

TECHNICAL SCIENCES

Методика діагностування прихованих та постійних відмов в бездротових сенсорних мережах підприємств

О. В. Барабаш¹, В. В. Собчук¹, А. П. Мусієнко^{1*}, І. О. Ляшенко²

¹Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна

²Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана, Київ, Україна

*Corresponding author. E-mail: mysienkoandrey@gmail.com

Paper received 30.08.19; Accepted for publication 15.09.19.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2019-206VII25-07>

Анотація. В роботі розглядається одна з основних властивостей складних технічних систем – функціональна стійкість. Побудова методики для діагностування несправностей в сенсорних вузлах бездротових сенсорних мережах підприємств. Дана методика дозволить бездротовим сенсорним мережам підприємств зберігати упродовж заданого часу виконання своїх основних функцій в межах, встановлених нормативними вимогами, в умовах впливу потоків відмов, несправностей, збоїв.

Ключові слова: функціональна стійкість, бездротові сенсорні мережі.

Вступ. Бездротові сенсорні мережі широко використовуються у всіх сферах людської діяльності, зокрема, на великих промислових підприємствах [1]. Аналіз функціонування таких мереж показав, що такі їх характеризують такі властивості як стійкість, надійність, живучість, відмовостійкість при дії відмов і збоїв, але не дозволяють повною мірою описати процеси функціонування в умовах дії потоків відмов і несправностей, можливих умисних дій, а також помилках обслуговуючого персоналу і інших внутрішніх і зовнішніх дестабілізуючих діях. Тому, доцільно розглянути властивість складних технічних систем – функціональну стійкість.

Під функціональною стійкістю інформаційної системи розуміється властивість зберігати упродовж заданого часу виконання своїх основних функцій в межах, встановлених нормативними вимогами, в умовах впливу потоків відмов, несправностей, збоїв.

Аналіз основних публікацій. Проблеми стійкості досліджувались у роботах багатьох авторів, основними з яких є монографії А.М. Ляпунова, Ж. Ла-Салля і С. Лефшеца, І.Г. Малкіна, А. Пуанкаре, Б.Г. Демидовича, Л. Чезари інших. Більшість підходів теорії стійкості, базуються на дослідженнях систем диференціальних рівнянь. Разом з тим, класичні підходи теорії стійкості для сучасних сенсорних мереж, що засновані на використанні методів штучного інтелекту, часто не відповідають вимогам щодо адекватності та надійності оцінок стійкості функціонування таких систем.

Проблема забезпечення стійкого функціонування складних технічних систем вперше була поставлена в роботах О.А. Машкова, де в [2, 3] вперше було введено термін “функціональна стійкість”. Ключові положення теорії функціональної стійкості потім були розвинені в роботах О.В. Барабаша, Ю.В. Кравченка, В.А. Савченка, О.А. Кононова, С.М. Неділька та інших. Разом з тим, очевидною є залежність моделей і методів теорії функціональної стійкості від предметної області їх застосування.

Метою роботи є побудова методики для діагностування несправностей в сенсорних вузлах бездротових

сенсорних мережах підприємств. Дана методика дозволить бездротовим сенсорним мережам підприємств зберігати упродовж заданого часу виконання своїх основних функцій в межах, встановлених нормативними вимогами, в умовах впливу потоків відмов, несправностей, збоїв.

Основна частина. У бездротових сенсорних мережах використовується алгоритм взаємної інформаційної узгодженості і його модифікації [4]. У поєднанні з алгоритмом парировання постійних несправностей з [5] дозволяє побудувати комбіновану процедуру діагностування майже усіх постійних (за винятком тих, що проявилися тільки в другому раунді міжсенсорного обміну) і частини прихованих несправностей. Поведінка сенсорного вузла при постійній відмові може бути довільною, але обов'язково однаковою по відношенню до всіх сенсорних вузлів з якими даний сенсорний вузол взаємодіє. У кожній з цих процедур передбачається, що для будь-якого сенсорного вузла (СВ) в бездротовій сенсорній мережі з безпосередніми зв'язками, що виконують ідентичні завдання, результат діагностувань можна представити одним числом. Сукупність результатів обчислень кожного завдання, сформовано за допомогою міжсенсорного обміну всіх сенсорних вузлів та утворює початковий набір діагностичної інформації, що дозволяє будь-якому сенсорному вузлу контролювати стан мережі. За відсутності несправностей значення всіх елементів погоджені, тобто або співпадають, або знаходяться в діапазоні допустимих відхилень. При прояві несправності значення одного або декількох елементів відрізняються від інших. Завдання полягає в тому, щоб всі справні СВ одночасно і однозначно визначили номер несправного.

Діагностичний процес, що виконується в бездротовій сенсорній мережі, періодично уривається в контрольних точках (КТ) для виконання процедури забезпечення функціональної стійкості. При використанні існуючих підходів процедура забезпечення функціональної стійкості повністю виконується в тих же самих КТ, в яких виявлено несправність. Нехай N – загальне число СВ в системі, t – число несправних. Діагностування постійних несправностей

тей робиться при $N \geq 2t + 1$ тривіальним чином. При формуванні початкової діагностичної інформації робиться один раунд обміну, в кожному справному СВ формується вектор з N елементів. В ньому місця розташування несправних елементів співпадають з номерами несправних сенсорних вузлів.

Діагностування усіх форм прояву прихованих несправностей здійснимо тільки при $N \geq 3t + 1$ і є нетривіальним завданням [6]. Під формою прояву несправності (ФПН) в роботі розуміється характер місця розташування несправного сенсорного вузла в початковому наборі діагностичної інформації, утворених в одній і тій же КТ усіма справними СВ. Це викликано тим, що початковий набір діагностичної інформації має набагато складнішу структуру, зокрема багатовимірну і розріджену, місця розташування несправних сенсорних вузлів щодо різних справних СВ не співпадають і неоднозначно пов'язані з номерами несправних СВ. Метод діагностування ґрунтується на тому, що в одній і тій же КТ все можливі форми прояву несправностей (ФПН) за допомогою алгоритму взаємної інформаційної узгодженості перетворюються до однієї і тієї ж форми, встановленої для постійних несправностей. При цьому перетворенні значення кожного елементу вектору утворюється за допомогою мажоритарного вибору по більшості співпадаючих значень в групах елементів початкового набору діагностичної інформації, так що ті ФПН, для яких число несправних сенсорних вузлів менше половини від загального числа елементів в групі, маскуються, тобто можуть накопичуватися і викликати відмову мережі. Пропонована методика полягає в тому, щоб для будь-якої ФПН сформулювати в кожному справному СВ множину допустимих результатів діагностування (можливо, в деяких СВ – неоднозначних), після чого в декількох КТ за допомогою перетворень над початковим набором діагностичної інформації і неспівпадаючими результатами діагностування усунути неоднозначність визначення номера несправного СВ. Процедура діагностування, що реалізує цю методику, є багатоступовою, причому для різних ФПН завершується на різних етапах. Стверджується, що незважаючи на довільний характер даних, що приймаються від несправного СВ в кожному раунді міжсенсорного обміну, множина несправних вузлів в початковому наборі діагностичної інформації, яка сформована справними СВ, розташована закономірно, що і дозволяє розробити правила діагностування.

При розробці методики діагностування несправностей були прийняті допущення про характер прояву несправності, що принципово відрізняються від використаних при класичній постановці завдання взаємної інформаційної узгодженості.

1. Кожний сенсорний вузол системи може незалежно від інших визначити місце розташування усіх несправних сенсорних вузлів у власному початковому наборі діагностичної інформації за ознакою неспівпадиння з більшістю значень.

2. Передбачається, що прояв несправності в різних критичних точках під час виконання процедури діагностування має стійкий характер. У кожній критичній точці формується новий набір діагностичної інформації, при цьому число і місце розташування в ньому несправних сенсорних вузлів може змінюватися довільним чином.

Формування початкового набору. Закономірності розташування неузгоджених сенсорних вузлів в початковому

наборі. Методика діагностування ґрунтується на припущенні про те, що для будь-якої ФПН існують закономірності розташування несправних сенсорних вузлів в початковому наборі діагностичної інформації (ПНДІ). Внаслідок неспівпадаючого характеру форм прояву однієї і тієї ж прихованої несправності в ПНДІ різних СВ ці закономірності повинні існувати на рівнях СВ і бездротової сенсорної мережі в цілому. Сформулюємо гіпотези про характер місць розташування несправних СВ в ПНДІ, на основі яких буде розроблена процедура діагностування.

Структуру ПНДІ формуватимемо так, щоб розташування кожного СВ (елементу) в нім можна було зв'язати з маршрутом обміну даними. Під маршрутом розуміється послідовність номерів СВ, через які передаються результати обчислень одного і того ж СВ при багатораундовому обміні. Довжина маршруту дорівнює числу раундів. У будь-якому маршруті не повинен повторюватися жоден номер СВ, оскільки інакше можливе злиття декількох проявів однієї і тієї ж несправності в одному і тому ж елементі ПНДІ.

Нехай в системі, що складається з $N \geq 3t + 1$ СВ, здійснюється парировання не більше ніж t прихованих відмов. Структуру ПНДІ можна представити в вигляді R -мірного куба, де $R = t + 1$ – число раундів його формування. Елементи ПНДІ позначатимемо як $A(i_1, i_2, \dots, i_R)$, де $i_r = 1 \dots N$ – номер СВ; $r = 1 \dots R$ – номер раунду. Маршрут обміну починається в i -му СВ, який в першому раунді передає значення власного результату діагностування в i_2 -й СВ, другий i_2 -й передає його в i_3 -й і так далі. У R -му раунді цей результат передається від iR -й в n -й СВ. Множина усіх маршрутів обміну, що проходять в одному і тому ж раунді і через один і той ж СВ, утворює гіперплощину в R -мірній структурі ПНДІ. Наприклад, при $R = 2$ A_n є матрицею. Гіперплощині, передачі даних, що містять результати, від одному і тому ж СВ в першому раунді, відповідають рядкам, в другому – стовпцям матриці.

Нехай несправність проявилася в f -му СВ під час виконання тільки одного r -го раунду обміну. Припускаємо, що усі несправні СВ, породжені проявом несправності в цьому випадку, у будь-якій A_n мають бути розташовані в одній і тій же гіперплощині:

$$H_n(r, f) = \{A_n(i_1, \dots, i_R) \mid i_R = f\}.$$

Множину усіх гіперплощин в A_n позначимо через H , число їх рівне $R \times N$. Місце розташування несправного СВ в ПНДІ для будь-якої несправності є набором взаємно ортогональних гіперплощин $H_n(r, f)$, що перетинаються в f -й позиції на головній діагоналі A_n , яка розуміється як N -мірний вектор, утворений елементами $\{A_n(i_1, \dots, i_R) \mid (\forall r = 1 \dots R): i_r = i\}$, де $i = 1 \dots N$. Якщо по розташуванню несправного сенсора в A_n однозначно визначається точка перетину $H_n(r, f)$ на головній діагоналі, то n -й СВ однозначно визначає несправність, інакше результат діагностування є неоднозначним (складається з R різних номерів СВ, один з яких відповідає несправному). Результат неоднозначного діагностування

називатимемо інтерпретованим, якщо кожному номеру поставлена у відповідність єдина гіперплощина, в якій розташований несправний елемент. Інакше результат неоднозначного діагностування називатимемо неінтерпретованим. Інтерпретований результат формується тільки у тому випадку, якщо ПНДІ містить єдиний несправний сенсор. Якщо ж початковий набір діагностичної інформації містить декілька несправних сенсорних вузлів, розташованих симетричним чином відносно головної діагоналі A_n , то кожен номер сенсора в неоднозначному результаті діагностування пов'язаний не з однією гіперплощиною, а з їх набором.

З інтерпретацією розташування несправних сенсорів також пов'язано припущення про закономірний характер ФПН і на рівні системи. Залежно від того, в якій гіперплощині розташовані несправний сенсор (у якому раунді g проявилася несправність), результат її діагностування може бути ідентичним або неідентичним для усіх СВ. Множина H складається з двох підмножин: H_1 , в яких ФПН є ідентичними, і H_2 , в яких вони не ідентичні. Визначення однозначного результату в n -му СВ не є достатньою умовою для завершення процедури діагностування. Якщо однозначний результат утворений за допомогою $H_n(r, f)$ (H_1 , то він є ідентичним для усіх СВ системи, процедура діагностування завершується, інакше необхідно виконати перетворення. Їх слід розділити на дві групи:

1) виконуваних над ПНДІ, штучно переводячими несправні СВ з гіперплощин H_2 в H_1 за допомогою СВ, що однозначно визначили несправний сенсорний вузол;

2) виконуваних над допоміжними наборами (ДН), кожен з яких утворений з однаковим чином інтерпретованих результатів неоднозначного діагностування однієї і тієї ж несправності усіма СВ бездротової сенсорної мережі. Дані, що передаються у ДН, мають бути погоджені за допомогою алгоритму взаємної інформаційної узгодженості, щоб маскувати результати, що розузгодили, діагностування, що передаються в різні справні СВ від однієї і тієї ж несправності.

Число ДН свідомо більше, ніж число неоднозначних результатів діагностування, внаслідок того, що не усі ФПН є інтерпретованими. Перетворення ДН полягає у визначенні номера несправного СВ за допомогою мажоритарної процедури. Для $H_n(r, f)$ (H_1 поріг виконання цієї процедури рівний $N-1$, для $H_n(r, f)$ (H_2 він повинен мати менші значення, залежні від g). Результат діагностування, отриманий за допомогою процедури мажоритарного вибору, також може бути неоднозначним, навіть якщо перевищений поріг її виконання.

У випадку, якщо по різних ДН одночасно перевищений поріг мажоритарного вибору і при цьому отримані неспівпадаючі результати діагностування, а також якщо ні по одному набору не був досягнутий пороговий рівень, з неспівпадаючих результатів вимагається сформувати список номерів підозрюваних СВ. Потім шляхом почергового відключення наступного СВ в системі і відновлення попередньою вимагається знайти той, блокування якого приведе до припинення прояву несправності. При виконанні цього фрагмента процедури істотним є допущення про те, що прояв прихованої відмови в кожній КТ

має стійкий характер.

Розрізнятимемо три групи ФПН:

Λ_1 – що діагностуються однозначно усіма СВ без використання перетворень, за рахунок $H_n(r, f) \in H_1$;

Λ_2 – вимагає виконання перетворень ПНДІ, несправних СВ, що переходять з $H_n(r, f) \in H_2$ в $H_n(r, f) \in H_1$;

Λ_3 – що діагностується шляхом виконання перетворення допоміжного набору (ДН).

У цьому підході для завершення діагностування вимагається виконати, залежно від групи, до якої належить ФПН, одну або декілька КТ. Впродовж цього інтервалу часу кожний СВ для продовження діагностичного процесу використовує погоджені значення результатів діагностування, а для визначення групи ФПН виконує перетворення ПНДІ або ДН. Нехай g означає номер КТ, в якій розпочато виконання цих перетворень.

Результати та їх обговорення. Отже, методика діагностування несправностей має ітераційний характер і в n -му сенсорному вузлі складається з наступних кроків.

Крок 1. Формування ПНДІ. Якщо в A_n був потрапив хоч б один несправний СВ, то присвоїти двійковій змінній δ_n – ознаці виявлення несправності – одиницю, інакше – нуль.

Крок 2. Виконання алгоритму взаємної інформаційної узгодженості по набору $\Delta = \{\delta_n\}$ для мережі. Якщо цей набір містить тільки нульові значення – вихід з процедури з нульовим значенням лічильника КТ (відсутність прояву несправності), інакше – додати одиницю до значення лічильника. Лічильник КТ використовується для контролю тривалості перетворення ПНДІ, що переводить ФПН з групи Λ_2 в Λ_1 . При ініціалізації процедури (лічильник має одиничне значення) перейти до п. 3, інакше виконати цей перехід після перетворення початкового набору діагностичної інформації.

Крок 3. Діагностування несправності на рівні сенсорних вузлів (визначення $F = \{f_1, \dots, f_l\}$). Якщо ФПН належить групі Λ_1 , процедура завершена.

Крок 4. Якщо значення лічильника КТ перевищило максимальне (достатнє для переходу ФПН з групи Λ_2 в Λ_1), перейти до п.5 (ФПН інтерпретується як що належить групі Λ_3), інакше продовжити перетворення ПНДІ в $(g+1)$ -ій КТ.

Крок 5. Формування ДН і виконання діагностування на рівні мережі за допомогою процедури мажоритарного вибору. Якщо перевищений поріг успішного діагностування тільки по одному ДН, завершення процедури, інакше формування списку $F' = \{f_1, \dots, f_R\}$ з R номерів СВ, що відповідають неоднозначним результатам діагностування, переданим у ДН.

Крок 6. Почергове відключення СВ відповідно до списку до тих пір, поки не буде перервано прояв несправності.

Доведемо коректність припущень про закономірність розташування несправних сенсорних вузлів в початковому наборі діагностичної інформації на прикладі діагностування поодинокі постійної або прихованої несправності

сті. При цьому буде розглянуто множини усіх можливих ФПН, розділених на групи, для кожної з яких буде визначений алгоритм діагностування і достатнє число КТ для завершення процедури діагностування по кожному алгоритму.

Сформулюємо правила формування структури ПНДІ для виконання процедури діагностування поодинокі несправності. Під поодиноким розуміється такий характер прояву несправності, коли в інтервалі часу виконання процедури діагностування ймовірність виникнення другої несправності достатньо мала. Нехай n – поточний номер справного СВ, який формує ПНДІ ($n=1...N$). Номери СВ, з якими взаємодіє n -й СВ при виконанні кожного раунду обміну, позначимо як j -й ($j=1...N, j \neq n$).

Номери СВ, що передали результати, в першому раунді в j -й, які в другому раунді будуть передані від j -х в n -у, позначимо через i -е ($i=1...N, i \neq j, i \neq n$). Оскільки число несправностей $t=1$ і відповідно число раундів $R=t+1=2$, то ПНДІ, що формується в n -му СВ, має вигляд такої матриці A_n :

$$A_n = \begin{bmatrix} a_{11}^n & a_{12}^n & a_{13}^n & \dots & - & \dots & a_{1N}^n \\ a_{21}^n & a_{22}^n & a_{23}^n & \dots & - & \dots & a_{2N}^n \\ a_{31}^n & a_{32}^n & a_{33}^n & \dots & - & \dots & a_{3N}^n \\ - & - & - & \dots & a_{nn}^n & \dots & - \\ a_{N1}^n & a_{N2}^n & a_{N3}^n & \dots & - & \dots & a_{NN}^n \end{bmatrix}.$$

У цій матриці:

– на головній діагоналі розташовані елементи a_{ij}^n , що є результатами обчислень j -х СВ, прийнятих n -м в пер-

шому раунді;

– у n -му рядку і n -му стовпці знаходиться тільки один елемент a , що відповідає власним результатам діагностування;

– у i -му рядку містяться результати діагностування одного і того ж i -го СВ, прийняті від усіх j -х;

– у j -му стовпці поза головною діагоналлю містяться результати обчислень усіх i -х СВ, прийняті від одного і того ж j -го в другому раунді.

Елементи матриць, сформовані в n -му і j -му справному СВ, пов'язані наступним співвідношенням:

$$a_{ij}^n = a_{ji}^n (i, j, n = 1...N ; j \neq n, i \neq j, i \neq n), a_{ij}^n = a_{ij}^j.$$

При формуванні справними СВ своїх ПНДІ в них проявляються наступні закономірності:

1) у кожній A несправні СВ можуть знаходитися або в f -му рядку, або в f -му стовпці;

2) зміст f -го рядка є стійким для усіх A_n в тому сенсі, що вона складається з одних і тих же чисел, хоча і розташованих по-різному;

3) зміст f -го стовпця є нестійким – для різних A може бути заповнений довільним чином.

Висновки. В роботі побудова методики для діагностування несправностей в сенсорних вузлах бездротових сенсорних мережах підприємств. Дана методика дозволить бездротовим сенсорним мережам підприємств зберігати упродовж заданого часу виконання своїх основних функцій в межах, встановлених нормативними вимогами, в умовах впливу потоків відмов, несправностей, збоїв.

REFERENCES

1. R. Shorey, A. Ananda, Mun Choon Chan, Wei Tsang Ooi. *Mobile, wireless, and sensor networks: technology, applications, and future directions*, USA: A John Wiley & Sons, Inc. – 2011. – 430 p.
2. V.A. Mashkov, O.V. Barabash *Self-checking and Self-diagnosis of Module Systems on the Principle of Walking Diagnostic Kernel Engineering Simulation*. – Amsterdam: OPA, 1998. Vol. 15. pp. 43-51.
3. V. Mashkov, J. Barilla, P. Simr Applying Petri Nets to Modeling of Many-Core Processor Self-Testing when Tests are Performed Randomly. *Journal of Electronic Testing Theory and Applications (JETTA)*, 2013, Volume 29, Issue 1, pp 25–34.
4. O.V. Barabash, D.M. Obidin, A.P. Musienko Knowledge base model of intellectual control system of high-speed moving objects based on its verification, *Information processing systems, № 5(121), Kharkiv, 2014, pp. 3 – 6.*
5. N. Pashynska, V. Snytyuk, V. Putrenko, A. Musienko A decision tree in a classification of fire hazard factors, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – Kharkov, 2016. – № 5/10(83). – pp. 32–37.
6. O. Barabash, G. Shevchenko, N. Dakhno, O. Neshcheret, A. Musienko *Information Technology of Targeting: Optimization of Decision Making Process in a Competitive Environment* International Journal of Intelligent Systems and Applications. – Vol. 9. – № 12. – Hong Kong: MECS Publisher, 2017. – P. 1 – 9.

Methods for diagnosing hidden and persistent failures in enterprise wireless sensor networks

O. V. Barabash, V. V. Sobchuk, A. P. Musienko, I. O. Lyashenko

Abstract. The paper deals with one of the main properties of complex technical systems - functional stability. Construction of a technique for diagnostics of malfunctions in sensor nodes of wireless sensor networks of enterprises. This technique will allow the wireless sensor networks of enterprises to store their main functions for a specified period of time within the limits set by regulatory requirements, in the conditions of influence of flows of failures, faults, failures.

Keywords: functional stability, wireless sensor networks.