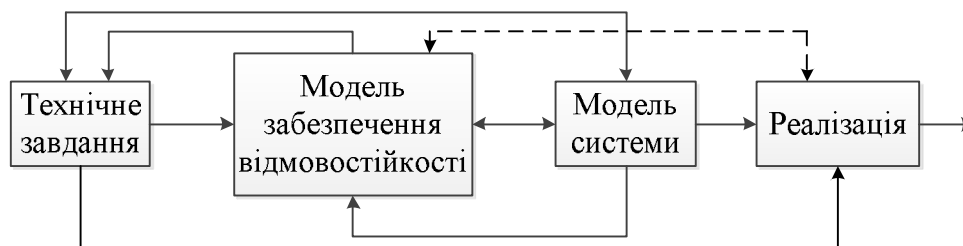


Рис. 1. Схема взаємодії функціональних моделей

З позиції поділу цільової функції об'єкта на складові компоненти розглянемо модель забезпечення відмовостійкості та модель відмовостійкої системи опрацювання.

Модель забезпечення відмовостійкості (рис. 2) дає змогу проаналізувати та спрогнозувати можливі варіанти реконфігурації системи у разі відмови частини елементів опрацювання, виконати оптимізацію складових цільової функції відповідно до важливості критеріїв ефективності функціонування за незмінних елементної бази, алгоритмів опрацювання та методів забезпечення відмовостійкості. Тобто модель забезпечення відмовостійкості дає змогу визначити для кожного алгоритму опрацювання кілька версій організації його виконання, залежно від точності опрацювання та можливості розпаралелення/конверсації, відповідні методи забезпечення відмовостійкості та обмеження для їх реалізації.

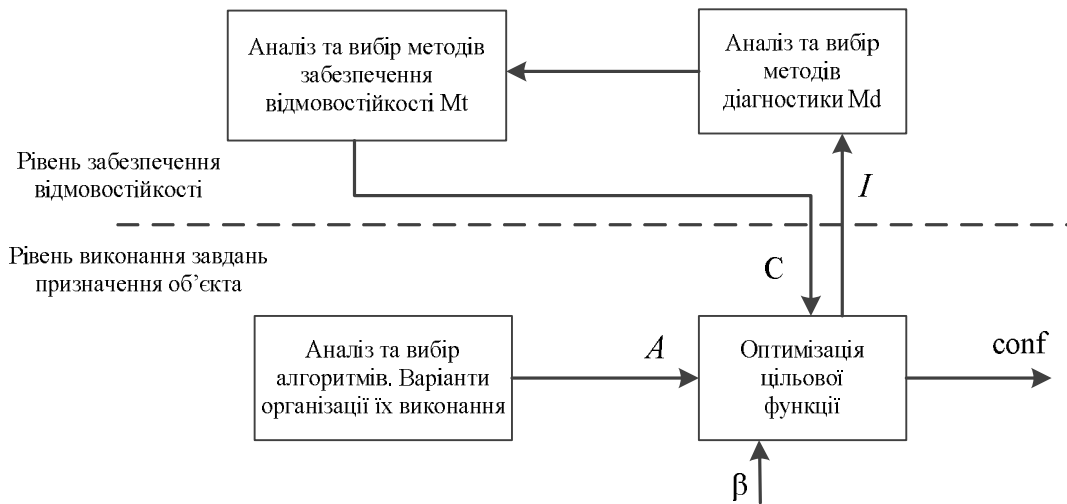


Рис. 2. Схема моделі забезпечення відмовостійкості

Узагальнену функціональну модель забезпечення відмовостійкості опишемо як сукупність восьми об'єктів:

$$F = (A, I, M_{FT}, conf, b, F_{MF}, F_{FT}, F_{OPT}),$$

де  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ ,  $A_i = \{a_1, a_2, \dots, a_d\}$ ,  $A_i \square A$ ,  $1 \leq a \leq n$ ;  $A_{opt} = \{a_1, a_2, \dots, a_{opt}\}$ ,  $A_{opt} \subseteq A_i$ ;  $I_j = \{i_1, i_2, \dots, i_v\}$ ,  $1 \leq j \leq opt$  – вектор ідентифікаторів;  $\beta = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k\}$  – вектор обмежень ТЗ;  $F_{MF}: A \times \beta \rightarrow I$ , – функція визначення оптимальних алгоритмів опрацювання та їх оптимізації;  $F_{FT}: A_{opt} \times \beta \times M_{FT} \rightarrow A_{opt}$  – функція реалізації завдань забезпечення відмовостійкості системи;  $F_{OPT}: F_{MF} \times F_{FT} \rightarrow conf$  – вектор параметрів конфігурації відмовостійкої системи;  $M_{FT} = \{M_1, M_2, \dots, M_f\}$ , – множина методів забезпечення відмовостійкості.

Оскільки така модель не дає вичерпного уявлення про логіку функціонування системи, то виконаємо декомпозицію загальної задачі проектування системи на ряд простіших і відповідне представлення загальної цільової функції  $F$  у вигляді суперпозиції цільових функцій  $F_{MF}$  (на рівні виконання реалізації завдань призначення об'єкта) і  $F_{FT}$  (на рівні забезпечення відмовостійкості) проектування підсистем.

Функціональну модель рівня виконання реалізації завдань призначення об'єкта опишемо через визначення оптимальних алгоритмів опрацювання та їх оптимізації як:

$$F_{MF} = (A, A_{opt}, b, F_P),$$

де  $F_P: A \times \beta \rightarrow A_{opt}$ ;  $F_P$  – функція аналізу та вибору алгоритмів опрацювання та варіантів організації їх виконання відповідно до вектора параметрів  $\beta$ .

Функціональну модель рівня забезпечення відмовостійкості опишемо як:

$$F_{FT} = (A_{opt}, M_D, M_T, C, b, F_D, F_T),$$

де  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{opt}\}$ , – множина векторів методів забезпечення відмовостійкості для допустимих алгоритмів опрацювання,  $c_i$  – вектор методів забезпечення відмовостійкості для  $a_i$  алгоритму опрацювання;  $F_D : M_D \times A_{opt} \rightarrow f$ , – функція аналізу та вибору методів виявлення та локалізації помилки;  $F_T : M_T \times f \times \beta \rightarrow C$  – функція відновлення системи;  $M_D, M_T$  – множини методів виявлення/локалізації та відновлення результатів, відповідно.

На другому етапі вибору функціональної моделі на основі параметрів проектування та вектора параметрів конфігурації відмовостійкої системи будується функціональна модель системи, над якою виконують експериментальні дослідження з метою отримання інформації за критеріями ефективності (ймовірність отримання достовірного результату, необхідні затрати тощо). Схему моделі забезпечення відмовостійкості наведено на рис. 3. Модель поділяється на два рівні відповідно до складових цільової функції. Проте такий розподіл на рівні є умовним, оскільки здебільшого методи виявлення/локалізації/відновлення помилки є інтегрованими в обчислювальний процес.

Узагальнену функціональну модель відмовостійкої системи опишемо як сукупність п'яти об'єктів:

$$F = (Q, X, Y, F_{MF}, F_{FT}),$$

де  $F_{MF}: X \rightarrow Y$  – функція реалізації завдань призначення об'єкта;  $F_{FT}: X \times Q \rightarrow Q$  – функція реалізації завдань забезпечення відмовостійкості системи;  $Q$  – скінченна множина станів системи;  $X, Y$  – дискретна послідовність вхідних та вихідних сигналів відповідно.

Аналогічно до розподілу цільової функції моделі забезпечення відмовостійкості розглянемо модель системи в вигляді суперпозиції цільових функцій  $F_{MF}$  і  $F_{FT}$ .

Функціональну модель складової реалізація завдань призначення об'єкта цільової функції опишемо як:

$$F_{MF} = (X, Y, F_P),$$

де  $F_P: X \rightarrow Y$  – функція опрацювання даних.

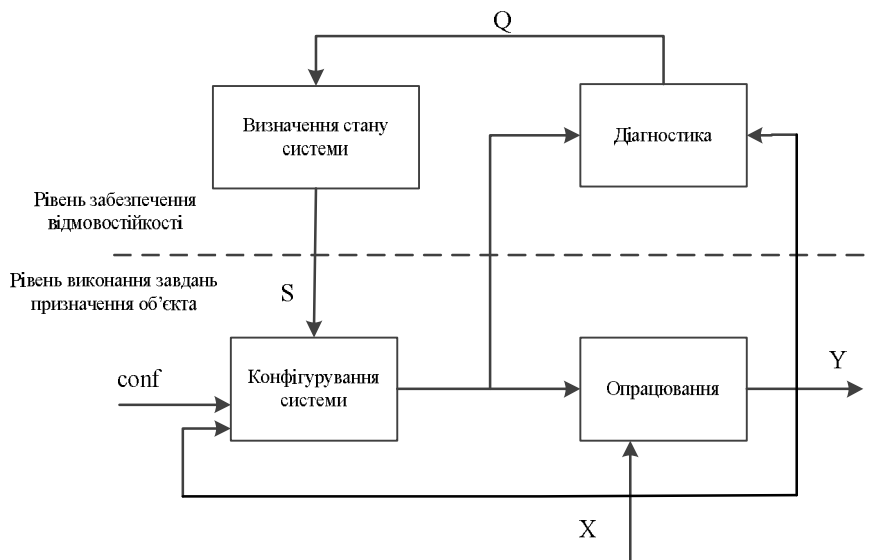


Рис. 3. Схема моделі відмовостійкої системи

Для реалізації завдань забезпечення відмовостійкості цільової функції функціональну модель опишемо на основі лінійного автомата, функція переходу якого забезпечує можливість швидкого реконфігурування:

$$F_{FT} = (S, Q, F_D, F_T),$$

де  $F_D: S \rightarrow Q, Q = \{q_0, q_1, \dots, q_{n-1}\}, 0 \leq i \leq n-1$  – функція діагностики елементів системи, яка призначена для виявлення та локалізації несправностей;  $F_T: S_s \times Q \rightarrow S_s, S_s = \{(s_0, s_1, \dots, s_{n-1})\}$  – функція, що визначає зміну стану системи, виконує реконфігурацію системи у разі виявлення відмови;  $S = \{(s_0, s_1, \dots, s_{n-1})\}$  – визначає множину станів елементів системи, які забезпечують обчислювальний процес;  $S_s$  – множина векторів станів.

Кількість станів системи визначається моделлю забезпечення відмовостійкості на основі етапів функціонування (опрацювання) відповідно до алгоритмів реалізації завдань призначення системи та доступних варіантів реконфігурації обчислювального процесу відповідно до методів забезпечення відмовостійкості.

Необхідні для реалізації алгоритму апаратні та часові затрати недоцільно вводити як параметри функціональної моделі, оскільки вони насамперед є критеріями для порівняння конкретних алгоритмів та предметом оптимізації. Додатковим критерієм для порівняння та оптимізації є ймовірність отримання достовірного результату як показника ефективності методів забезпечення відмовостійкості.

### Висновки

У статті розглянуто базові принципи системного підходу до проектування. Розроблено функціональну модель забезпечення відмовостійкості системи, яка дає змогу:

- виконати аналіз алгоритмів опрацювання, виділити їх базові структури для визначення допустимих структурованих алгоритмів, що задовольняють параметри опрацювання;
- вибрати оптимальні для структурованих алгоритмів методи забезпечення відмовостійкості;
- виконати оптимізацію складових цільової функції відповідно до важливості критеріїв ефективності функціонування.

На основі формування конфігурації обчислювального процесу та параметрів проектування будується функціональна модель системи, над якою виконують експериментальні дослідження для отримання інформації за критеріями ефективності.

1. Трофімов Ю. Л. *Инженерная психология: учебник* / Трофімов Ю.Л. – К.: Либідь, 2002. – 264 с.
2. Кузьмин С.З. *Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации*. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.
3. Теслер Г.С., Косс В.А. *Методика системного анализа с позиций системного подхода для потреб проектирования систем управления* // *Математичні машини і системи*. – 2008. – № 1. – С. 151 – 162.
4. Теслер Г.С., Косс В.А. *Системно-кибернетический подход к анализу функций активных объектов для реализации в современных технологиях* // *Математичні машини і системи*. – 2006. – № 2. – С. 3 – 13.
5. Емарлукова Я.В. *Системное проектирование отказоустойчивых устройств цифровой обработки сигналов [Текст]* / И.А. Калмыков, Я.В. Емарлукова, Е.М. Яковлева // *Современные наукоемкие технологии*. – 2011. № 3. – С. 32–35.
6. Ваврук Є., Грицик І. *Метод оцінки ефективності проектування відмовостійких систем опрацювання сигналів* // *Наукові нотатки: міжвуз. зб. (за галузями знань “Машинобудування та металообробка”, “Інженерна механіка”, “Металургія та матеріалознавство”)* Вип. 26 – Луцьк, 2009. – С. 22–26.
7. Ваврук Є.Я. Грицик І.В. *Шляхи забезпечення відмовостійкості обчислень в задачах опрацювання сигналів* // *Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали 14-ї Міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2012, Київ, 24 квітня 2012 р.* 2012. – 443 с.
8. Подиновский В.В., Ногин В.Д. *Парето-оптимальные решения многокритериальных задач*. – М.: Физматлит, 2007. – 256 с.
9. Подиновский В.В. *Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений*. – М.: Физматлит, 2007. – 64 с.
10. Скобцов Ю.А. *Логическое моделирование и тестирование цифровых устройств* / Ю.А. Скобцов, В.Ю. Скобцов. – Донецк: ИПММ. НАНУ, ДонНТУ, 2005. – 436 с.
11. Бобров Д.Ю, Доброжанский А.П., Зайцев Г.В., Маликов Ю.В., Цыпин И.Б. *Цифровая обработка сигналов в многофункциональных РЛС. Часть 3.* // *Цифровая обработка сигналов*. – 2002. – № 1. – С. 28–39.
12. Ваврук Є.Я., Грос В.В. *Методи забезпечення відмовостійкості вузлів вимірювання швидкості об’єкта* /Є. В. Ваврук, В. В. Грос // *Вісник / Нац. ун-т “Львівська політехніка”*. – 2010. № 688. – Л.:– С. 41–52.
13. Ваврук Є. *Організація відмовостійкості в системах опрацювання сигналів* // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Комп’ютерні науки та інформаційні технології”*. – 2006. – № 565. – С. 36–43.
14. Koren I., Krishna C.M. *Fault-tolerant systems*. Morgan Kaufmann Publishers. San Francisco-USA, 2007. – P. 399.