

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

**МУСІЄНКО АНДРІЙ ПЕТРОВИЧ**

УДК 004732; 621.396

**МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ  
СТІЙКОСТІ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ  
БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ**

Спеціальність 05.13.06 «Інформаційні технології»

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

**Київ – 2019**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному університеті телекомунікацій Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор, **Барабаш Олег Володимирович**, Державний університет телекомунікацій, завідувач кафедри вищої математики.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор **Рубан Ігор Вікторович**, Харківський національний університет радіоелектроніки, проректор з науково-методичної роботи;

доктор технічних наук, доцент **Зінченко Андрій Олександрович**, Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, начальник кафедри зв'язку та автоматизованих систем управління інституту інформаційних технологій;

доктор технічних наук, професор **Кучук Георгій Анатолійович**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри обчислювальної техніки та програмування факультету комп'ютерних та інформаційних технологій.

Захист відбудеться «28» лютого 2019 року об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.861.05 у Державному університеті телекомунікацій за адресою: 03110, м. Київ, вул. Солом'янська, 7, конференц-зал.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного університету телекомунікацій за адресою: 03110, м. Київ, вул. Солом'янська, 7  
Автореферат розісланий «26» січня 2019 року.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук



В.В. Жебка

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В наш час інформаційні системи виконують різні функції. Однією із них є забезпечення користувачів можливістю доступу до інформації в будь-який момент часу, не залежно від місця знаходження абонента. Всі інші вимоги, такі, як продуктивність, сумісність, керованість, захищеність, розширюваність і масштабованість пов'язані з якістю виконання цієї основної задачі. На даний час бездротові сенсорні мережі розвиваються швидкими темпами. Поштовхом для їх розвитку послужили військові технології, зокрема, системи спостереження в гарячих точках. Сьогодні ці мережі складаються з розподілених незалежних пристроїв, які оснащені датчиками для моніторингу фізичних умов, і застосовуються в промисловій інфраструктурі, автоматичі, охороні здоров'я, транспорті і багатьох інших сферах людської діяльності.

Перші дослідження в області бездротових сенсорних мереж розпочалися на початку 1980-х років, коли Управління перспективних досліджень і розробок Міністерства оборони США впровадило програму розподілених сенсорних мереж для інформаційного забезпечення збройних сил. Передбачалося, що розподілені сенсорні мережі матимуть безліч просторово розподілених недорогих чутливих вузлів, які взаємодіють один з одним, але керованих автономно. При цьому інформація спрямовується у будь-який вузол, де вона може оброблятися, зберігатися, передаватися. Попри те, що перші дослідники сенсорних мереж мали чітке уявлення про розподілені сенсорні мережі, сама по собі технологія не представляла готовий продукт. Датчики були досить об'ємними, розміри досягали десятків сантиметрів, а можливості практичного застосування були дуже обмеженими. Більше того, перші розподілені сенсорні мережі не використовували бездротовий зв'язок.

Нова хвиля досліджень в області бездротових сенсорних мереж почалася в 1998 році і стала привертати все більше уваги у дослідників з різних країн. Основним завданням наукових досліджень нових сенсорних мереж стали мережеві технології та обробка мережевої інформації для бездротових середовищ, що сомоорганізуються, що характеризуються високою динамікою, а також сенсорних вузлів з обмеженими ресурсами. Крім того, сенсорні вузли стали набагато меншими за розміром від декількох сантиметрів до декількох міліметрів і дешевшими. Це, у свою чергу, стало причиною появи великої кількості можливостей практичного використання сенсорних мереж, таких як моніторинг навколишнього середовища, моніторинг параметрів автомобіля, моніторинг параметрів тіла людини, інтернет речей тощо.

На сьогоднішній день бездротові сенсорні мережі (БСМ) вважаються однією з найбільш важливих технологій XXI століття. Технологія побудови бездротових сенсорних мереж дозволяє здійснювати «всюди доступне зчитування» у рамках усього промислового процесу, може забезпечити досягнення і підтримання важливих параметрів. Ці параметри являються

важливими для впровадження оптимального управління для досягнення мети підвищення якості виробництва продукції і зниження споживання енергії.

Бездротові сенсорні мережі функціонують в умовах впливу зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів. В наслідок негативного впливу елементи мережі можуть виходити з ладу. Тому в таких умовах важливим є забезпечення неперервного автономного функціонування бездротових сенсорних мереж. Таке функціонування може бути здійснено завдяки забезпеченню властивості функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж. Під функціональною стійкістю складної технічної системи в роботі розуміється можливість функціонування системи, нехай із зменшенням якості, протягом заданого часу під впливом зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів. Під зовнішніми та внутрішніми дестабілізуючими факторами розуміються відмови, збої елементів системи, навмисні пошкодження, бойові ураження, електромагнітні завади, помилки обслуговуючого персоналу. Забезпечення властивості функціональної стійкості будь-якої складної технічної системи здійснюється в три етапи: ідентифікація нештатної ситуації, локалізація нештатної ситуації, відновлення функціонування за рахунок перерозподілу ресурсів.

Питанням побудови оптимальних складних технічних систем присвячено велику кількість наукових робіт А.В. Суздалева, Ю.П. Зайченка, В.Г. Лазарева, В.С. Семеніхіна, І.А. Мізіна, В.Ф. Колчина, Б.П. Філіна, В.К. Попкова, О.А. Машкова, О.В. Барабаша, Г.А. Кучука, Д.М. Обідіна, Ю.В. Кравченка, О.А. Кононова а також Д. Берсекаса, Л. Клейнрока, Д. Девіса, П. Верми, Г. Френка, Р. Прима і ін.

Питання відмовостійкості систем досліджувалось в роботах А.А. Авіжиєніса, В.А. Машкова, О.Ю. Ільїна, Ю.М. Коростіля, В.А. Савченка та інших вчених. Питання стійкості систем щодо зовнішніх інформаційних впливів досліджувалось О.Г. Додоновим, Д.В. Ланде, І.Ю. Субачем, Ю.В. Журавським, І.В. Рубаном.

Проблеми побудови та розгортання сенсорних мереж, а також кодування даних вирішувались науковцями, серед яких: С.Г. Бунін, В.О. Романов, В.А. Романюк, А.О. Зінченко, І. Akyildiz, С. Fragouli, R. Ahlswede та ін. У цих роботах розглядаються питання проектування й оптимізації складних технічних систем, що володіють певною ефективністю функціонування в залежності від обраного показника якості: вартості проектування і експлуатації системи, середнього часу затримки повідомлення в мережі, надійності елементів системи. Велика увага приділяється задачі синтезу живучих і надійних мереж. Разом з тим, в цих роботах не в повній мірі відображені питання визначення оптимального рівня надмірності для парирування руйнувань різного рівня і збереження системою можливості виконання основних функцій в умовах впливу внутрішніх та зовнішніх дестабілізуючих факторів. Виходячи з цього, недосконалість і обмеженість існуючих наукових методів синтезу складних технічних систем, зокрема, бездротових сенсорних мереж, не дозволяє забезпечити їх функціональну стійкість.

Таким чином, на даний час в практиці і теорії побудови та експлуатації існуючих бездротових сенсорних мереж загострилося протиріччя між необхідністю сталого функціонування бездротових сенсорних мереж в умовах дії внутрішніх та зовнішніх дестабілізуючих впливів і можливостями існуючих методів забезпечення функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж.

Для розв'язання вказаного протиріччя в дисертаційній роботі сформульовано актуальну науково-прикладну проблему *щодо розробки методологічних основ багатокритеріального синтезу функціонально стійких бездротових сенсорних мереж, які мають автономно функціонувати в умовах впливу зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів.*

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Тематика дисертаційної роботи і отримані результати безпосередньо відповідають пріоритетності розвитку інформаційних та комунікаційних технологій в Україні до 2020 р. згідно із Законом України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», від 11.07.2001 № 2623-III, зі змінами внесеними згідно із Законом України «Про наукову та науково-технічну діяльність» від 26.11.2015 № 848-VIII.

Дисертаційна робота виконана відповідно до планів наукової і науково-технічної діяльності Державного університету телекомунікацій і є частиною досліджень в рамках науково-дослідних робіт:

– «Методи забезпечення функціональної стійкості розподілених інформаційно-телекомунікаційних систем» (шифр «РІС», Державний реєстраційний номер 0114U000402, ДУТ, м. Київ);

– «Розробка методики побудови оптимальної системи передачі інформації інфокомунікаційної мережі» (шифр «ОСП»), Державний реєстраційний номер 0115U004571, ДУТ, м. Київ), які виконував Державний університет телекомунікацій у 2014 – 2017 р.

Особисто автором в НДР, шифр «РІС», запропоновано необхідна і достатня умова функціональної стійкості складних технічних систем, зокрема, бездротових сенсорних мереж, яка полягає в працездатності всіх сенсорних вузлів і наявності альтернативних маршрутів передачі інформації між вузлами; в НДР шифр «ОСП» запропоновано методику синтезу та забезпечення функціональної стійкості бездротової сенсорної мережі. Показано, що реалізація методики забезпечення функціональної стійкості дозволяє: скоротити час реакції системи на виникнення відмови та проводити зміни в засобах забезпечення функціональної стійкості в процесі накопичення знань про відмови.

**Мета і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає у підвищенні інтегрального показника функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж шляхом розробки та реалізації моделей та методів забезпечення властивості функціональної стійкості мереж.

У відповідності до поставленої мети, для вирішення науково-прикладної проблеми, в роботі сформульовано такі завдання:

– провести аналіз і оцінку внутрішніх і зовнішніх факторів, що впливають на процес функціонування бездротових сенсорних мереж;

- розробити основні поняття і визначення функціональної стійкості щодо бездротових сенсорних мереж;
- розробити ознаки, показники, границі і запас функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж;
- удосконалити метод аналізу бездротових сенсорних мереж;
- розробити методіку синтезу бездротових сенсорних мереж на основі ієрархічної організації засобів забезпечення функціональної стійкості;
- розробити метод діагностування прихованих відмов в бездротовій сенсорній мережі;
- розробити узагальнену методіку синтезу функціонально стійкої бездротової сенсорної мережі
- виконати експериментальну оцінку отриманих теоретичних результатів шляхом математичного моделювання.

**Об'єктом дослідження** є процес функціонування бездротових сенсорних мереж.

**Предметом дослідження** є забезпечення функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж, які функціонують під дією зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих впливів.

**Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі використано методи дослідження на основі системного підходу та теорії складних систем із застосуванням математичних моделей і методів дискретної математики. Концептуальні основи функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж засновані на принципах теорії оптимізації, теорії ймовірностей. Теоретичні основи функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж будуються з використанням теорії випадкових графів, теорії ймовірностей, комбінаторної теорії, аналітичного моделювання та дискретної оптимізації. Методи теорії надійності використані для розробки методів аналізу показників функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж. Методи програмування – при розробці діагностування прихованих відмов в структурі бездротових сенсорних мереж.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у такому:

1. Вперше розроблено необхідну і достатню умову функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж, яка полягає в працездатності всіх вузлів комутації і наявності альтернативних маршрутів передачі інформації між вузлами. Дане наукове положення є основою запропонованих методологічних основ і дозволяє на його базі розробити моделі та методи аналізу, синтезу, діагностування і забезпечення властивості функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж.

2. Удосконалено метод аналізу бездротових сенсорних мереж, що на відміну від існуючих заснований на понятійному апараті функціональної стійкості, який являє собою сукупність ознак, показників, критеріїв, границь, запасу і областей функціональної стійкості. Зазначений метод дозволяє якісно і кількісно характеризувати здатність бездротової сенсорної мережі до

парирування наслідків нештатних ситуацій, що виникають внаслідокдії зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів.

3. Вперше розроблено методику синтезу бездротових сенсорних мереж на основі ієрархічної організації засобів забезпечення функціональної стійкості. Наукова новизна методики полягає у використанні функції взаємодії між рівнями ієрархії бездротової сенсорної мережі, де в ролі аргументів використовуються значення інших функцій, що надаються цьому рівню нижніми рівнями або реалізовані в ньому самому. Показано, що така організація засобів забезпечення функціональної стійкості дозволяє: скоротити час реакції системи на виникаючі відмови; проводити зміни в засобах забезпечення функціональної стійкості в процесі накопичення знань про відмови.

4. Вперше розроблено метод діагностування прихованих відмов в бездротовій сенсорній мережі на основі застосування дворівневої системи забезпечення функціональної стійкості. Наукова новизна даного методу полягає в здійсненні діагностування шляхом взаємного обміну повідомленнями між сенсорними вузлами з урахуванням припущень про синхронність бездротової сенсорної мережі і про можливість одержувачем повідомлення визначити його відправника. Даний метод дозволяє здійснювати діагностування з різною якістю за різний час, що узгоджується з ієрархічною концепцією організації засобів забезпечення функціональної стійкості. Якщо відмови не вимагають високої якості діагностування, то метод дозволяє отримати результати з мінімальними часовими витратами.

5. Вперше розроблено узагальнену методику синтезу функціонально стійкої бездротової сенсорної мережі, що заснована на використанні наявних надмірностей та перерозподілу функцій сенсорних вузлів, які вийшли з ладу, між справними вузлами. Перерозподіл функцій в бездротовій сенсорній мережі має відбуватись на основі розв'язання багатокритеріальної оптимізаційної задачі. Реалізація запропонованої методики дозволяє синтезувати бездротову сенсорну мережу з урахуванням відстані між сенсорними вузлами, потужності передавачів, енергоспоживання та пропускну здатності каналу зв'язку.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

Реалізація запропонованих в дисертації методологічних основ побудови функціонально стійких бездротових сенсорних мереж, як сукупність концептуальних, теоретичних та технологічних основ, дозволяє:

- 1) проектувати і експлуатувати функціонально стійкі бездротові сенсорні мережі в умовах впливу зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих впливів;
- 2) підвищити показники функціональної стійкості існуючих бездротових сенсорних мереж, що характеризують здатність системи парирувати нештатні ситуації за рахунок перерозподілу ресурсів;
- 3) здійснювати порівняння різних структур бездротових сенсорних мереж щодо здатності до парирування нештатних ситуацій та відновлення процесу збору, обробки, зберігання та передачі інформації;

5) проектувати бездротові сенсорні мережі, стійкі до відмов, збоїв за критерієм максимуму показника функціональної стійкості при обмеженні на вартість створення системи;

б) в процесі експлуатації автоматично, без втручання обслуговуючого персоналу, виявляти відмови, збої, пошкодження в бездротовій сенсорній мережі за мінімальний час із достовірністю не нижче заданої, що дасть можливість своєчасного перерозподілу виконуваних завдань, перенаправлення інформаційних потоків і відновлення процесу функціонування.

Розроблена методика діагностування дозволяє виявляти несправності, що виникають в бездротовій сенсорній мережі у будь-якій формі їх прояву.

Розроблено два алгоритми, які утворюють дворівневу систему діагностування прихованих відмов і дозволяють здійснити діагностування з різною якістю за різний час, що узгоджується з ієрархічною концепцією організації засобів забезпечення функціональної стійкості бездротової сенсорної мережі.

Реалізація запропонованої ієрархічної організації засобів забезпечення властивості функціональної стійкості в бездротових сенсорних мережах дозволить скоротити час реакції системи на виникаючі відмови.

Результати досліджень прийняті до впровадження в ПрАТ «Бліц-інформ» (акт від 27.03.2018 р.), в ТОВ «Облік і управління» (акт від 25.06.2018 р.), в навчальний процес кафедри комп'ютерних наук Державного університету телекомунікацій при викладанні дисципліни «Основи теорії надійності та діагностики телекомунікаційних систем» для студентів спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» денної форми навчання (акт від 15.05.2018 р.).

#### **Особистий внесок здобувача.**

Всі положення, які виносяться на захист, належать особисто автору. В роботах, які опубліковано в співавторстві, особисто здобувачу належать: в [1] розроблено діагностичну модель бездротової сенсорної мережі, що використовує тестові перевірки справності сенсорних вузлів; в [2] проведено специфікацію етапів перетворення нечітких даних в процесі логічного виведення рішень та продемонстровано їх реалізацію у середовищі моделювання Matlab; в [3] проведено аналіз зовнішніх та внутрішніх впливів на інформаційну систему; в [4] запропоновано необхідні умови функціональної стійкості інформаційної мережі; в [5] розроблено метод аналізу інформаційної системи, що на відміну від існуючих засновано на понятійному апараті функціональної стійкості; в [6] розроблено систему показників та критеріїв формалізації процесів забезпечення функціональної стійкості; в [7] розроблено математичну модель структури розгалуженої інформаційної мережі 5 покоління (5G) на основі випадкових графів; в [8] проведено аналіз показників інформаційної системи, що може бути застосована в таргетингу; в [9] запропоновано метод діагностування прихованих відмов в бездротовій сенсорній мережі на основі застосування дворівневої системи забезпечення функціональної стійкості; в [10] запропоновано алгоритми, які утворюють дворівневу систему діагностування прихованих відмов і дозволяють здійснити



діагностування з різною якістю за різний час; в [11] запропоновано математичну формалізацію функціональної стійкості; в [12] розроблено методику синтезу інформаційної системи на основі ієрархічної організації засобів забезпечення функціональної стійкості; в [13] обґрунтовано математичну моделі тестового діагностування складної технічної системи; в [14] здійснено порівняння різних структур бездротових сенсорних мереж щодо парирування нештатних ситуацій і відновлення процесу збору, обробки, зберігання та передачі інформації; в [15] запропоновано методику накопичення діагностичної інформації при виконанні діагностування в розподілених базах знань; в [16] розроблено методику виявлення відмов, збоїв, пошкоджень в бездротовій сенсорній мережі за мінімальний час з достовірністю не нижче заданої; в [17] розроблено методику накопичення діагностичної інформації, яка дозволяє виявляти несправності, що виникають в інформаційній системі у будь-якій формі їх прояву; в [18] запропоновано процедуру динамічного децентралізованого тестового діагностування, яка здійснюється одночасно з вирішенням робочих завдань і є фоною по відношенню до них; в [19] запропоновано методику визначення коректного модуля, на який слід покласти функції аналізу структури і синдрому, тобто виконання алгоритму діагностування системи; в [20] розроблено модель бази знань інтелектуальної системи управління на основі її верифікації; в [21] проведено аналіз нечітких симантичних мереж; в [22] запропоновано алгоритм самодіагностування технічного стану вузлів комутації інформаційних систем; в [23] введено поняття границі, запасу та області функціональної стійкості інформаційної системи; в [24] розроблено узагальнену методику синтезу функціонально стійкої бездротової сенсорної мережі, що заснована на використанні наявних надмірностей та перерозподілу функцій сенсорних вузлів між справними вузлами.

#### **Апробація результатів дисертації.**

Основні результати дисертаційних досліджень доповідалися й обговорювалися на таких конференціях і семінарах:

- Науково-технічна конференція «Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу» (Київ, 2018 р.);
- VII міжнародна науково-практична конференція «Математика, інформаційні технології, освіта» (Луцьк, 2018 р.);
- First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC) (Київ, 2018 р.);
- Десята міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2017)» (Київ, 2017 р.);
- Міжнародна науково-практична конференція «Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)» (Київ, 2017 р.);
- Науково-практична конференція «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони» (Київ, 2017 р.);

- XIII Міжнародна наукова конференція «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» (ISDMCI'2017) (Херсон, 2017 р.);
- 14 International Conference the Experience of Designing and Application of Cad Systems in Microelectronics (CADSM 2017) (Львів, 2017 р.);
- 4th International Conference «Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)» (Київ, 2017 р.);
- Науково-технічна конференція «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем» (Київ, 2017 р.);
- VIII Міжнародна школа-семинар «Теорія прийняття рішень» Присвячена 50-річчю математичного факультету ДВНЗ «Ужгородського національного університету» (Ужгород, 2016 р.);
- III Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та взаємодії» (Київ, 2016 р.);
- XII Міжнародна науково-практична конференція «Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє» (Київ, 2016 р.);
- V Міжнародна науково-практична конференція «Управління високошвидкісними рухомими об'єктами та професійна підготовка операторів складних систем» (Кропивницький, 2016 р.);
- Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, ад'юнктів, слухачів, курсантів і студентів «Молодіжна військова наука у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка» (Київ, 2015 р.);
- Medzinárodného vedeckého seminára «Riadenie bezpečnosti zložitých systémov» (Liptovský Mikuláš, Slovakia, 2015);
- Восьма міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (ІРТК-2015) (Київ, 2015 р.);
- XI Міжнародна наукова конференція «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» (ISDMCI'2015) (Херсон, 2015 р.);
- XI Міжнародна науково-практична конференція «Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє» (Київ, 2015 р.);
- VIII Всеукраїнська науково-практична конференція (Хмельницький, 2015 р.);
- Науково-технічна конференція «Актуальні проблеми забезпечення інформаційної безпеки держави» (Київ, 2014 р.);
- III Міжнародна науково-практична конференція «Управління високошвидкісними рухомими об'єктами та професійна підготовка операторів складних систем» (Кіровоград, 2014 р.);
- Третя міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатизації» (Київ, 2014 р.);

**Публікації.** Основні результати за темою дисертаційної роботи опубліковано в 47 наукових працях, з них, 23 наукових статі, у тому числі, 2 статті у виданнях, які індексуються у науково-метричній базі SCOPUS, одна монографія. Також 23 праці опубліковано у матеріалах наукових конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, 2 додатків на 14 сторінках та списку використаних джерел з 228 найменувань на 27 сторінках. Повний обсяг дисертації 328 сторінок, з них 268 сторінок основного тексту.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано науково-прикладну проблему, мету, об'єкт, предмет, завдання дослідження, наукову новизну одержаних результатів, практичне значення результатів, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами досліджень Державного університету телекомунікацій. Визначено особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів роботи, публікації.

У **першому розділі** дисертації здійснено аналіз основних характеристик бездротових сенсорних мереж (БСМ), аналіз наукових методів синтезу і забезпечення функціональної стійкості мереж. Здійснено постановку проблеми дослідження. У загальному вигляді бездротову сенсорну мережу можна описати як мережу вузлів, що спільно здійснюють моніторинг довкілля і збір даних, забезпечують взаємодію між людьми або комп'ютерами і довкіллям. Визначають три види пристроїв, що входять в бездротову сенсорну мережу: мережевий координатор (KM) – в кожній мережі може бути лише один, знаходиться в корені мережевого дерева; сенсорні вузли або FFD (Full Function Devices) – повнофункціональні пристрої, які можуть виконувати функції маршрутизаторів; сенсори або RFD (Reduced Function Devices) – кінцеві пристрої, які не можуть бути маршрутизаторами (рис.1).

Сучасні бездротові сенсорні мережі, як правило, включають сенсори, сенсорні вузли (вузли приводних пристроїв), шлюзи і клієнтів. Велика кількість сенсорів, розташованих у випадковому порядку усередині або біля контрольованої області, формує мережі шляхом самоорганізації. Сенсори здійснюють контроль фізичних параметрів серидовища для їх передачі на інші сенсори стрибкоподібним методом. Тобто

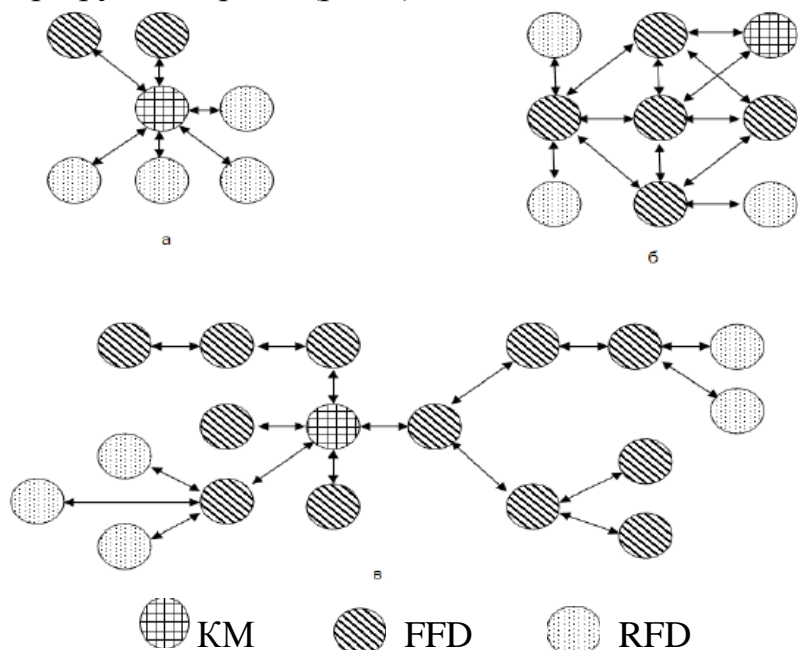


Рис. 1. Варіанти топології мережі

вузли сенсорної мережі є одночасно передавачем і приймачем. Під час передачі дані можуть оброблятися декількома сенсорами для переходу до вузла

шлюзу після маршрутизації з декількома переходами, і, зрештою досягти вузла управління. Користувач здійснює конфігурацію і управління БСМ за допомогою вузла управління, ставить завдання з моніторингу і здійснює збір контрольованих даних.

Апаратне забезпечення сенсора, як правило, складається з чотирьох частин: силового модуля, модуля управління енергоспоживанням, датчика, мікроконтролера і бездротового приймача. Силовий модуль забезпечує електроживлення системи. Датчик являється центральним елементом сенсора БСМ, який може отримати інформацію про стан навколишнього середовища або устаткування. Датчик відповідає за збір і перетворення сигналів, таких як світло, вібрація, хімічні забруднення, електростатичні сигнали, тощо, з подальшою їх передачею на мікроконтролер. Мікроконтролер приймає дані від датчика і здійснює їх обробку. Потім бездротовий приймач (RF-модуль) виконує передачу даних для фізичної реалізації процесу зв'язку з сенсорним вузлом.

Протоколи і деякі технології впровадження БСМ можуть бути адаптовані до сталої архітектури і технологій бездротових та проводних комп'ютерних мереж. Проте, особливостями БСМ є самоорганізація, самоадаптація, самодіагностування, обмежена енергія вузлів і нестабільні лінії передачі. Разом із тим, БСМ функціонують в жорстких умовах під впливом дестабілізуючих факторів, автономно і тривалий час.

Однією з відмінностей між БСМ і традиційними проводними мережами є нестабільність безпроводного зв'язку. У БСМ зв'язок між вузлами вразливий до перешкод, що призводить до збою передачі сигналу. Традиційна мережа – це стабільна проводова мережа, дані якої можуть бути втрачені виключно унаслідок перевантаженості або відмов. Принцип управління потоком полягає в тому, що відправник даних настраює вихідний трафік, відповідно до ситуації втрати передачі даних. Коли відбувається втрата даних, відправник зменшує швидкість передачі. А коли дані не втрачаються, відправник збільшує швидкість передачі.

Такі механізми управління потоком не підходять для БСМ, оскільки втрата даних в мережах датчиків в основному обумовлена дією дестабілізуючих чинників. Процедура зниження швидкості передачі даних не може вирішити цю проблему, а тільки знижує продуктивність мережі. Для вирішення проблеми деградації функціонування мережі в умовах нестабільної передачі даних пропонується використати принципи функціональної стійкості. Під функціональною стійкістю в дисертаційній роботі розуміється властивість мережі виконувати необхідні завдання протягом певного часу або наробітку в умовах відмов складових частин через дію зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів. Властивість функціональної стійкості забезпечується за рахунок використання різного типу, вже існуючих видів надмірності, а саме: часової, структурної, функціональної, інформаційної. Використання надмірностей відбувається шляхом перерозподілу з метою протидії наслідкам позаштатних ситуацій, які утворилися від дії

дестабілізуючих чинників. Функціональна стійкість не вимагає введення додаткової надмірності на етапах проектування. Вона парирує наслідки від дій зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих впливів, здійснюючи перерозподіл уже існуючих ресурсів. Основна відмінність функціональної стійкості від проблеми побудови структурно надмірних мереж полягає у виявленні вже існуючої надмірності та формуванні відповідних сигналів у необхідний момент часу на перерозподіл існуючих ресурсів. Методи, які використовуються для забезпечення або підвищення функціональної стійкості, у першу чергу, забезпечують покращення характеристик відмовостійкості та живучості, проте не обов'язково показників надійності окремих комплектуючих елементів бездротових сенсорних мереж.

При синтезі функціонально стійкої бездротової сенсорної мережі необхідно проаналізувати внутрішні і зовнішні чинники, що впливають на процес функціонування БСМ. Для БСМ в цілому і її функціональних підсистем, можна виділити наступні технічні стани: працездатний, непрацездатний, граничний і аварійний.

Працездатний стан – це стан, при якому значення усіх параметрів, що характеризують здатність БСМ виконувати задані функції, відповідають вимогам нормативно-технічної або конструкторської документації (рис. 2).

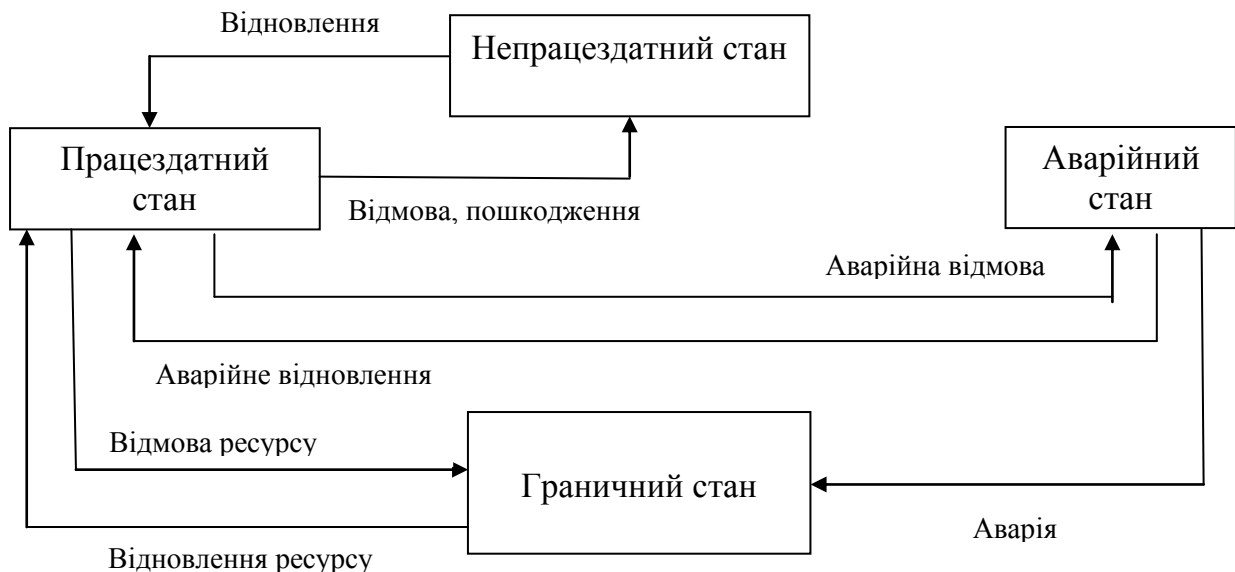


Рис.2. Технічні стани бездротової сенсорної мережі та можливі переходи

Непрацездатний стан – це стан, при якому значення хоч би одного параметра, обумовленого вище, не відповідає вимогам нормативно-технічної або конструкторської документації.

Граничний стан – це стан, при якому застосування БСМ за призначенням не допустимо або недоцільно, або відновлення її працездатного стану неможливе або недоцільне.

Під аварійним станом слід розуміти такий винятковий стан системи, який характеризується таким поєднанням відмов і помилок у функціонуванні, які

здатні привести до значних порушень працездатності або руйнувань елементів БСМ, тобто до аварій.

Описані фазові стани можна представити у формалізованому виді:

$$\begin{aligned} & \left[ \forall i (i \in [1, N]) \right] \wedge \left[ \forall X_{ik} \left( |X_{ik}| < |X_{ik \text{ зад}}| \right) \right] \rightarrow TC_{WSN} := PC; \\ & \left[ \exists i (i \in [1, N]) \right] \wedge \left[ \exists X_{ik} \left( |X_{ik}| \geq |X_{ik \text{ зад}}| \right) \right] \wedge \left[ C_{Bi} \leq C_{Bi \text{ зад}} \right] \rightarrow TC_{WSN} := HC; \\ & \left[ \exists i (i \in [1, N]) \right] \wedge \left[ \exists X_{ik} \left( |X_{ik}| \gg |X_{ik \text{ зад}}| \right) \right] \wedge \left[ C_{Bi} \gg C_{Bi \text{ зад}} \right] \rightarrow TC_{WSN} := AC; \\ & \left[ \exists i (i \in [1, N]) \right] \wedge \left[ \exists X_{ik} \left( |X_{ik}| \gg |X_{ik \text{ зад}}| \right) \right] \wedge \left[ C_{Pi} \gg C_{Pi \text{ зад}} \right] \rightarrow TC_{WSN} := GC, \end{aligned}$$

де  $i$  – номер функції, що виконується БСМ;  $TC_{WSN}$  – символ технічного стану БСМ (WSN- wireless sensor networks); ПС, НС, АС, ГС – позначення працездатного, непрацездатного, аварійного і граничного станів БСМ;  $C_{Bi}$ , ( $C_{Pi}$ ) – вартість відновлення (ремонт)  $i$ -тої функції БСМ;  $X_{ik}$  –  $k$ -тий параметр підсистеми БСМ, що реалізовує  $i$ -ту функцію.

Перехід системи з одного стану в інший відбувається внаслідок різних подій (див., рис.1). Перехід з працездатного стану в непрацездатне відбувається під дією внутрішніх і зовнішніх чинників, що впливають на процес функціонування БСМ.

До внутрішніх чинників відносяться: відмови сенсорів або елементів сенсорів БСМ, несправності, збої, помилки обслуговуючого персоналу, апаратура, що призводить до виходу з ладу.

До зовнішніх чинників відносяться: цілеспрямована дія з боку зловмисника, електромагнітна дія, несприятливі природні кліматичні умови, дія електромагнітних завад.

Для побудови функціонально стійкої бездротової сенсорної мережі необхідно, щоб усі події, обумовлені внутрішніми і зовнішніми чинниками, не переводили БСМ з працездатного стану в непрацездатний, а сама БСМ була б нечутливою до внутрішніх і зовнішніх дестабілізуючих факторів. Основними принципами, які реалізують функціональну стійкість в БСМ є: виявлення нештатної ситуації; ідентифікація (розпізнавання) нештатної ситуації; ухвалення рішення про відновлення; перерозподіл функцій в системі з метою відновлення непрацездатних елементів.

Крім того в першому розділі дисертаційної роботи формалізована задача синтезу функціонально стійкої структури бездротової сенсорної мережі. Припустимо, що БСМ налічує в своєму складі  $N$  сенсорних вузлів (СВ), розташування яких задано просторовими координатами. Обмін інформацією між сенсорними вузлами здійснюється згідно з матрицею інтенсивностей  $H = \|h_{ij}\|$  розміру  $N \times N$ , де  $h_{ij}$  – об'єм інформації, що передається від СВ  $i$  до СВ  $j$  в одиницю часу,  $i = 1, \dots, N$ ,  $j = 1, \dots, N$ ,  $i \neq j$ . Задамо наступні обмеження. Відома функція вартості бездротової сенсорної мережі  $C$  та визначені допустимі витрати на її створення і експлуатацію  $C_D$ . Задана також необхідна ймовірність зв'язності  $P^*$  для кожної пари СВ. Вимагається визначити

структуру бездротової сенсорної мережі, яка має максимальний рівень функціональної стійкості  $F_{WSN}$ , який залежить від ймовірності зв'язності  $P_{ij}$ , при заданих обмеженнях на витрати для створення і експлуатації мережі, а також інші параметри функціонування системи.

Математична модель синтезу функціонально стійкої структури БСМ має такий вигляд:

$$F_{WSN} = f(P_{ij}) \rightarrow \max, \quad i, j = 1, \dots, N, \quad i \neq j \quad (1)$$

$$C = \sum_i \sum_j C_{ij}(w_{ij}, \rho_{ij}, h_{ij}) \rightarrow \min; \quad (2)$$

$$C \leq C_D; \quad \forall \pi_{ij} \quad P_{ij} \geq P^*; \quad \varphi_{ij} \leq \rho_{ij}; \quad t_s \leq T_{\max}. \quad (3)$$

де  $N$  – число СВ, що входять до складу бездротової сенсорної мережі. У загальному випадку  $N=var$ ,  $F_{WSN}$  – максимізований функціонал якості;  $P_{ij}$  – ймовірність зв'язності між парою СВ;  $w_{ij}$  – потужність передавача, який здійснює передачу інформації між парою СВ ( $i, j$ );  $t_s$  – середній час затримки повідомлення, що пересилається від одного СВ до іншого.

Цільова функція (1) описує критерій оптимізації: максимум функціональної стійкості структури бездротової сенсорної мережі при мінімумі вартості (2). В якості показника функціональної стійкості вибирається узагальнений показник, що характеризує зв'язність СВ (вершин графа) і залежний від ймовірності зв'язності між кожною парою СВ  $P_{ij}$ . Умова (3) описує обмеження на параметри мережі для вирішення оптимізаційного завдання.

Умова (2) означає, що сумарні приведені витрати на бездротову сенсорну мережу з урахуванням потужності передавача  $w_{ij}$ , їх пропускної спроможності  $\rho_{ij}$  і об'ємів інформації  $h_{ij}$ , що передається не повинні перевищувати допустимої величини. Умова  $\forall \pi_{ij} \quad P_{ij} \geq P^*$  визначає для усіх маршрутів  $\pi_{ij}$  значення ймовірності зв'язності  $P_{ij}$  має бути не менше заданого значення  $P^*$ . Умова  $\varphi_{ij} \leq \rho_{ij}$  для кожного каналу зв'язку з пропускною спроможністю  $\rho_{ij}$  обмежує об'єм потоку інформації  $\varphi_{ij}$ , що передається. Умова  $t_s \leq T_{\max}$  визначає середній час затримки повідомлення  $t_s$  в мережі має бути не більше максимального заданого значення.

Таким чином, після рішення задачі багатокритеріальної оптимізації буде знайдена структура бездротової сенсорної мережі, що складається з  $N$  сенсорних вузлів комутації, яка задовольнятиме критеріям оптимізації (1) – (2) і обмеженням (3).

**Другий розділ** присвячено розробці основних теоретичних положень щодо функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж. Визначено основну відмінність стійкості функціонування від функціональної стійкості, яка

полягає в наступному: стійкість функціонування характеризує поведінку координат незбуреного й збуреного руху системи

$$\forall \theta > 0 \Rightarrow \delta > 0, \rho(z_0, z'_0) < \delta \Rightarrow \rho[z(t, z_0), z(t, z'_0)] < \theta, \quad \forall t \in [0, \infty),$$

де  $z_0 = z(0)$  – початкові умови – координати фазового простору  $z_0$  при незбуреному русі;  $z'_0 = z'(0)$  – координати фазового простору при збуреному русі;  $\rho$  – метрика простору  $Z$ ;  $\varepsilon, \theta$  – задані числа, що характеризують відхилення збуреного руху від незбуреного.

Функціональна стійкість характеризує відхилення основних функцій від координат при збуреному і незбуреному русі:

$$\forall \theta > 0 \Rightarrow \delta > 0, \rho(f(z_0), f(z'_0)) < \delta \Rightarrow \rho[f(z(t, z_0)), f(z(t, z'_0))] < \theta, \quad \forall t \in [0, \infty),$$

де  $f(z)$  – функція від координати руху системи, що характеризує основні вимоги, які висуваються до системи.

Обґрунтовано, що у залежності від ступеня складності організації БСМ і рівня аналізу, властивість функціональної стійкості може виявлятися та кількісно оцінюватися, як стійкість до помилок, надійність, живучість, відмовостійкість, адаптивність, завадостійкість. У той же час окремо жодна з цих властивостей не відображає того, що розуміється під функціональною стійкістю системи, і усі в комплексі вони також не можуть її характеризувати, оскільки не відображають активний характер властивості функціональної стійкості.

Для бездротової сенсорної мережі приймаємо, що мережа повинна виконувати дві основні функції:

- вимірювання параметрів середовища, обробку, збереження інформації;
- передачу інформації між сенсорними вузлами.

Звідси випливає основна вимога до функціонально стійких бездротових сенсорних мереж:

1. Забезпечити працездатність усіх сенсорних вузлів (СВ):

$$\forall v_i \in V \Leftarrow \omega_i(\tau) = 1, \quad \tau \in [0, t),$$

де  $V = \{v_i\}$  – множина СВ БСМ;  $\omega(\tau)$  – булева функція, яка набуває значення 1, якщо СВ знаходиться в працездатному стані і 0 – у протилежному випадку;  $\tau, t$  – поточний час.

2. Забезпечити передачу інформації між СВ по основних чи резервних маршрутах (радіоканалах зв'язку):

$$\forall v_i, v_j \Leftarrow \exists v_j \in \Gamma_i, \quad i, j = 1, 2, \dots, n,$$

де  $\Gamma_i$  – множина досяжних вершин графа з вершини  $v_i$ ;  $n$  – число СВ у БСМ.

Визначено, що якість виконання основних функцій визначається наступними числовими показниками:

- ймовірністю рішення  $i$ -тої задачі за час, що не перевищує заданий:

$$P\{t(q_{ji}) \leq t_{\text{Зад } i}\}, \quad q_{ji} \in Q_j, \quad Q_j = \{q_{j1}, q_{j2}, \dots, q_{jm}\},$$

де  $Q_j$  – множина задач, розв'язуваних у  $j$ -му СВ;  $q_{ji}$  –  $i$ -та задача, розв'язувана у  $j$ -му СВ;  $t(q_{ji})$  – час рішення задачі  $q_{ji}$ .



– пропускною здатністю  $\rho_{ij}$  каналу зв'язку між СВ  $v_i$  і  $v_j$ .

Введено припущення: пропускна здатність  $\rho_{ij}$  задовольняє вимогам і не знижує якості виконання задач у моменти перевантаження системи.

Необхідна і достатня умова функціональної стійкості БСМ полягає у справності усіх елементів БСМ та наявності альтернативних каналів передачі інформації:

$$\forall G(V, L), v_i \in V, l_{ij} \in L \Leftrightarrow \begin{cases} \forall v_i \in V \Leftarrow \omega_i(\tau) = 1, \tau \in [0, t); \\ \forall v_i, \forall v_j \Leftarrow \exists v_j \in \Gamma_i^{\geq 2}, i, j = \overline{1, n}. \end{cases}$$

Обґрунтовано і обрано математичну модель у вигляді неорієнтованого графа, тому що канали передачі інформації в БСМ можна вважати двосторонніми:

$$G(V, L), \quad V = \{v_i\}, \quad L = \{l_{ij}\}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n,$$

де множині вершин  $V$  відповідає множина СВ потужності  $n$ , а множині ребер  $L$  відповідає множина каналів зв'язку між СВ.

Для кількісної оцінки рівня функціональної стійкості введено в розгляд і обґрунтуємо показники функціональної стійкості структури бездротової сенсорної мережі.

1. Число вершинної зв'язності  $\chi(G)$ .

2. Число реберної зв'язності  $\lambda(G)$ .

3. Імовірність зв'язності  $P_{ij}(t)$  – імовірність того, що повідомлення з вузла  $i$  у вузол  $j$  буде передано за час, який не перевищує  $t$ .

Поточна структура знаходиться на границі функціональної стійкості, якщо граф структури зв'язний, і має у своєму складі мости ( $N_L \geq 1$ ) чи вузли з'єднання ( $N_V \geq 1$ ):

$$\{K = 1\} \wedge [\{N_V \geq 1\} \vee \{N_L \geq 1\}], \quad (4)$$

де  $K$  – число компонентів графа, а умова  $K=1$  означає, що граф зв'язний;  $N_V$ ,  $N_L$  – число вузлів з'єднання і мостів графа відповідно.

У роботі вперше розроблено і введено до розгляду запас функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж, який кількісно можна визначити на підставі наступних показників:

1. Реберний запас стійкості  $Z_L$ , відстань від точки з координатами  $(\chi(G), \lambda(G))$  у просторі областей функціональної стійкості до прямої  $\lambda(G)=1$ , що описує уявну частину границі функціональної стійкості:

$$Z_L = \lambda(G) - 1. \quad (5)$$

2. Вершинний запас стійкості  $Z_V$ , відстань від точки з координатами  $(\chi(G), \lambda(G))$  у просторі областей функціональної стійкості до прямої  $\chi(G)=1$ , що описує границю функціональної стійкості:

$$Z_V = \chi(G) - 1. \quad (6)$$

В дисертаційній роботі вводиться інтегральний показник функціональної стійкості. Ймовірність зв'язності  $P_{ij}$  в бездротовій сенсорній мережі можна характеризувати у вигляді наступної матриці зв'язності:

$$P_3 = \begin{bmatrix} 0 & P_{12} & P_{13} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & 0 & P_{23} & \dots & P_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

При синтезі структури за критерієм максимуму ймовірності зв'язності доцільно вивести інтегральний показник функціональної стійкості БСМ. Таким показником є згортка матриці ймовірності зв'язності (7):

$$F(P_3) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \omega_{ij} \cdot P_{ij},$$

де  $n$  – число сенсорних вузлів в БСМ;  $\omega_{ij}$  – вагові коефіцієнти каналів зв'язку, які залежать від заданої інтенсивності передачі інформації  $\rho_{ij}$  між  $v_i$  і  $v_j$ :

$$\omega_{ij} = \begin{cases} 2, & \text{при } \rho_{ij} \geq M[\rho]; \\ 1, & \text{при } 0,1 \cdot M[\rho] \leq \rho_{ij} < M[\rho]; \\ \frac{1}{2}, & \text{при } \rho_{ij} < 0,1 \cdot M[\rho]. \end{cases}$$

Математичне сподівання заданої інтенсивності передачі інформації  $M[\rho]$  у БСМ визначається на основі такої залежності:

$$M[\rho] = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \rho_{ij}$$

Ймовірність зв'язності  $P_{ij}$  визначається на основі наступних початкових даних: структури БСМ, задано матрицею суміжності  $A$ ; ймовірність передачі інформації  $p_{ij}$  по каналу зв'язку  $l_{ij}$ .

Введені терміни та поняття є основою понятійного апарату функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж, застосування якого дозволяє характеризувати та порівнювати різні структури з точки зору їх функціональної стійкості. На їх основі розроблені методи аналізу функціональної стійкості системи, методики синтезу функціонально стійких систем та методи забезпечення функціональної стійкості в процесі експлуатації.

**Третій розділ** присвячено розробці методики синтезу бездротових сенсорних мереж на основі ієрархічної організації засобів забезпечення функціональної стійкості. Застосування ієрархічного підходу дозволяє розв'язати проблему опису бездротових сенсорних мереж, що полягає в знаходженні компромісу між простотою опису і необхідністю обліку численних характеристик мережі. При цьому мережа задається сімейством моделей, кожна з яких описує поведінку мережі з точки зору різних рівнів абстрагування. Кожний рівень має свої власні концепції, принципи, цілі і може стосуватися різних аспектів мережі. Нижчі рівні включають детальніші і спеціалізовані описи підсистем, операцій системи, чим більш високі рівні. У теорії

багаторівневих ієрархічних систем використовуються три поняття рівнів: рівень опису, або абстрагування, рівень складності рішення, що приймається, організаційний рівень. Для їх розрізнення застосовують терміни: «страта», «шар» і «ешелон». При ієрархічному підході істотно спрощуються завдання аналізу і проектування функціонально стійких бездротових сенсорних мереж (рис.3).

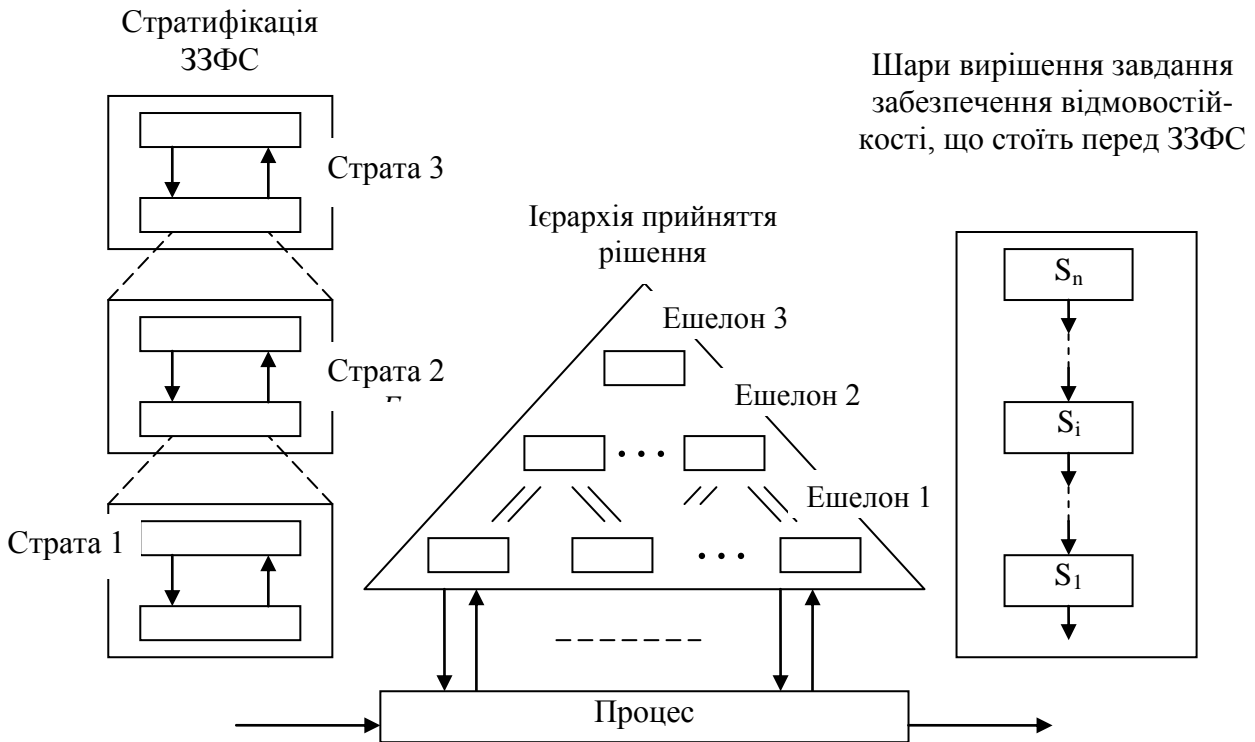


Рис. 3. Схема багаторівневого діагностування БСМ

При ієрархічній організації бездротової сенсорної мережі засоби більшої складності (які забезпечують і кращу якість обслуговування) використовуватимуться за необхідності. Дуже прості відмови швидко нейтралізуються простими засобами на низькому рівні ієрархії, оскільки їх складність невелика. Якщо простих засобів виявляється недостатньо, то «запускаються» засоби кращої якості, але, можливо, «повільніші». Якби ієрархії не було, а завжди використовувалися засоби найвищої якості, то система виконувала б свої функції повільніше.

Метою взаємодії рівнів є виконання певної дії. Нехай мета досягається виконанням функції  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  на множині аргументів  $x_i, i=1, 2, \dots, n$ . В цьому випадку функція  $f$  адекватна меті. Якщо в алгоритмі функцій є помилки, функція  $f$  неадекватна меті.

Як аргументи використовуватимуться значення інших функцій, які назвемо сервісними послугами, що надаються цьому рівню нижніми рівнями або реалізовані в ньому самому.

Для успішного обчислення адекватної функції  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  необхідно, щоб у момент  $t$ , коли виникає необхідність в ній упродовж  $\Delta t$ , поки вона

виконується, її аргументи були доступними. Успішно обчислену функцію називатимемо справною (доступною) функцією.

Можлива вимога про доступність аргументів  $x_1, x_2, \dots, x_n$  упродовж усього  $\Delta t$  не є необхідною умовою, але вона достатня для успішного обчислення функції  $f$ . Оскільки після останнього використання аргументу  $x$  у момент  $t_i$  його стан не впливатиме на результат обчислення функції  $f$ . Обчислення функції  $f$  може бути пов'язане з виконанням дії із забезпечення функціональної стійкості бездротової сенсорної мережі – виявлення відмови, їх маскуванню, а також діагностування і виключення подальшого впливу елемента, що відмовив, на роботу БСМ.

Істотно, що кожен рівень в ієрархії має в розпорядженні свій набір функцій для забезпечення функціональної стійкості.

Протоколи взаємодії включають: сигнали, що подаються від низу до верху; засоби визначення станів нижніх рівнів верхніми; набори функцій  $f$ , реалізованих на цьому рівні із залученням послуг нижніх рівнів.

Як відзначалося, функціональна стійкість забезпечується за рахунок використання надмірності – інформаційної, функціональної, структурної, часової та інших. Її ефективність визначається незалежністю її складових частин і організацією їх взаємодії.

Якщо повернутися до ієрархії бездротової сенсорної мережі, то будь-яка функція повинна припускати декілька альтернатив свого обчислення (досягнення мети). Альтернативність розуміється як неідентичність множині аргументів і, можливо, неідентичність алгоритмів. Таким чином, недоступність будь-якого аргументу не буде перешкодою для обчислення функції.

Якщо  $f$  реалізується множиною альтернатив  $\{f_i\}$ , то достатньою умовою успішного виконання  $f$  буде успішне обчислення хоч би однієї з  $f_i$  ( $i = 1, 2, \dots, i_{\max}$ ).

Зокрема, ієрархічний підхід до синтезу бездротових сенсорних мереж допомагає виявляти такий тип відмов, як приховані відмови. Прихована відмова – це відмова, що не виявляється візуально чи штатними методами й засобами контролю та діагностики, але виявляється під час проведення технічного обслуговування чи спеціальними методами діагностування. Компоненти, що відмовили, при взаємодії передають іншим суперечливу інформацію про свої дії і стан. При цьому вони не можуть бути виявлені звичайними діагностичними процедурами. Необхідність інтегрувати в комплекс забезпечення функціональної стійкості механізми захисту від довільної поведінки компонентів бездротової сенсорної мережі дозволяє проілюструвати переваги ієрархічної структури. Нові механізми слід винести в новий ієрархічний рівень. Якщо після діагностування апаратного забезпечення бездротової сенсорної мережі не була виявлена причина відмови, то слід зробити діагностування на прихований тип відмови.

Крім того, було проведено оцінку якості ієрархічної структури засобів забезпечення функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж. Під

якістю слід розуміти: наскільки, покращуються показники функціонально стійкої системи в порівнянні з аналогічною системою того ж функціонального призначення, але яка не використовує засоби забезпечення функціональної стійкості. В дисертаційній роботі проведено оцінку якості функціональної стійкості бездротової сенсорної мережі, якщо відома ієрархічна структура, відповідно до якої вона побудована. Якість системи запропоновано оцінювати ймовірністю її безвідмовної роботи.

Нехай рівень  $i$  ієрархії засобів забезпечення функціональної стійкості (ЗЗФС) бездротової сенсорної мережі виконує  $s$  різних функцій функціональної стійкості  $F_s^i$ , загальне число яких дорівнює  $R^i$  ( $s=1, \dots, R^i$ ).

Нехай кожна з функцій  $F_s^i$  має множину альтернатив  $f_{l_s}^i$ , де  $l_s = 1, \dots, R_s^i$  – загальне число альтернатив виконання  $F_s^i$ . Кожна з альтернативних функцій  $f_{l_s}^i$  виконується на множині аргументів  $f_{l_s}^i(j)$  ( $j=1 \dots A_{l_s}^i$ ), де  $A_{l_s}^i$  – число аргументів функції  $f_{l_s}^i$ . Виконання функцій  $f_{l_s}^i$  триває протягом  $\Delta t_{l_s}^i$  з ймовірністю  $P(f_{l_s}^i)$  завершується успішно.

Визначення  $P_{l_s}^i$  безпомилковості алгоритму виконання функції  $f_{l_s}^i$  залежить від надійності носіїв програмного коду, а також від якості тестування і від відповідності вхідних даних специфікаціям програмного продукту. Деякі автори пропонують оцінювати надійність програмного забезпечення по відношенню до тієї частини вхідних наборів даних, на яких програмний продукт був протестований до загальної кількості можливих вхідних наборів даних. У подальшому викладі вводиться припущення, що деяким чином значення  $P_{l_s}^i$  було визначено.

Ймовірність успішного обчислення функції  $f_{l_s}^i$  визначається як ймовірність спільної події:  $P(f_{l_s}^i) = \{ \text{ймовірність доступності усіх } x_{l_s}^i(j) \mid j=1 \dots A_{l_s}^i \}$  протягом  $\Delta t_{l_s}^i$  починаючи з моменту  $t_{l_s}^i$  за умови, що алгоритм функції безпомилковий}. Ймовірність доступності аргументів під час обчислення  $f_{l_s}^i$  дорівнює добутку:  $P_{t_0}(x_{l_s}^i) \cdot P_{\Delta t}(x_{l_s}^i)$ , де  $P_{t_0}(x_{l_s}^i)$ ,  $P_{\Delta t}(x_{l_s}^i)$  – відповідні ймовірності доступності аргументу  $x_{l_s}^i$  у момент початку обчислення функції  $f_{l_s}^i$  і упродовж виконання її алгоритму.

Якщо ймовірність безпомилковості алгоритму функції  $f$  не залежить від доступності аргументів (незалежні події), то шукана ймовірність спільної події визначається як:

$$P(f_{l_s}^i) = P_{l_s}^i \cdot \prod_{j=1}^{A_{l_s}^i} \left\{ \left[ P_{t_0}(x_{l_s}^i(j)) \right] \cdot \left[ P_{\Delta t}(x_{l_s}^i(j)) \right] \right\}.$$

Ймовірність успішного обчислення функції  $F_s^i$  дорівнює ймовірності успішного обчислення хоч би однієї з її альтернатив. Таким чином, успішне обчислення функції  $F_s^i$ , як складна подія є об'єднання подій «успішне обчислення альтернативної функції  $f_{l_s}^i$  для усіх  $R_s^i$  можливих альтернатив функції  $F_s^i$ . Ймовірність такої спільної події буде визначатися за формулою:

$$P(F_s^i) = \sum_{l_s=1}^{R_s^i} P(f_{l_s}^i) - \sum_{l_s=1}^{R_s^i-1} \sum_{j_s=l_s+1}^{R_s^i} P(f_{l_s}^i) \cdot P(f_{j_s}^i) + \\ + \sum_{l_s=1}^{R_s^i-2} \sum_{j_s=l_s+1}^{R_s^i-1} \sum_{k_s=j_s+1}^{R_s^i} P(f_{l_s}^i) \cdot P(f_{j_s}^i) \cdot P(f_{k_s}^i) - \dots + (-1)^{R_s^i-1} \cdot \prod_{l_s=1}^{R_s^i} P(f_{l_s}^i).$$

Таким чином, у рамках зроблених припущень про існування перерахованої ймовірності, наслідуючи викладену методику, можна визначити ймовірність успішного обчислення довільної функції  $F_s^i$ , рівня  $i$  ієрархії засобів забезпечення функціональної стійкості БСМ.

Оскільки функції рівня  $i$  виступають сервісними послугами для рівня, тобто є аргументами для функцій рівня  $i+1$  то, застосовуючи запропоновану методику для функцій рівня  $i+1$  можна визначити ймовірність успішного обчислення будь-якої функції цього рівня і так далі.

Це дозволить: по-перше – порівняти отримані значення ймовірності для функціонально стійкого варіанту системи з не функціонально стійким варіантом і зіставити отриманий ефект від використання ЗЗФС з витратами на отримання цього ефекту з тим, щоб прийняти або відкинути проект функціонально стійкої системи. Якщо існує декілька альтернатив, то можливо порівняти їх між собою і вибрати оптимальний по відношенню витрат і отриманого позитивного ефекту; по-друге – виявити слабкі місця в ЗЗФС бездротової сенсорної мережі, а також оптимальні витратити наявних запасів ресурсів на отримання позитивного ефекту щодо забезпечення функціональної стійкості.

**Четвертий розділ** присвячено розробці методу діагностування прихованих відмов в бездротовій сенсорній мережі на основі застосування дворівневої системи забезпечення функціональної стійкості. Відповідно до концепції про ієрархічну організацію засобів забезпечення функціональної стійкості, для проведення діагностування бездротової сенсорної мережі з прихованими відмовами слід використати декілька рівнів. На першому рівні використовуються прості діагностичні процедури. Якщо вдається з їх допомогою визначити сенсорні вузли, що відмовили, то на цьому діагностування завершується з найменшими витратами часу. У разі неоднозначності визначення елементів системи, що відмовили, наступний рівень ієрархії повинен запустити діагностичні процедури, здатні впоратися із складнішими відмовами. В основу такого підходу закладено припущення про те, що простіші відмови виникатимуть частіше, чим складніші. Тому не варто

відразу застосовувати дуже потужні, діагностичні процедури, які вимагають великих часових та обчислювальних витрат.

В дисертаційній роботі розроблено два алгоритми, що утворюють дворівневу систему діагностування бездротової сенсорної мережі з прихованими відмовами. Дані алгоритми дозволяють здійснити діагностування з різною якістю за різний час, що узгоджується з ієрархічною концепцією організації засобів забезпечення функціональної стійкості (ЗЗФС). Якщо відмови не вимагають високої якості діагностування, то простіший і швидший перший алгоритм дозволяє її завершити з мінімальними часовими витратами. Якщо він не дає задовільного рішення, то діагностування триває з використанням потужнішого другого алгоритму.

Розглянемо діагностичну модель бездротової сенсорної мережі, що складається з  $N \geq 2t + 2$  сенсорних вузлів, в якій виникає не більше  $t$  відмов. Ця модель допускає діагностування більшої кількості відмов. Так наприклад, для бездротової сенсорної мережі, що складається з  $N = 8$  сенсорних вузлів при класичній моделі розподіленої обчислювальної системи, що містить  $N \geq 3t + 1$  обчислювачів, число відмов не перевищує двох, для пропонуваної – трьох. Для забезпечення функціональної стійкості БСМ до  $t$  відмов пропонувана модель вимагає меншої надмірності. Так для виявлення і ідентифікації двох компонентів системи, що відмовили ( $t = 2$ ) у пропонуваній моделі необхідно  $N \geq 2t + 2 = 6$  сенсорних вузлів, а при класичній –  $N \geq 3t + 1 = 7$ , що є істотним.

Прийняті наступні припущення:

1. Бездротова сенсорна мережа представлена у вигляді повнозв'язного неорієнтованого графа.

2. Сенсорні вузли проводять діагностування одночасно.

3. Сенсорні вузли передають та отримують повідомлення з множини  $Z = \{a, \bar{a}, \emptyset\}$ , де  $a$  – повідомлення, семантика якого залежить від конкретного випадку;  $\bar{a}$  протилежне  $a$ ;  $\emptyset$  – порожнє повідомлення, тобто впродовж відведеного інтервалу часу по каналу зв'язку не поступило ніякого повідомлення.

4. Кожен сенсорний вузол за допомогою засобів самодіагностування визначає стан  $S(i)$ . Стан може набувати два значення *FF*(справний) і *FAIL* (несправний).

5. При передачі повідомлень з різною семантикою процесор витрачає на кожне повідомлення час  $DELAY(i)$  незалежно від того скільком сенсорним вузлам це повідомлення посилається.

6. Вузол  $i$  витрачає на отримання повідомлення від вузла  $j$  час  $DELAY\_MES(i, j)$ .

7. Виконується наступна нерівність:

$$DELAY(i) > (N - 1) DELAY\_MES(i, j).$$

Нехай сенсорний вузол  $k$  ( $k=1, \dots, N$ ) є «генералом». Кожному з інших сенсорних вузлів («лейтенантам») вузол  $k$  повинен передати повідомлення відповідно до допущення 3. Після цього «лейтенанти» обмінюються повідомленнями про отриману від «генерала» інформацію, при цьому кожен формує початковий набір (ПН), по якому визначаються «нелояльні лейтенанти» і потім ті, що залишилися досягають угоди з приводу «наказу» «генерала», – «прийняти» або «відкинути».

Припустимо  $a=0$ ,  $\bar{a}=1$  і, що кожному сенсорному вузлу в системі присвоєно індивідуальний номер  $n=1\dots N$ , який відомий усім вузлам системи.

Початковий набір, що формується в  $n$ -му сенсорному вузлі, має вигляд:

$$A_n = \begin{bmatrix} a_{11}^n & a_{12}^n & a_{13}^n & \cdots & a_{1L}^n \\ a_{21}^n & a_{22}^n & a_{23}^n & \cdots & a_{2L}^n \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1}^n & a_{n2}^n & a_{n3}^n & \cdots & a_{nL}^n \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{L1}^n & a_{L2}^n & a_{L3}^n & \cdots & a_{LL}^n \end{bmatrix},$$

де  $L=2t+1$ ; в  $i$ -му рядку містяться значення повідомлень усіх  $j$ -х сенсорних вузлів, прийняті в першому раунді  $i$ -тим і передані ним в другому раунді в  $n$ -тий сенсорний вузол; в  $j$ -му стовпці містяться значення повідомлень одного і того ж  $j$ -го сенсорного вузла, передані ним усім  $i$ -м сенсорним вузлам. На головній діагоналі розташовані елементи  $a_{ij}^n$ , що є значеннями повідомлень  $j$ -х сенсорних вузлів, передані ними самим собі в першому раунді.

У алгоритмі використовується функція *majority*, яку можна визначити по-різному. Нехай заданий вектор  $e=\{e_i\}$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) і нехай розряди групуються за ознакою рівності значень в групі  $M_1, M_2, \dots, M_m$ , які не перетинаються. Очевидно  $m \leq n$ . Нехай  $|M_1| > |M_2| > \dots > |M_m|$ , де через  $|M|$  позначена потужність множини  $M$ , тобто кількість елементів множини. Якщо розряди  $\{e_i\}$ , що входять в  $M_1$  мають значення  $v$ , то функція *majority* визначається рівністю:  $maj\{e_i\} = v$ .

Якщо  $|M_1|=|M_2|=\dots$ , то значення функції *majority* визначається випадковим вибором індексу групи з числа груп найбільшого розміру.

Необхідно відмітити, що у разі, якщо  $e_i = \{0, 1\}$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) і вектор має парну кількість розрядів, то завжди виконується строга нерівність  $|M_1| > |M_2|$ . Надалі досліджується саме такий випадок двійкових векторів.

Розглянемо бездротову сенсорну мережу, що складається з  $N$  сенсорних вузлів з номерами  $1 \dots N$ . Перевірка здійснюється шляхом взаємного обміну повідомленнями з урахуванням припущень про синхронність бездротової сенсорної мережі і про можливість одержувачем повідомлення визначити його відправника.



Алгоритм  $A_1$  складається з двох етапів: етапу пересилок повідомлень (кроки 1-3) і етапу аналізу отриманих повідомлень (кроки 4-7). Етап аналізу виконується кожним сенсорним вузлом автономно на основі повідомлень, отриманих ним на етапі пересилок.

Блок-схема алгоритму  $A_1$  приведена на рисунку 4.

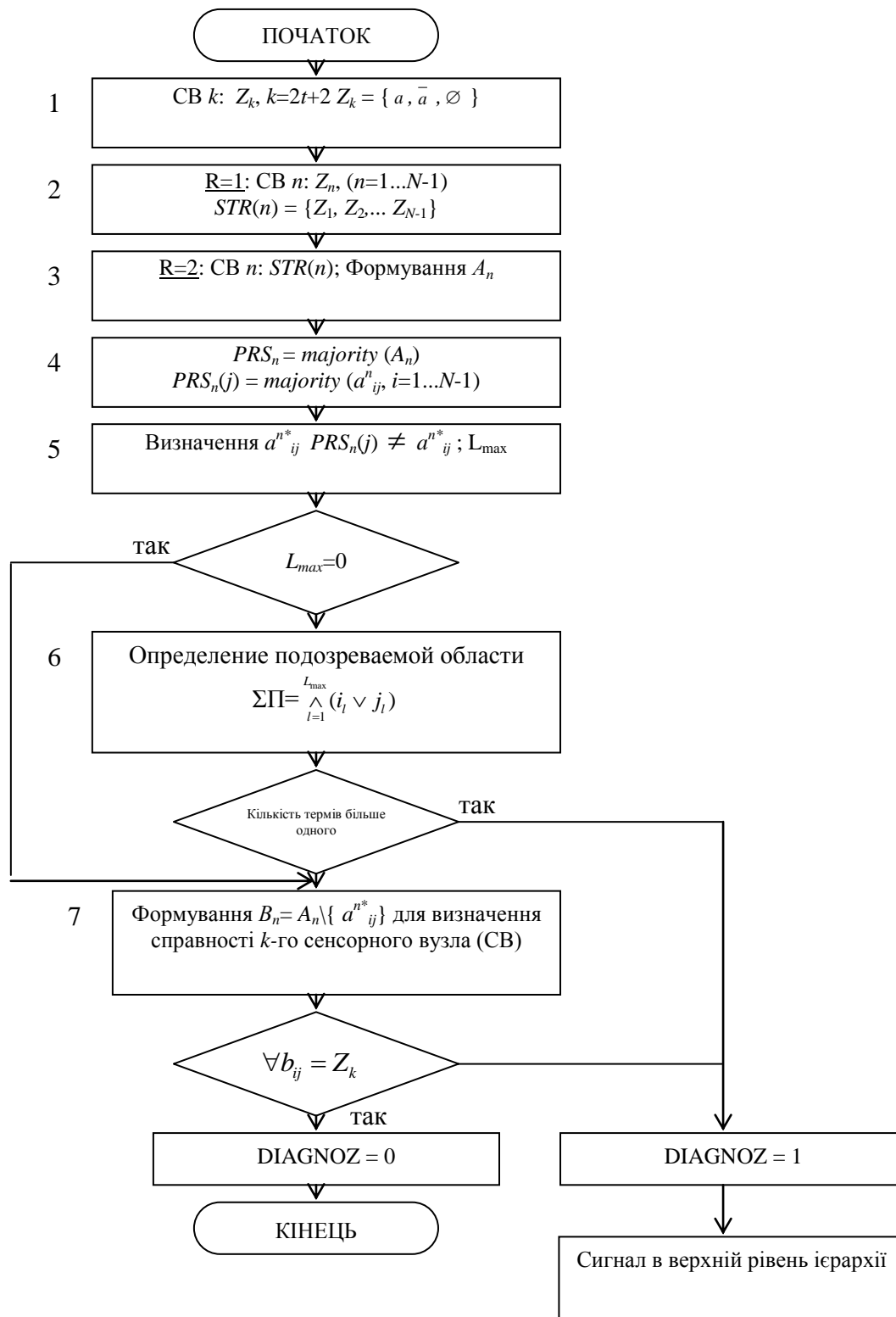


Рис. 4. Алгоритм  $A_1$

У разі неоднозначного рішення задачі діагностування, алгоритм  $A_1$  формує сигнал про свою неспроможність і діагностування бездротової сенсорної мережі триває по алгоритму  $A_2$ , який в якості критерію використовує тривалість виконання фаз з алгоритму  $A_2$  (рис. 5).

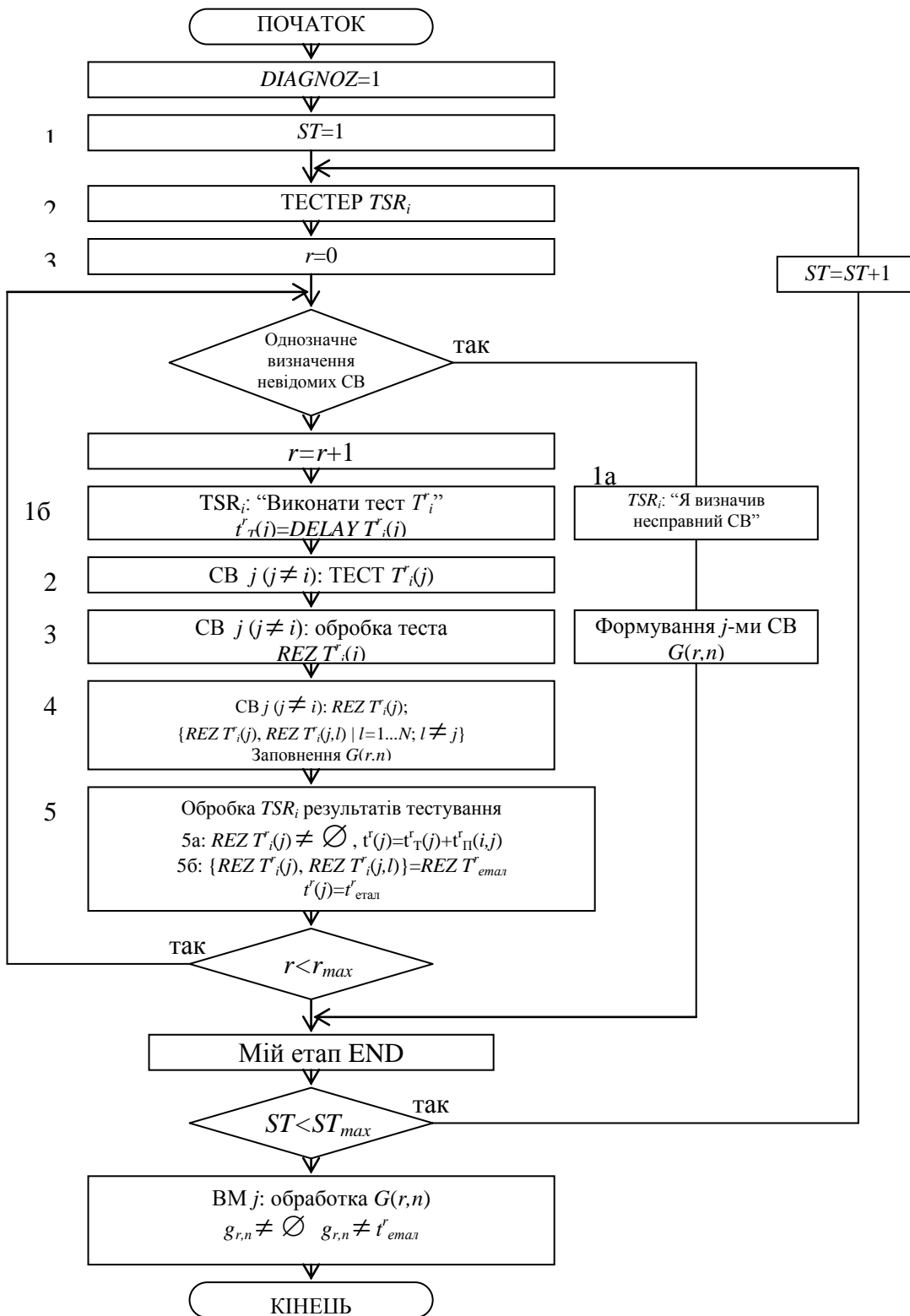


Рис. 5. Алгоритм  $A_2$

Сформульована умова «синхронності» під час діагностування бездротової сенсорної мережі, суть якої полягає в накладенні жорстких часових обмежень на виконання завдання із заздалегідь визначеної множини в системі. Порушення цих часових обмежень слугуватиме ознакою несправності сенсорного вузла.

Запропонований метод діагностування бездротової сенсорної мережі забезпечує діагностування несправностей за будь-якої форми їх прояву, які можуть виникнути в сенсорному вузлі. В процесі виконання за цим методом процедури діагностування, накопичується інформація про форми прояву несправностей, яка є достатньою для того, щоб визначити її приналежність до однієї з трьох груп. Кожній групі відповідає певний алгоритм діагностування. Таким чином, процедура містить елементи самонавчання.

В цілому процедура діагностування на підставі запропонованого методу має складну структуру, оскільки в ній послідовно виконується діагностування за алгоритмами, що застосовано до трьох груп форм прояву несправностей. Якби заздалегідь було відомо, що в сенсорній мережі виникають несправності тільки однієї групи, то їх парирування могло бути забезпечено простішим і ефективнішим способом за допомогою відповідного фрагмента процедури.

Крім того, в даному розділі розроблено узагальнену методику синтезу функціонально стійкої бездротової сенсорної мережі на основі використання наявних надмірностей та перерозподілу функцій сенсорних вузлів, що вийшли з ладу, між справними вузлами. Нехай дано сенсорну мережу, яка складається з  $N$  сенсорних вузлів. Методика містить в собі такі етапи:

1. Визначається місце розташування та перевіряється відстань між суміжними вузлами бездротової сенсорної мережі. Кожен вузол може визначити своє положення шляхом обчислення відстані до своїх сусідів, використовуючи один із чотирьох методів триангуляції (в залежності від типу та області застосування бездротової сенсорної мережі), що ґрунтуються на вимірюваннях відстаней (lateration), рівнів сигналу (attenuation), різниць часу (propagation) та взаємних кутів (angulation). Місцезнаходження вузла згідно з триангуляцією обчислюється за допомогою теорем синусів і косинусів.

2. Обчислюється щільність розташування сенсорних вузлів мережі. Це відношення кількості вузлів на одиницю площі.

3. Здійснюється розрахунок залежності потужності радіосигналу від відстані, яку сигнал може подолати у вільному середовищі без завад і перешкод, з використанням формули

$$P_r = 10 \cdot \lg \left( \frac{P_t \cdot G_r \cdot G_t \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^2} \cdot 10^3 \right),$$

де  $P_r$  – потужність радіосигналу на певній відстані від передавача, dBm;  $P_t$  – потужність передавача радіосигналу, dBm;  $G_r$  – коефіцієнта підсилення приймача;  $G_t$  – коефіцієнт підсилення передавача;  $d$  – відстань між передавачем і точкою приймання сигналу, м;  $\lambda$  – коефіцієнт, який враховує частоту сигналу,

визначається за формулою  $\lambda = c/f$ , де  $c$  – швидкість світла, м/с;  $f$  – частота сигналу, Гц.

5. Визначається границя, межа та запас функціональної стійкості згідно з (4) – (6).

6. Відбувається діагностування сенсорних вузлів на основі використання алгоритмів  $A_1$  та  $A_2$  та визначаються сенсори, які вийшли зладу.

7. Відбувається перерозподіл функцій сенсорних вузлів, що вийшли зладу між справними сенсорними вузлами. Таким чином, забезпечується функціональна стійкість бездротової сенсорної мережі. Перерозподіл функцій в бездротовій сенсорній мережі повинен відбуватись на основі використання наступної оптимізаційної задачі:

$$\begin{aligned}
 F_{WSN} &= f(P_{ij}) \rightarrow \max; \\
 d_{ij} &\rightarrow \min; \\
 w_{ij} &\rightarrow \min; \\
 \rho_{ij} &\rightarrow \max; \\
 E_i &\rightarrow \min, \\
 i, j &= 1, \dots, N, \quad i \neq j,
 \end{aligned} \tag{8}$$

де  $d_{ij}$  – відстань між парою сенсорних вузлів ( $i, j$ ),  $w_{ij}$  – потужність передавача, який здійснює передачу інформації між парою СВ ( $i, j$ ),  $\rho_{ij}$  – пропускна спроможність каналу зв'язку,  $E_i$  – енергоспоживання сенсорного вузла.

Згідно з стандартом IEEE 802.15.4. на елементи сенсорних вузлів накладаються наступні обмеження:

$$\begin{aligned}
 80\text{м} &\leq d_{ij} \leq 100\text{м}; \\
 0 &< w_{ij} \leq 5 \text{ dBm}; \\
 \rho_{ij} &\leq 250 \text{ кбіт / с} \\
 E_i &\leq 60 \text{ мВт}.
 \end{aligned}$$

Таким чином, реалізація запропонованої методики дозволяє синтезувати бездротову сенсорну мережу з урахуванням відстані між сенсорними вузлами, потужності передавачів, енергоспоживання, пропускної здатності каналу зв'язку тощо. Забезпечення властивості функціональної стійкості бездротової сенсорної мережі здійснюється виконанням трьох етапів: ідентифікації нештатних ситуацій за рахунок діагностування елементів мережі (алгоритми  $A_1$  та  $A_2$ ); локалізації нештатної ситуації на основі ігнорування несправних сенсорних вузлів; відновлення функціонування мережі за рахунок

перерозподілу функцій сенсорних вузлів, що вийшли з ладу, між всіма іншими на основі вирішення багатокритеріальної оптимізаційної задачі (8).

**П'ятий розділ** присвячено математичному моделюванню та перевірці достовірності запропонованих наукових результатів. На основі методів, які запропоновані у другому та третьому розділах, здійснено аналіз та багатокритеріальний синтез бездротової сенсорної мережі. За отриманими результатами методик (розділ 4) було удосконалено існуючу структуру бездротової сенсорної мережі. Дослідження структурних показників функціональної стійкості існуючих БСМ дозволяють зробити такі висновки:

1) ймовірність зв'язності  $P_{ij}$  не задовольняє вимогам  $P_{ij} > P_{зад}$ , де  $P_{зад}$  задавалося значення  $P_{зад}=0,9$ ;

2) структура має низький рівень функціональної стійкості, а саме знаходиться на границі функціональної стійкості. Параметричні зміни (підвищення  $p$ ) не можуть вивести структуру в область функціональної стійкості. Тому вихідна структура підлягає оптимізації.

Виконано математичне моделювання загальної задачі синтезу бездротової сенсорної мережі за методикою, запропонованою в розділі 4. Моделювання виконувалося із використанням графічної оболонки програми моделювання БСМ Prowler, розробленої в ISIS (Berkley). Програма Prowler працює в середовищі MatLab (Версія 6.5 і вище). Програма дозволяє задавати параметри радіоканалу зв'язку, задавати параметри мереж, зберігає події, що виникають в мережі, має графічне відображення функціонування мережі.

За результатами аналізу одержаних оптимізованих структур зроблено такі висновки:

1) для всіх структур при зростанні  $p \rightarrow 1$ , ймовірність зв'язності двополюсної мережі також прагне до 1:  $P_{ij} \rightarrow 1$ ;

2) чим вище обсяг фінансування на створення й експлуатацію додаткових каналів зв'язку, тим вище ймовірність зв'язності  $P_{ij}$ , а, отже, більше значення узагальненого показника функціональної стійкості  $F_{WSN}$ .

Результати моделювання оптимальних структур дозволяють визначити топологічні показники функціональної стійкості, за якими зроблено висновки (табл. 1).

Таблиця 1

Показники функціональної стійкості синтезованих структур

Структура $G_{\xi}(V,E)$	$C_D$ тис. н.у.о.	$\chi(G)$	$\lambda(G)$	$Z_V$	$Z_L$	Область ФС
$G_0(V,E)$	0	1	1	0	0	Гр. ФС
$G_1(V,E)$	20	1	1	0	0	Гр. ФС
$G_2(V,E)$	50	2	2	1	1	ФС
$G_3(V,E)$	100	3	3	2	2	ФС
$G_4(V,E)$	500	8	8	7	7	ФС
$G_5(V,E)$	1000	11	11	10	10	ФС

Примітки: ФС – функціонально стійка структура; Гр ФС – структура на границі функціональної стійкості.

1) при оптимізації структури із значенням вартості  $C_D = 20\,000$  н.у.о. структура залишається на границі стійкості;

2) вивести структуру в область функціональної стійкості може тільки оптимізація структури з обсягом вартості  $C_D \geq 50\,000$  н.у.о.;

3) найбільші топологічні показники функціональної стійкості  $\chi(G)$  і  $\lambda(G)$  має сама насичена структура  $G_5(V,E)$ ;

4) найбільшим запасом функціональної стійкості  $Z_V$  і  $Z_L$  володіє найдорожча структура  $G_5(V,E)$ ;

5) значення топологічних показників функціональної стійкості наочно підтверджують принцип «дорожче – краще».

На основі отриманих результатів моделювання були обчислені значення узагальненого показника функціональної стійкості  $F_{WSN}$  :

$$F_{WSN} = f(P_{ij}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \cdot P_{ij}.$$

На рис. 6 представлені значення  $F_{WSN} = f(P_{ij})$  для синтезованих структур  $G_i(V,E)$  у залежності від ймовірності передачі інформації по каналах зв'язку  $p$ .

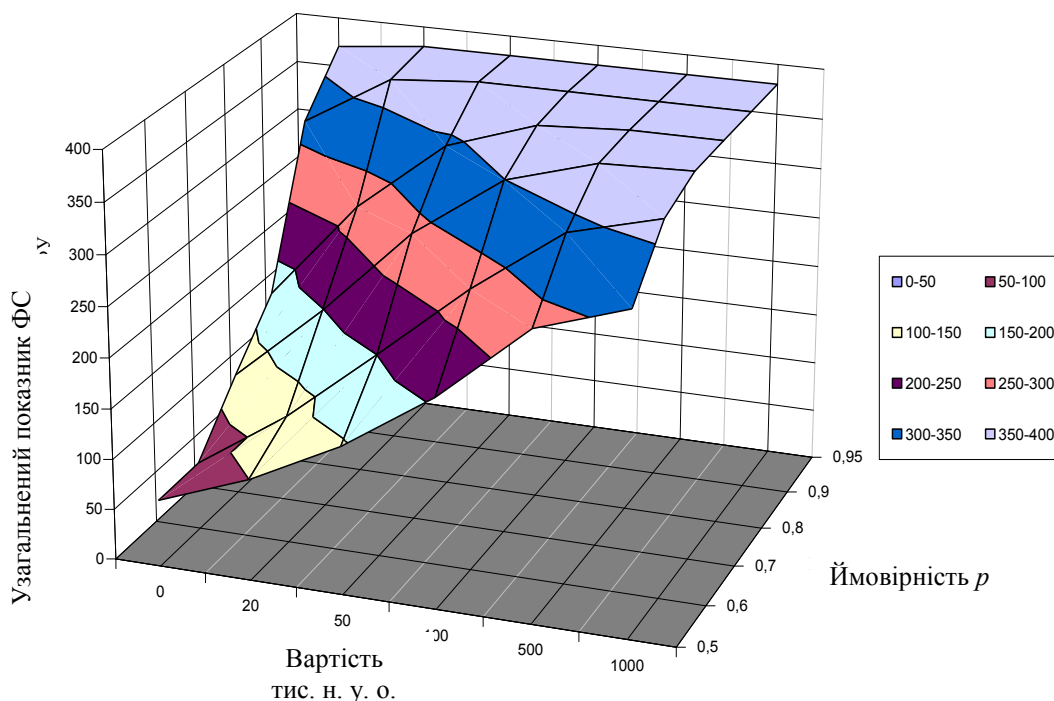


Рис. 6. Розподіл узагальненого показника функціональної стійкості в залежності від значень показників  $p$  і  $C$

Аналіз значень узагальненого показника функціональної стійкості дозволяє порівнювати різні структури мережі. Чим вище  $F_{WSN} = f(P_{ij})$ , тим більше «захищеною» буде мережа від наслідків зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів за рахунок структурної надмірності. З аналізу рис. 6 зроблено висновок про досить слабку чутливість  $F_{WSN} = f(P_{ij})$  до зміни припустимої вартості структури у випадку щодо високих значень показника  $p$  ( $p=0,9\dots0,95$ ). І навпаки, зниження значень  $p$  приводить до необхідності більш високих витрат на встановлення додаткових каналів зв'язку для забезпечення функціональної стійкості бездротової сенсорної мережі.

У свою чергу, показник  $p$  сам по собі відображає як фізичну природу каналу зв'язку так і комплекс заходів щодо забезпечення необхідної живучості (надійності) цього каналу. Тому іншим напрямком підвищення функціональної стійкості в сенсі показника  $F_{WSN} = f(P_{ij})$  є підвищення значень кожного часткового показника  $p$  для кожного окремого каналу зв'язку (рис. 7).

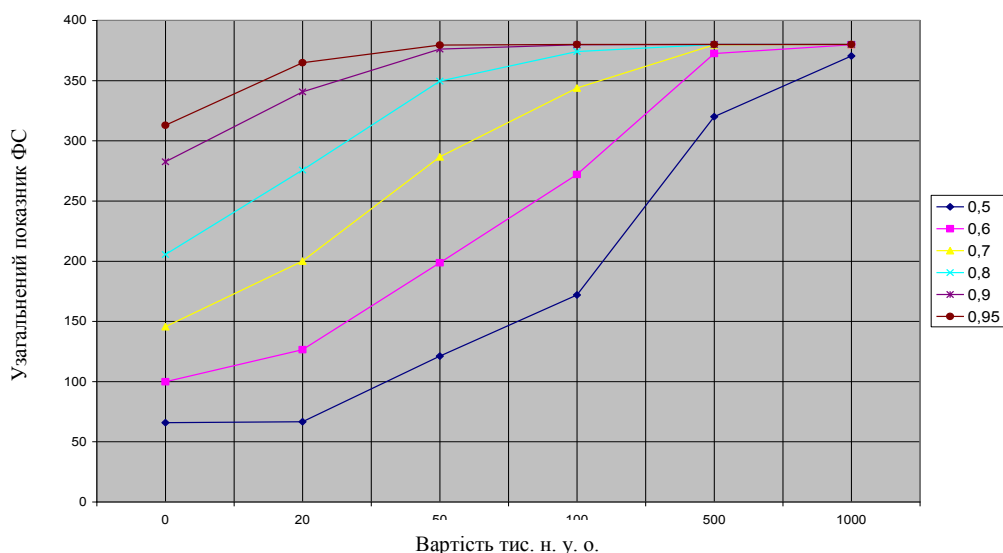


Рис. 7. Залежність узагальненого показника функціональної стійкості від вартості синтезованої структури та ймовірності  $p$  для бездротової сенсорної мережі

Очевидно, що комплекс заходів щодо підвищення живучості (надійності) також буде впливати на вартість каналу зв'язку, що, в остаточному підсумку приведе до необхідності рішення нової проблеми вибору раціонального варіанта удосконалення конкретної бездротової сенсорної мережі. Зазначена проблема є важливим науковим напрямком подальших досліджень у цій області.

## ВИСНОВКИ

В результаті дисертаційних досліджень вирішена важлива науково-прикладна проблема щодо розробки методологічних основ багатокритеріального синтезу функціонально стійких бездротових сенсорних мереж, які мають автономно функціонувати в умовах впливу зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів. Ця проблематика має суттєве значення для проектування та модернізації існуючих бездротових сенсорних мереж з метою забезпечення їх високої ефективності при функціонуванні за призначенням. Відсутність аналогічних рішень у нашій країні та за кордоном робить результати досліджень пріоритетними.

В дисертації одержані такі основні результати:

1. На підставі проведеного аналізу існуючих методів синтезу та діагностування бездротових сенсорних мереж виявлено протиріччя між необхідністю сталого функціонування бездротових сенсорних мереж в умовах дії внутрішніх та зовнішніх дестабілізуючих впливів та можливостями існуючих методів забезпечення функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж. В сучасних наукових працях основна увага приділяється задачі синтезу живучих і надійних мереж. Разом з тим, в цих роботах не в повній мірі відображені питання визначення оптимального рівня надмірності для парирування руйнувань різного рівня та збереження системою можливості виконання основних функцій в умовах впливу внутрішніх та зовнішніх дестабілізуючих факторів. Недосконалість і обмеженість існуючих наукових методів синтезу складних технічних систем, зокрема, бездротових сенсорних мереж, не дозволяє забезпечити їх функціональну стійкість. тому сформульована в дисертації науково-прикладна проблема є актуальною.

2. Вперше розроблено необхідну і достатню умову функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж, яка полягає в працездатності всіх вузлів комутації і наявності альтернативних маршрутів передачі інформації між вузлами. Дане наукове положення є основою запропонованих методологічних основ і дозволяє на його базі розробити моделі та методи аналізу, синтезу, діагностування і забезпечення властивості функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж.

3. Удосконалено метод аналізу бездротових сенсорних мереж, що на відміну від існуючих заснований на понятійному апараті функціональної стійкості, який являє собою сукупність ознак, показників, критеріїв, границь, запасу і областей функціональної стійкості. Зазначений метод дозволяє якісно і кількісно характеризувати здатність бездротової сенсорної мережі до парирування наслідків нештатних ситуацій, що виникають внаслідок дії зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів.

4. Вперше розроблено методику синтезу бездротових сенсорних мереж на основі ієрархічної організації засобів забезпечення функціональної стійкості. Наукова новизна методики полягає у використанні функції взаємодії між рівнями ієрархії бездротової сенсорної мережі, де в ролі аргументів



використовуються значення інших функцій, що надаються цьому рівню нижніми рівнями або реалізовані в ньому самому. Показано, що така організація засобів забезпечення функціональної стійкості дозволяє: скоротити час реакції системи на виникаючі відмови; проводити зміни в засобах забезпечення функціональної стійкості в процесі накопичення знань про відмови.

5. Вперше розроблено метод діагностування прихованих відмов в бездротовій сенсорній мережі на основі застосування дворівневої системи забезпечення функціональної стійкості. Наукова новизна даного методу полягає в здійсненні діагностування шляхом взаємного обміну повідомленнями між сенсорними вузлами з урахуванням припущень про синхронність бездротової сенсорної мережі і про можливість одержувачем повідомлення визначити його відправника. Даний метод дозволяє здійснювати діагностування з різною якістю за різний час, що узгоджується з ієрархічною концепцією організації засобів забезпечення функціональної стійкості. Якщо відмови не вимагають високої якості діагностування, то метод дозволяє отримати результати з мінімальними часовими витратами.

6. Вперше розроблено узагальнену методику синтезу функціонально стійкої бездротової сенсорної мережі, що заснована на використанні наявних надмірностей та перерозподілу функцій сенсорних вузлів, які вийшли з ладу, між справними вузлами. Перерозподіл функцій в бездротовій сенсорній мережі має відбуватись на основі розв'язання багатокритеріальної оптимізаційної задачі. Реалізація запропонованої методики дозволяє синтезувати бездротову сенсорну мережу з урахуванням відстані між сенсорними вузлами, потужності передавачів, енергоспоживання та пропускної здатності каналу зв'язку.

7. Реалізація запропонованих в дисертації методологічних основ побудови функціонально стійких бездротових сенсорних мереж, як сукупність концептуальних, теоретичних та технологічних основ, дозволяє: проектувати і експлуатувати функціонально стійкі бездротові сенсорні мережі в умовах впливу зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих впливів; підвищити показники функціональної стійкості існуючих бездротових сенсорних мереж, що характеризують здатність системи парирувати нештатні ситуації за рахунок перерозподілу ресурсів; здійснювати порівняння різних структур бездротових сенсорних мереж щодо здатності до парирування нештатних ситуацій та відновлення процесу збору, обробки, зберігання та передачі інформації; проектувати бездротові сенсорні мережі, стійкі до відмов, збоїв за критерієм максимуму показника функціональної стійкості при обмеженні на вартість створення системи; в процесі експлуатації автоматично, без втручання обслуговуючого персоналу, виявляти відмови, збої, пошкодження в бездротовій сенсорній мережі за мінімальний час із достовірністю не нижче заданої, що дасть можливість своєчасного перерозподілу виконуваних завдань, перенаправлення інформаційних потоків і відновлення процесу функціонування.

8. Розроблено два алгоритми, які утворюють дворівневу систему діагностування прихованих відмов і дозволяють здійснити діагностування з різною якістю за різний час, що узгоджується з ієрархічною концепцією організації засобів забезпечення функціональної стійкості бездротової сенсорної мережі.

9. Реалізація запропонованої ієрархічної організації засобів забезпечення властивості функціональної стійкості в бездротових сенсорних мережах дозволить скоротити час реакції системи на виникаючі відмови.

10. Результати досліджень прийняті до впровадження в ПрАТ «Бліц-інформ» (акт від 27.03.2018 р.), в ТОВ «Облік і управління» (акт від 25.06.2018 р.), та реалізовані в навчальний процес кафедри комп'ютерних наук Державного університету телекомунікацій при викладанні дисципліни «Основи теорії надійності та діагностики телекомунікаційних систем» для студентів спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» денної форми навчання (акт від 15.05.2018 р.).

11. Мета досліджень щодо підвищення інтегрального показника функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж шляхом розробки та реалізації моделей та методів забезпечення властивості функціональної стійкості під дією зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих впливів, досягнута та всі часткові завдання вирішені повністю. Наукові результати досліджень є внеском у розвиток теоретичних і прикладних основ розроблення моделей і методів оцінювання якості та підвищення надійності, функціональної безпеки та живучості інформаційних та інформаційно-управляючих систем в частині, що стосується розробки моделей та методів підвищення показників функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж.

12. Перспективними шляхами подальших досліджень у зазначеному напрямку може бути широке коло питань щодо розробки нових та удосконалення існуючих методик підвищення рівня функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж на основі багатокритеріального синтезу функціонально стійких бездротових сенсорних мереж, які мають автономно функціонувати в умовах впливу зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Musienko A.P. Diagnostic model of wireless sensor network based on the random test of checks / A.P.Musienko, O.V. Barabash, N.V. Lukova-Chuiko, I.P. Salanda // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, 2018. – VI (18), Issue 158, Budapest, Hungary, pp. 25 – 28.

2. Мусієнко А.П. Інтелектуальна система оцінювання деструктивного характеру текстового контенту соціальних мереж на основі нечіткої логіки / Р.В. Грищук, А.П. Мусієнко, В.С. Савчук, О.М. Грищук // Наукоємні технології. – К.: НАУ, 2018. – № 2 (38). – С. 166 – 172.

3. Мусієнко А.П. Використання мереж Петрі для побудови моделі виявлення зовнішніх впливів на інформаційну систему / А.П. Мусієнко,

Н.В. Лукова-Чуйко М.О. Коваль // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ, 2018. – Вип. 2 (48). – С. 77 – 82.

4. Мусієнко А.П. Забезпечення функціональної стійкості інформаційних мереж на основі розробки методу протидії DDoS-атакам / О. В. Барабаш, Н. В. Лукова-Чуйко, А. П. Мусієнко, В. В. Собчук // Сучасні інформаційні системи. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – Т 2. – № 1. – С. 56 – 64.

5. Мусієнко А.П. Аналіз застосування мереж Петрі для підтримки функціональної стійкості інформаційних систем / О.В. Барабаш, Н.В. Лукова-Чуйко, А.П. Мусієнко, О.Ю. Ільїн // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2018. – № 1 (58). – С. 11 – 18.

6. Мусієнко А.П. Система показників та критеріїв формалізації процесів забезпечення локальної функціональної стійкості розгалужених інформаційних мереж / І.П. Саланда, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко // Наукове періодичне видання «Системи управління, навігації та зв'язку». – Полтава: ПНТУ, 2017. – Вип. 1 (41). – С. 122 – 126.

7. Мусієнко А.П. Математична модель структури розгалуженої інформаційної мережі 5 покоління (5G) на основі випадкових графів / І.П. Саланда, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко, Н.В. Лукова-Чуйко // Наукове періодичне видання «Системи управління, навігації та зв'язку». – Полтава: ПНТУ, 2017. – Вип. 6 (46). – С. 118 – 121.

8. Musienko A. Information Technology of Targeting: Optimization of Decision Making Process in a Competitive Environment / O. Barabash, G. Shevchenko, N. Dakhno, O. Neshcheret, A. Musienko // International Journal of Intelligent Systems and Applications. – Vol. 9. – № 12. – Hong Kong: MECS Publisher, 2017. – P. 1 – 9. (This journal is indexed in Elsevier Scopus).

9. Мусієнко А.П. Діагностична модель бездротової сенсорної мережі на основі взаємних перевірок елементів мережі / І.В. Пампуха, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко, М.О. Коваль // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2017. – Вип. 57. – С. 160 – 168.

10. Мусієнко А.П. Метод прихованої передачі даних в інформаційних системах із застосуванням стеганографії / О.В. Барабаш, Н.В. Лукова-Чуйко, А.П. Мусієнко, А.О. Смірнов // Сучасний захист інформації: науково-технічний журнал. – К.: ДУТ, 2017. – № 4. – С. 43 – 49.

11. Мусієнко А.П. Математична формалізація функціональної стійкості пілотажно-навігаційного комплексу повітряного судна під час горизонтального польоту / С.М. Неділько, В.В. Арделян, А.П. Мусієнко // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2017. – Вип. 58. – С. 48 – 53.

12. Мусієнко А.П. Методи пошуку оптимальних маршрутів графа структури розгалуженої інформаційної мережі за заданим критерієм оптимальності при різних обмеженнях / І.П. Саланда, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – К.: УНДІЗ, 2016. – №2 (42). – С. 99 – 106.

13. Мусієнко А.П. Обґрунтування математичної моделі тестового діагностування пілотажно-навігаційного комплексу повітряного судна / В.В. Арделян, Д.М. Обідін, А.П. Мусієнко // Системи обробки інформації. – Харків: ХУПС, 2016. – № 8 (145). – С. 17 – 20.

14. Musienko A. A decision tree in a classification of fire hazard factors / N. Pashynska, V. Snytyuk, V. Putrenko, A. Musienko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov, 2016. – № 5/10(83). – P. 32–37. (This journal is indexed in Elsevier Scopus).

15. Мусієнко А.П. Методика накопичення діагностичної інформації при виконанні діагностування в розподілених базах знань пілотажно-навігаційного комплексу повітряного судна / В.В. Арделян, Д.М. Обідін, А.П. Мусієнко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – №7 (1179) – С. 61 – 66.

16. Мусієнко А.П. Методика визначення характеристичних чисел в системах інтелектуального відеоконтролю / С.В. Бодров, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко // Наукове періодичне видання «Системи обробки інформації». – Харків: ХУПС, 2015. – Вип. 11 (136). – С. 12 – 15.

17. Мусієнко А.П. Методика накопичення діагностичної інформації в системах інтелектуального відеоконтролю / О.В. Барабаш, С.В. Бодров, А.П. Мусієнко // Наукове періодичне видання «Системи управління, навігації та зв'язку». – Полтава: ПНТУ, 2015. – Вип. 1 (33). – С. 118 – 121.

18. Мусієнко А.П. Діагностична модель розподіленої системи інтелектуального відеоконтролю прикордонних пунктів пропуску / О.В. Барабаш, С.В. Бодров, А.П. Мусієнко // Науково-виробничий збірник «Наукові записки українського науково-дослідного інституту зв'язку». – К.: УНДІЗ, 2015. – № 5 (39). – С. 72 – 77.

19. Мусієнко А.П. Методика обробки діагностичної інформації в системах інтелектуального відеоконтролю прикордонних пунктів пропуску / В.Ф. Заїка, С.В. Бодров, А.П. Мусієнко // Наукове періодичне видання «Системи управління, навігації та зв'язку». – Полтава: ПНТУ, 2015. – Вип. 2 (34). – С. 38 – 41.

20. Мусієнко А.П. Модель бази знань інтелектуальної системи управління високошвидкісного рухомого об'єкта на основі її верифікації / О.В. Барабаш, Д.М. Обідін, А.П. Мусієнко // Системи обробки інформації. – Харків: ХУПС, 2014. – № 5 (121). – С. 3 – 6.

21. Мусієнко А.П. Математична модель інтелектуалізації процесів управління рухомим об'єктом на основі нечітких семантичних мереж / О.В. Барабаш, Д.М. Обідін, А.П. Мусієнко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – К.: УНДІЗ, 2014. – №3 (31). – С. 5 – 10.

22. Мусієнко А.П. Алгоритм самодіагностування технічного стану вузлів комутації інформаційних систем / О.В. Барабаш, Д.М. Обідін, А.П. Мусієнко // Сучасний захист інформації. – К.: ДУТ, 2014. – № 2. – С. 114 – 121.

23. Мусієнко А.П. Аналіз побудови мережі відеоконтролю пунктів митного спостереження на основі функціонально стійкої системи /

О.В. Барабаш, С.В. Бодров, А.П. Мусієнко // Науково-практичний журнал «Зв'язок». – К.: ДУТ, 2014. – № 2. – С. 8 – 11.

24. Мусієнко А.П. Інтелектуальні технології оптимізації систем пожежного моніторингу: монографія / О.М. Землянський, А.П. Мусієнко, В.Є. Снитюк. – К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2017. – 144 с.

25. Мусієнко А.П. Методика діагностування бездротової сенсорної мережі на основі внутрішніх тестових перевірок / О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко, М.О. Коваль // Тези доповідей VII міжнародної науково-практичної конференції «Математика, інформаційні технології, освіта» м. Луцьк – с. Світязь, 3 – 5 червня 2018 р. – Луцьк: СНУ імені Лесі Українки, 2018. – С. 49 – 51.

26. Мусієнко А.П. Діагностична модель розподіленої бази знань інтелектуальної інформаційної мережі / О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко // Матеріали науково-технічної конференції «Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу», м. Київ, 24-25 квітня 2018 р. – К.: ДЕА, 2018. – С. 33 – 34.

27. Musienko A. Application of Petri Networks for Support of Functional Stability of Information Systems. / O. Barabash, V. Sobchuk, N. Lukova-Chuiko and A. Musienko // 2018 IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC). 08-12 October, 2018. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine. P. 36 – 39. (This Proceeding is indexed in Elsevier Scopus).

28. Мусієнко А.П. Застосування безпроводних сенсорних мереж для забезпечення достовірності передачі інформації в системі моніторингу обстановки демілітаризованої смуги / О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко, М.О. Коваль // Десята міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2017)»: Збірка тез. 16-17 травня 2017 р., м. Київ. – К.: НАУ, 2017. – С. 298 – 300.

29. Мусієнко А.П. Підвищення достовірності передачі інформації в системі моніторингу району надзвичайної ситуації / О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко // Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): праці міжнародної наук.-прак. конференції, 16-18 травня 2017 р., м. Київ, м. Черкаси. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2017. – С. 199.

30. Мусієнко А.П. Особливості побудови системи моніторингу обстановки демілітаризованої смуги на основі безпроводних сенсорних мереж / О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко, М.О. Коваль // Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони: збірник матеріалів науково-практичної конференції, 5 квітня 2017 р., м. Київ. – К.: НУОУ імені Івана Черняхівського, 2017. – С. 135 – 137.

31. Мусієнко А.П. Критерії функціональної стійкості бездротової сенсорної мережі / О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко, М.О. Коваль // XIII Міжнародна наукова конференція «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» (ISDMCI'2017): матеріали наукової конференції. 22-26 травня 2017 р., с. Залізний порт. – Херсон: ХНТУ, 2017. – С. 30 – 31.

32. Musienko A. Diagnostic Model of Wireless Sensor Network Based on Mutual Inspection of Network Elements / O. Barabash, N. Lukova-Chuiko, A. Musienko, I. Salanda // Proceeding of 14 International Conference the Experience of Designing and Application of Cad Systems in Microelectronics (CADSM 2017), 21-25 February, 2017, Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2017. – P. 303 – 305.

33. Musienko A. Estimation of Functional Stability of Special Purpose Networks Located on Vehicles / D. Obidin, V. Ardelyan, N. Lukova-Chuiko, A. Musienko // Proceedings of 2017 IEEE 4th International Conference «Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)», October 17-19, 2017, Kyiv, Ukraine. – Kyiv: National Aviation University, 2017. – P. 167 – 170. (This Proceeding is indexed in Elsevier Scopus).

34. Мусієнко А.П. Критерії та вимоги функціональної стійкості пілотажно-авіаційного комплексу повітряних суден / А.П. Мусієнко В.В. Арделян // Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем: Збірник матеріалів доповідей та тез науково-технічної конференції; 10-11 березня 2016 р. м. Київ, Київський національний університет імені Тараса Шевченка. – К.: КНУ імені Тараса Шевченка, 2016.– С. 15 – 16.

35. Мусієнко А.П. Методика діагностування адресно-аналогових пожежних датчиків автоматичних систем пожежної сигналізації на основі внутрішніх тестових перевірок / О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко // VIII Міжнародна школа-семінар «Теорія прийняття рішень» Присвячена 50-річчю математичного факультету ДВНЗ «Ужгородського національного університету», 26 вересня – 01 жовтня, м. Ужгород. – Ужгород: УжНУ, 2016. – С. 42.

36. Мусієнко А.П. Обґрунтування типології нечітких відповідностей реальних процесів в системах автоматичного управління / В.В. Арделян, А.П. Мусієнко // III Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та взаємодії» (IT & I). 08 – 10 листопада, м. Київ. – К.: КНУ імені Тараса Шевченка, 2016. – С. 301 – 302.

37. Мусієнко А.П. Функціональна стійкість процесів управління на основі інтелектуалізації систем пожежного моніторингу / О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко // XII Міжнародна науково-практична конференція «Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє», 25 листопада 2016 р., м. Київ. – К.: Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2016. – С. 23.

38. Мусієнко А.П. Методика діагностування багатомодульних обчислювальних систем на основі внутрішніх тестових перевірок / О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко // V Міжнародна науково-практична конференція «Управління високошвидкісними рухомими об'єктами та професійна підготовка операторів складних систем» Збірник тез науково-технічної конференції, 24-25 листопада 2016 р., м. Кропивницький. – Кропивницький: КЛА НАУ, 2016. – С. 153.

39. Мусієнко А.П. Застосування функціональної стійкості процесів управління / О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко // Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, ад'юнктів, слухачів, курсантів і студентів «Молодіжна військова наука у Київському національному

університеті імені Тараса Шевченка»: тези доп. 24 квітня 2015 р., м. Київ. – К.: КНУ імені Тараса Шевченка, 2015. – С. 60.

40. Musienko A. Methods of self-diagnosis of telecommunication networks based on flexible structures of test connections / O. Barabash, N. Lukova-Chuiko, A. Musienko // Zborník príspevkov z medzinárodného vedeckého seminára «Riadenie bezpečnosti zložitých systémov». 23 – 27 februára 2015. – Liptovský Mikuláš, Slovakia: Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika, 2015. – Str. 226 – 231.

41. Мусієнко А.П. Аналіз побудови мережі відеоконтролю на основі функціонально стійкої системи / О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко, С.В. Бодров // Восьма міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (ІПРТК-2015): тези доп. 15 – 18 травня 2015 р., м. Київ. – К.: НАУ, 2015. – С. 234.

42. Мусієнко А.П. Критерії функціональної стійкості системи для побудови мережі відеоконтролю пункту спостереження / О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко, С.В. Бодров // XI Міжнародна наукова конференція «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» (ISDMCI'2015): Матеріали наукової конференції. 25 – 28 травня 2015 р., с. Залізний порт. – Херсон: ХНТУ, 2015. – С. 25 – 26.

43. Мусієнко А.П. Алгоритм накопичення діагностичної інформації в системах інтелектуального відеоконтролю на прикордонних пунктах пропуску / О.В. Барабаш, С.В. Бодров, А.П. Мусієнко // Тези доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції «Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє». 27 листопада 2015 р., м. Київ. – К.: ВІКНУ, 2015. – С. 23.

44. Мусієнко А.П. Аналіз систем інтелектуального відеоконтролю прикордонних пунктів пропуску / С.В. Бодров, А.П. Мусієнко // Освітньо-наукове забезпечення діяльності правоохоронних органів та військових формувань України: тези VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції. 10 грудня 2015 р., м. Хмельницький. – Хмельницький: НАДПСУ імені Богдана Хмельницького, 2015. – С. 473 – 474.

45. Мусієнко А.П. Аналіз нестійких відмов та збоїв // Матеріали науково-технічної конференції «Актуальні проблеми забезпечення інформаційної безпеки держави»: збірник тез. 18 грудня 2014 р., м. Київ. – К.: ДУТ, 2014. С. 56 – 57.

46. Мусієнко А.П. Функціональна стійкість процесів управління на основі інтелектуалізації навігаційного комплексу / О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко // III Міжнародній науково-практичній конференції «Управління високошвидкісними рухомими об'єктами та професійна підготовка операторів складних систем»: тези доп. 27 – 28 листопада 2014 р., м. Кіровоград. – Кіровоград: КЛА НАУ, 2014. – С. 7 – 8.

47. Мусієнко А.П. Алгоритм самодіагностування технічного стану вузлів комутації телекомунікаційних мереж / А.П. Мусієнко, Н.В. Лукова-Чуйко // Третя міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатизації»: збірник тез. 11 – 13 грудня 2014 р., м. Київ, м. Полтава, м. Катовице, м. Париж, м. Орел, м. Харків. – К.: ДУТ, 2014. – С. 40.

## АНОТАЦІЯ

**Мусієнко А.П. Методологічні основи забезпечення функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж на основі багатокритеріальної оптимізації.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 «Інформаційні технології». – Державний університет телекомунікацій, Київ, 2019.

В результаті дисертаційних досліджень вирішена важлива науково-прикладна проблема щодо розробки методологічних основ багатокритеріального синтезу функціонально стійких бездротових сенсорних мереж, які мають автономно функціонувати в умовах впливу зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів.

Вперше розроблено необхідну і достатню умову функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж, яка полягає в працездатності всіх вузлів комутації і наявності альтернативних маршрутів передачі інформації між вузлами. Дане наукове положення є основою запропонованих методологічних основ і дозволяє на його базі розробити моделі та методи аналізу, синтезу, діагностування і забезпечення властивості функціональної стійкості бездротових сенсорних мереж.

Вперше розроблено узагальнену методику синтезу функціонально стійкої бездротової сенсорної мережі, що заснована на використанні наявних надмірностей та перерозподілу функцій сенсорних вузлів, які вийшли з ладу, між справними вузлами. Перерозподіл функцій в бездротовій сенсорній мережі має відбуватись на основі розв'язання багатокритеріальної оптимізаційної задачі. Реалізація запропонованої методики дозволяє синтезувати бездротову сенсорну мережу з урахуванням відстані між сенсорними вузлами, потужності передавачів, енергоспоживання та пропускної здатності каналу зв'язку.

**Ключові слова:** інформаційна технологія, функціональна стійкість, бездротова сенсорна мережа, сенсорний вузол, приховані відмови.

## АННОТАЦИЯ

**Мусиенко А.П. Методологические основы обеспечения функциональной устойчивости беспроводных сенсорных сетей на основе многокритериальной оптимизации.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.06 «Информационные технологии». – Государственный университет телекоммуникаций, Киев, 2019.

В результате диссертационных исследований решена важная научно-прикладная проблема, которая заключается в разработке методологических основ многокритериального синтеза функционально устойчивых беспроводных сенсорных сетей, которые должны автономно функционировать в условиях влияния внешних и внутренних дестабилизирующих факторов.



Впервые разработано необходимое и достаточное условие функциональной устойчивости беспроводных сенсорных сетей, которое заключается в работоспособности всех узлов коммутации и наличии альтернативных маршрутов передачи информации между узлами. Данное научное положение является основой предложенной методологии и позволяет на его базе разработать модели и методы анализа, синтеза, диагностирования и обеспечения свойства функциональной устойчивости беспроводных сенсорных сетей.

Впервые разработана обобщенная методика синтеза функционально устойчивой беспроводной сенсорной сети, которая основана на использовании имеющейся избыточности и перераспределения функций вышедших из строя сенсорных узлов между исправными узлами. Перераспределение функций в беспроводной сенсорной сети должно происходить на основе решения многокритериальной оптимизационной задачи. Реализация предложенной методики позволяет синтезировать беспроводную сенсорную сеть с учетом расстояния между сенсорными узлами, мощности передатчиков, энергопотребления и пропускной способности канала связи.

Реализация предложенных в диссертации методологических основ построения функционально устойчивых беспроводных сенсорных сетей, как совокупность методологических подходов, методов и методик, позволяет: проектировать и эксплуатировать функционально устойчивые беспроводные сенсорные сети в условиях влияния внешних и внутренних дестабилизирующих влияний; повысить показатели функциональной устойчивости существующих беспроводных сенсорных сетей, которые характеризуют способность системы парировать нештатные ситуации за счет перераспределения ресурсов; осуществлять сравнение разных структур беспроводных сенсорных сетей относительно способности к парированию нештатных ситуаций и возобновлению процесса сбора, обработки, хранения и передачи информации; проектировать беспроводные сенсорные сети, устойчивые к отказам по критерию максимума показателя функциональной устойчивости при ограничении на стоимость создания системы; в процессе эксплуатации автоматически, без вмешательства обслуживающего персонала, обнаруживать отказы, сбои, повреждения в беспроводной сенсорной сети за минимальное время с достоверностью не ниже заданной, что даст возможность своевременного перераспределения выполняемых заданий, перенаправления информационных потоков и возобновления процесса функционирования.

Результаты исследований приняты к внедрению в ПрАТ «Блиц-информ» (акт от 27.03.2018 г.); в ООО «Учет и управление» (акт от 25.06.2018 г.); в учебный процесс кафедры компьютерных наук Государственного университета телекоммуникаций (акт от 15.05.2018 г.).

Цель исследований относительно повышения интегрального показателя функциональной устойчивости беспроводных сенсорных сетей путем разработки и реализации моделей и методов обеспечения свойства функциональной устойчивости под действием внешних и внутренних дестабилизирующих влияний, достигнута и все частные задачи решены

полностью. Научные результаты исследований являются вкладом в развитие теоретических и прикладных основ разработки моделей и методов оценивания качества и повышения надежности, функциональной безопасности и живучести информационных и информационно-управляющих систем в части, касающейся разработки моделей и методов повышения показателей функциональной устойчивости беспроводных сенсорных сетей.

Перспективными путями дальнейших исследований в отмеченном направлении может быть широкий круг вопросов относительно разработки новых и усовершенствования существующих методик повышения уровня функциональной устойчивости беспроводных сенсорных сетей на основе многокритериального синтеза функционально устойчивых беспроводных сенсорных сетей, которые должны автономно функционировать длительное время без технического обслуживания.

**Ключевые слова:** информационная технология, функциональная устойчивость, беспроводная сенсорная сеть, сенсорный узел, скрытые отказы.

### ABSTRACT

**Musienko A.P. Methodological bases for ensuring the functional stability of wireless sensory networks on the basis of multicriterion optimization.** – The manuscript.

Thesis for a degree of Doctor of Engineering by specialty 05.13.06 «Information Technology». – State University of Telecommunications, Kyiv, 2019.

As a result of dissertation researches the decided is important the scientifically-applied problem in relation to development of methodological bases of multicriterion synthesis functionally of proof wireless sensory networks that must autonomically function in the conditions of influence of external and internal destabilizing factors.

The necessary and sufficient condition of functional firmness of wireless sensory networks, that consists in the capacity of all knots of commutation and presence of alternative routes of information between knots, offers first. This scientific position is basis of an offer methodology and allows on his base to work out models and methods of analysis, synthesis, diagnosticating and providing of property of functional firmness of wireless sensory networks.

The generalized methodology is first worked out of synthesis functionally of proof wireless sensory network, that is based on the use of present surpluses and redistribution of functions of sensory knots, that broke ranks, between in good condition knots. The redistribution of functions in a wireless sensory network must take place on the basis of decision of multicriterion optimization task. Realization of an offer methodology allows to synthesize a wireless sensory network taking into account distance between sensory knots, powers of transmitters, energy consumption and channel capacity.

**Keywords:** information technology, functional stability, wireless sensory network, sensory node, hidden refuses.