

Л.М. САКОВИЧ

Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна, e-mail: *lev@sakovich.com.ua*.

С.О. ГНАТЮК

Національний авіаційний університет, Київ, Україна, e-mail: *sgnatuk30@gmail.com*.

С.М. СЕМЕХА

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна, e-mail: *serhio174@ukr.net*.

Д.О. ВОЛОШЕНЮК

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України, Київ, Україна, e-mail: *p-h-o-e-n-i-x@ukr.net*.

І.В. ПОПОВ

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України, Київ, Україна, e-mail: *popigor7@gmail.com*.

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ РОЗРОБЛЕННЯ ДІАГНОСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Анотація. Проведено аналіз сучасних досягнень в галузі технічної діагностики і метрології, встановлено їхню можливість для підвищення якості діагностичного забезпечення перспективних та наявних радіоелектронних засобів. Запропоновано загальний алгоритм розроблення діагностичного забезпечення радіоелектронних засобів з врахуванням особливостей їхньої будови, умов ремонту, метрологічного забезпечення для мінімізації середнього часу відновлення.

Ключові слова: радіоелектронні засоби, технічне діагностування, діагностичне і метрологічне забезпечення.

ВСТУП

Сталий розвиток сучасного світу неможливий без використання радіоелектронних засобів (РЕЗ), які застосовують у багатьох сферах діяльності. Задачі, які розв'язують РЕЗ, постійно ускладнюються, а їхня елементна база і схемна структура увесь час удосконалюються в напрямку автоматизації виконання технологічних операцій. Це призводить до збільшення кількості елементів у виробі, що не сприяє підвищенню показників надійності і не задовольняє вимог щодо їхнього значення. Тому питання відновлення працездатності у разі відмов РЕЗ достатньо актуальні, оскільки час технічного діагностування складає приблизно 80 % часу ремонту.

Автори статті, керуючись власним досвідом, для загального скорочення середнього часу відновлення об'єкта пропонують фокусувати увагу на найбільш вагомій частині процесу — технічному діагностуванні. Методом зменшення часу технічного діагностування має слугувати розроблення якісного діагностичного забезпечення (ДЗ) ремонту із врахуванням особливостей конкретного об'єкта діагностування (ОД), а також умов відновлення працездатності.

У статті розглянуто особливості ОД, які дають змогу підвищити якість ДЗ, а також з мінімальними витратами забезпечити потрібну якість відновлення працездатності ОД. Також побудовано загальний алгоритм створення ДЗ сучасних РЕЗ з урахуванням відомих окремих результатів, опублікованих в багатьох джерелах, де використано деякі особливості ОД для розроблення їхнього ДЗ, але загального підходу не окреслено. Тому важливо сформулювати загальний підхід до розроблення ДЗ, використовуючи особливості ОД для підвищення

якості їхнього ДЗ. Це дає змогу з мінімальними витратами забезпечити потрібне якісне відновлення працездатності ОД. Запропоновані рекомендації доцільно використовувати для удосконалення наявного ДЗ і його розроблення для перспективних РЕЗ.

1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасні дослідження в галузі технічної діагностики і метрології орієнтовані на підвищення достовірності оцінки технічного стану РЕЗ, скорочення середнього часу відновлення, мінімального відхилення діагнозу від істинного у разі хибних висновків фахівця щодо результату перевірки. Цього досягають без додаткових витрат на створення ДЗ, а тільки враховують особливості будови РЕЗ та впровадження в розроблення ДЗ сучасних досягнень технічної діагностики.

У роботі [1] показано, що на сьогодні не повною мірою для розроблення ДЗ використовують надлишковість РЕЗ. З урахуванням цього факту в [2] розглянуто всі можливі види надлишковості і запропоновано їхнє використання для розроблення ДЗ. У роботах [3–7] для підвищення комплексного показника надійності — коефіцієнта готовності — основну увагу приділяють не скороченню часу відновлення, а збільшенню значення показника напрацювання на відмову. Цей підхід доцільно використовувати для РЕЗ загального призначення, але не для техніки силових структур, яка може під час експлуатації отримувати аварійні або бойові пошкодження.

Залежно від типу РЕЗ (аналогові або дискретні) під час відновлення працездатності застосовують функціональне [8, 9] або тестове [10–12] діагностування з використанням відповідних моделей ОД. При цьому сучасні РЕЗ — це програмно-керовані об'єкти, що також впливає на процес діагностування: він може бути непрацездатним як у разі відмови апаратурної частини, так і за наявності помилок програмного забезпечення [13, 14].

У [15, 16] окремо розглянуто особливості розроблення ДЗ об'єктів РЕЗ із аварійними або бойовими пошкодженнями за наявності кратних дефектів, а у роботах [17, 18] — багато вихідних ОД, до яких належать підсистеми електроживлення РЕЗ.

Відновлення РЕЗ великої розмірності з рознесеними в просторі елементами виконують бригади фахівців. При цьому використовують груповий пошук дефектів, що суттєво скорочує середній час відновлення працездатності.

Останнім часом розробники ДЗ сучасних РЕЗ особливу увагу приділяють якості метрологічного забезпечення і врахуванню можливої помилки фахівця під час оцінювання результату перевірки у важких польових умовах та стресовій ситуації [9]. При цьому суттєво, щоб у випадку реалізації ремонту РЕЗ агрегатним методом навіть у разі помилкової оцінки результату виконання перевірки несправний елемент містився в середині конструктивної частини виробу, яка підлягає заміні.

Під час усунення кратних дефектів унаслідок аварійних або бойових пошкоджень РЕЗ виникає задача раціонального розподілу зусиль між етапами дефектації з метою визначення ступеня пошкодження і діагностування.

У багатьох публікаціях автори досліджували окремі питання розроблення ДЗ сучасних РЕЗ, не завжди враховуючи отримані раніше результати. Отже, нагальною є проблема об'єднання і комплексного використання відомих результатів, що суттєво підвищить ефективність ДЗ наявних і перспективних РЕЗ різного призначення.

Мета цієї статті — розроблення загального алгоритму створення ДЗ сучасних РЕЗ з врахуванням відомих окремих результатів, удосконалення цього процесу для досягнення максимального ефекту скорочення середнього часу відновлення за будь-якого ступеня пошкодження об'єкта і залежно від його розмірності під час роботи одного або бригади фахівців.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розвиток технологій потребує розроблення нових та систематизації вже наявних методологічних основ для підвищення ефективності технічної діагностики РЕЗ. Загалом у дослідженні було застосовано такі теоретичні та методологічні інструменти, як теорія аналізу, методи лінійної алгебри, математичної статистики, теорії алгоритмів, математичного моделювання та комп'ютерного експерименту, методи візуалізації інформації, методи інженерії програмного забезпечення, методи ймовірнісного оцінювання ризиків, методи системного аналізу, теорія інтелектуального керування, а також методи і алгоритми власного розроблення.

Методологічну основу для загального підходу до розроблення ДЗ становить використання надлишковості РЕЗ, порівняльний аналіз варіантів підвищення достовірності діагностування РЕЗ, використання класифікації моделей ОД.

Для побудови загального алгоритму розроблення діагностичного забезпечення радіоелектронних засобів використано окремі теоретичні та методологічні інструменти, методи інженерії програмного забезпечення, методи оброблення та аналізу даних тощо.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ДІАГНОСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Поставлену задачу розв'язуємо поетапно.

1. Отримання і аналіз вихідних даних. Нехай $T_{ВП}$ — максимально допустимий час відновлення РЕЗ; S — ступінь пошкодження (визначається під час дефектації); μ — кількість фахівців; t — середній час виконання перевірки; t_y — середній час усунення несправностей.

Відомості про метрологічне забезпечення: n — кількість засобів виміральної техніки (ЗВТ), які використовуються для ремонту РЕЗ; ρ_i — ймовірність правильної оцінки результату виконання перевірки ЗВТ різного типу, які позначимо числами $i=1, n$; $P_i(\tau)$ — ймовірність відсутності метрологічних відмов ЗВТ типу $i=1, n$ за період між плановими перевірками τ .

2. Формування цільової функції і показника якості системи ремонту. До цільової функції висувають такі вимоги: однозначність (наявність екстремуму), відповідність реальному процесу, запис через параметри керування, розроблення до показника якості системи і відсутність розривів. Частину аргументів записують у вигляді обмежень (ймовірність розв'язання задачі за визначений час, вартість, показники надійності).

Для системи ремонту РЕЗ цільова функція полягає у мінімізації розрахункового часу відновлення $T_{ВР}, T_{ВР} \leq T_{ВП}, T_{ВР}(X) = \min T_{ВР}(X^*), X^* \in \Delta$, де X — параметри системи ремонту; X^* — їхні значення під час розв'язання задачі, Δ — область допустимих значень зміни параметрів.

Параметри системи поділяють на керовані (наприклад, алгоритми діагностування) і некеровані, які неможливо змінити (наприклад, кількість фахівців з ремонту і їхню кваліфікацію). Якщо основних параметрів декілька (наприклад, час та вартість) і цільова функція є системою рівнянь або нерівностей, то у цьому разі доцільно знаходити не оптимальне за кожним критерієм, а ком-

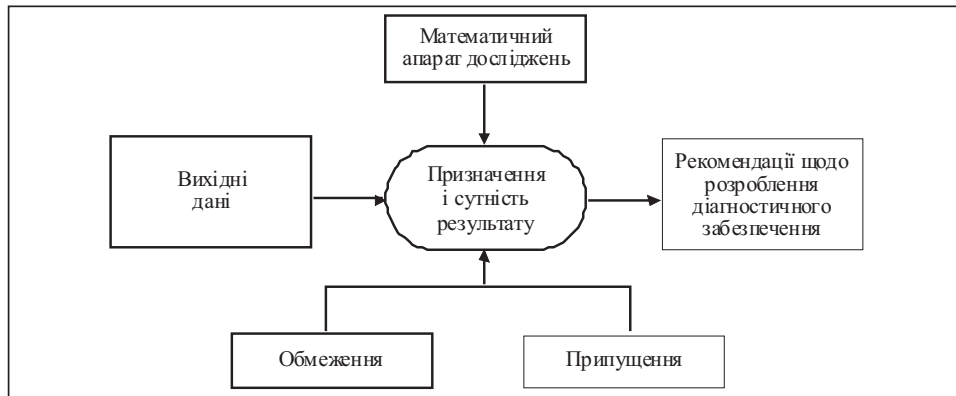


Рис. 1. Структура процесу розроблення діагностичного забезпечення сучасних радіоелектронних засобів

промісний раціональний розв’язок в сенсі Парето. У простому випадку це двовимірний модель, але може бути і більше оцінюваних показників (наприклад, час, вартість, надійність).

Математична формалізація задачі у вигляді цільової функції дає змогу кількісно оцінити ефект від її розв’язання у вигляді показника ефективності. Зазвичай він вимірюється не в абсолютних, а у відносних одиницях (відсотках). У такому разі для системи ремонту РЕЗ показник ефективності характеризує відносне зменшення середнього часу відновлення в модернізованій системі ремонту щодо наявної або допустимого значення:

$$\eta = \frac{T_{ВП} - T_{ВР}}{T_{ВП}} \cdot 100\%,$$

$$0 \leq \frac{T_{ВП} - T_{ВР}}{T_{ВП}} \leq 1.$$

Далі обґрунтовано адекватний математичний апарат і розроблено структуру розв’язання задачі з отримання цільової функції у явному вигляді, враховуючи особливості ОД, початкові дані, обмеження і припущення про функціонування ремонтного органу (рис. 1).

3. Аналіз ОД і обґрунтування вибору його моделі. Залежно від схемної та конструктивної будови радіоелектронні засоби мають окремі види надлишковості чи їхні сукупності [1, 2], що дає змогу підвищити достовірність визначення технічного стану (рис. 2).

Варіанти підвищення достовірності діагностування РЕЗ з використанням їхньої надлишковості наведено в табл. 1, а приклади використання цих видів надлишковості — на рис. 3 (N — загальна кількість елементів ОД, K — середня кількість перевірок, R — режим роботи).

Модель об’єкта діагностування — це уявна або матеріалізована система, яка дає змогу замінювати об’єкти дослідження у сенсі визначеної подібності, що є засобом отримання нової інформації про оригінал. Модель та оригінал повинні бути ізоморфними, тобто існує взаємооднозначна відповідність елементів та відношень (зв’язків) між елементами оригіналу та моделі.

Модель має такі властивості:

- рефлексивність — будь-яка система — це своя власна модель;
- симетричність — будь-яка система — це модель для кожної своєї моделі;
- транзитивність — модель моделі — це модель вихідної системи.

Загальною властивістю будь-яких моделей є їхня спроможність відображати для цілей дослідження наявні риси та характеристики оригіналів.



Рис. 2. Види надлишковості РЕЗ для підвищення достовірності результатів їхнього діагностування

Таблиця 1. Порівняльний аналіз варіантів підвищення достовірності діагностування РЕЗ з використанням їхньої надлишковості

Вид надлишковості	Переваги	Недоліки
Конструктивна	Реалізація ремонту агрегатним методом. Використання процедур пробних заміщень. Зменшення часу діагностування	Застосування тільки для об'єктів модульної конструкції. Збільшення обсягу і вартості ЗІП
Часова	Спрощена реалізація. Відсутність матеріальних витрат	Збільшення часу діагностування
Структурна	Зменшення кількості внутрішніх перевірок. Розрізнення незалежних кратних дефектів. Застосування неоднорідних алгоритмів пошуку	Застосування тільки для об'єктів з дивергуючими структурами. Можливість помилкових діагнозів за наявності кратних дефектів
Функціональна	Використання методу переключень. Скорочення простору пошуку. Граф-схемне зображення алгоритмів пошуку	Застосування тільки для багаторежимних і багатфункціональних об'єктів
Інформаційна	Можливість виявлення і усунення несправностей частини датчиків. Локалізація кратних дефектів. Зменшення часу діагностування, застосування неоднорідних алгоритмів і групового пошуку дефектів	Ускладнення апаратної реалізації засобів діагностування. Необхідність додаткової підготовки фахівців і використання дорогих ЗВТ

Властивості моделі, які сформулював К. Шенон:

актуальність — орієнтовність на розв'язання важливих задач;

результативність — можливість реалізації результатів моделювання;

достовірність — результати моделювання не викликають будь-яких сумнівів;

економічність — витрати на створення та дослідження моделі нижчі за економічний ефект від моделювання.

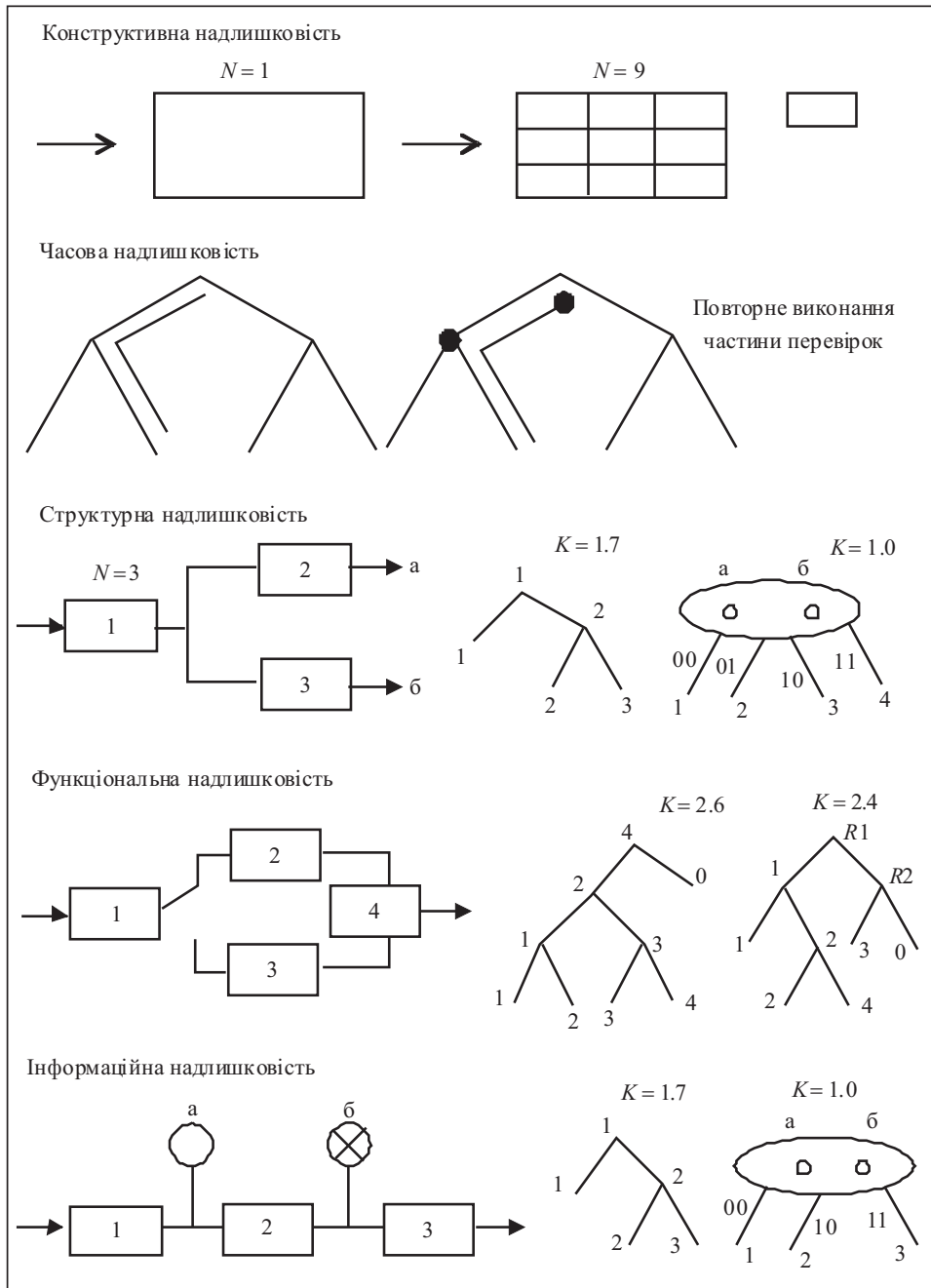


Рис. 3. Схемні та графічні відображення надлишковості РЕЗ під час їхнього діагностування

Об'єкт діагностування — це виріб або його складові частини, технічний стан яких підлягає визначенню. За характером перетворення енергії та інформації об'єкти діагностування поділяють на неперервні (аналогові) і дискретні (цифрові). Формальний опис ОД, що враховує можливість зміни його стану в часі, називають діагностичною моделлю, яка має властивості виявлення і розрізнення дефектів. РЕЗ як об'єкти діагностування і моделювання мають функціональну різноманітність, ієрархічну конструкцію і відрізняються складністю виконуваних завдань, високою автономністю і вартістю наслідків відмов, що дає змогу зарахувати їх до категорії складних технічних систем, які описують такі основні групи діагностичних моделей:

- неперервні моделі, які описують об'єкт і процеси, що в ньому відбуваються в неперервно змінюваному часі;
- дискретні моделі, які визначають стан ОД для дискретних значень часу;
- гібридні моделі, які визначають реальні моделі, що описують функціонування пристроїв неперервної дії та дискретних пристроїв;
- спеціальні моделі, які враховують особливості діагностичного забезпечення і функціонування об'єкта.

За видами взаємозв'язків між станами ОД, його елементами і параметрами вихідних сигналів методи синтезу моделей поділяють на аналітичні, графоаналітичні, функціонально-логічні та інформаційні.

Узагальнену класифікацію моделей ОД наведено на рис. 4.

Словесні або описові моделі є найпростішими, але достатньо застосовними не тільки в технічній, але й в медичній діагностиці. До них належать симптоми стану ОД як описові моделі та таблиці типових несправностей. Подібні моделі використовують для підготовки ремонтного персоналу під час ремонту складної побутової радіоелектронної апаратури спеціалістами низької кваліфікації.

Графічні моделі мають наочність, відображають логіку взаємодії елементів об'єкта, а також передавання енергії та інформації. Їх використовують для розроблення алгоритмів діагностування, які розрізняють дефекти типу обрив і перевантаження. Такі моделі мають обмеження: елементи можуть містити будь-яку кількість входів, але тільки один вихід.

Матричні моделі зручні для оброблення за допомогою ЕОМ, при цьому користувач може і не мати високої кваліфікації для визначення вихідних даних. На їхній базі можливий синтез як умовних, так і безумовних алгоритмів діагностування. Ці моделі мають обмеження на ступінь пошкодження об'єкта: за наявності кратних дефектів можливе визначення хибного діагнозу. Вони можуть мати вигляд таблиці дефектів, матриці станів, таблиці функцій несправностей (ТФН) або мінімізованої ТФН (МТФН). Матричні моделі часто застосовують для розроблення засобів технічного діагностування (ЗТД).

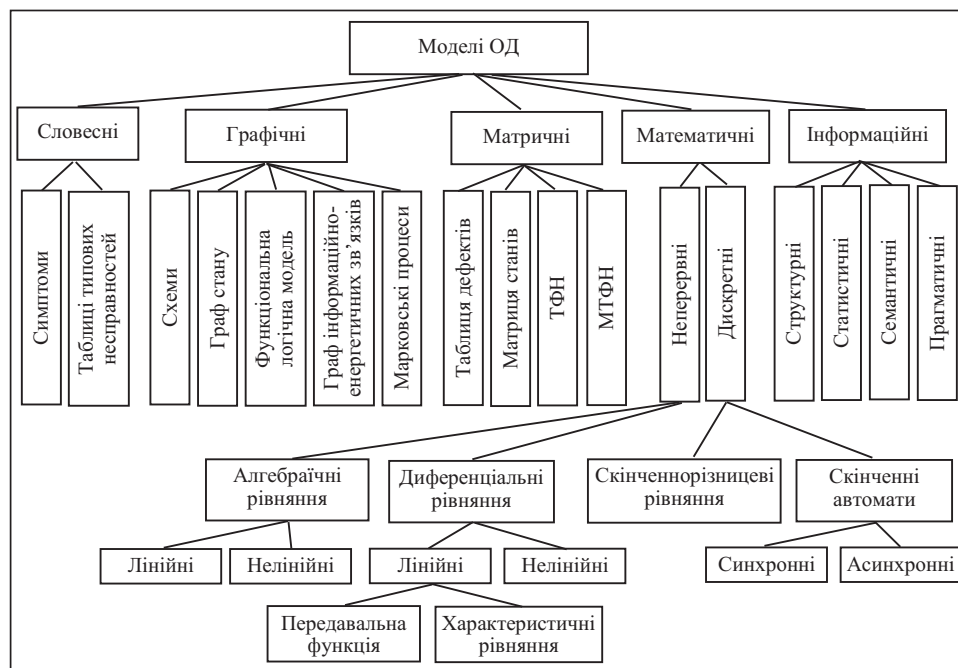


Рис. 4. Узагальнена класифікація моделей ОД

Математичні та інформаційні моделі використовують зазвичай для проектування засобів і систем технічного проектування (СТП) складних об'єктів на базі ЕОМ. Так, наприклад, застосовуючи моделі у вигляді диз'юнктивно-нормальної форми (ДНФ) або мінімальної ДНФ на мові алгебри логіки для синтезу ЗТД, обмежень на кратність дефектів в об'єкті і на кількість виходів його елементів не враховують.

Аналіз моделей ОД свідчить про їхній взаємозв'язок і можливість перетворення з одного типу в інший залежно від виконуваних завдань (розроблення алгоритмів або засобів діагностування) та кваліфікації користувача.

Залежно від використання процедур діагностування, які дають змогу визначити послідовність та зміст дій оператора, розрізняють тестове і функціональне діагностування. Процедури зовнішнього огляду, проміжних вимірювань і пробних заміщень є універсальними. Виконуючи тестове діагностування, використовують аналіз деформації сигналу, послідовну або комбінаторну процедури. Для функціонального діагностування об'єктів з кратними дефектами застосовують специфічні скорочені процедури пошуку.

Як діагностичні моделі РЕЗ найчастіше використовують граф інформаційно-енергетичних зв'язків (ГІЕЗ) [2, 8, 9]. ГІЕЗ — це сукупність вершин, кількість яких дорівнює кількості елементів на визначеній глибині пошуку (діагностування) і дуг, що з'єднують ці вершини, які визначають шлях до джерела відмови типу обрив і перевантаження.

ГІЕЗ, вершини якого позначають елементи — джерела відмов, а дуги — зв'язки між ними, є діагностичною моделлю апаратури зв'язку. Для його побудови задають такі умови:

- елемент справний, якщо за номінальних значень всіх вхідних сигналів вихідний сигнал також є в допустимих межах;
- усі зовнішні впливи завжди справні;
- кожен елемент має будь-яку кількість входів і тільки один вихід;
- напрямки передавання енергії та інформаційних сигналів визначають логічні зв'язки між елементами;
- зв'язки між елементами вважають безвідмовними і мають орієнтовний характер;
- напрямки інформаційно-енергетичних зв'язків між елементами як джерела обривів збігаються з напрямками передавання сигналів і напруг електроживлення в справній системі;
- напрямки енергетичних зв'язків між джерелами перевантажень протилежні напрямку подачі напруг електроживлення і закінчуються на елементах, критичних до перевантаження, є звичайними пристроями захисту.

Елементи апаратури, які є первинними джерелами інформаційних сигналів і енергії або отримують енергію (сигнали) від зовнішніх джерел, зображають вершинами ГІЕЗ, що є вихідними для апаратури. Якщо апаратура має один чи декілька елементів, що є вихідними для всієї апаратури, то відповідні їм вершини ГІЕЗ називають вихідними.

Для нумерації вершин ГІЕЗ вводять індекс попередження, який дорівнює кількості вершин, що передують заданій на усіх шляхах графу плюс одиниця. Якщо індекси попередження декількох вершин однакові, то застосовують додаткову довільну індексацію елементів (рис. 5).

Якщо вершини ГІЕЗ крім послідовного з'єднання одна з одною мають безпосередні зв'язки через один, два або більшу кількість елементів, то такі зв'язки як несуттєві для діагностування (що не змінюють індексів попередження) вилучають з ГІЕЗ (рис. 6), їх називають транзитивними.

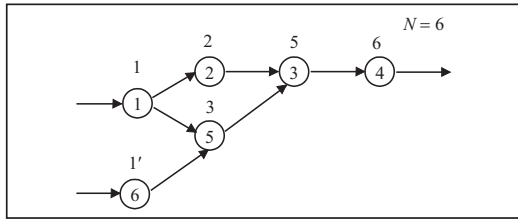


Рис. 5. Приклад нумерації індексів попередження ПЕЗ

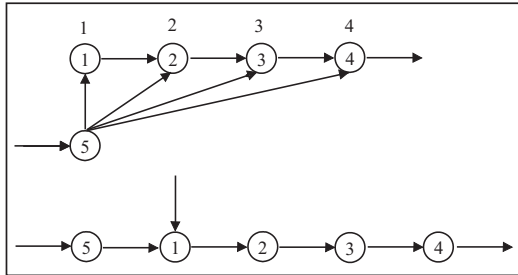


Рис. 6. Приклад усунення транзитивних замикань

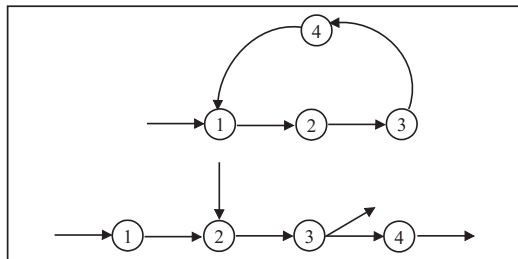


Рис. 7. Приклад розриву зворотних зв'язків

- розрив зворотних зв'язків;
- розрив транзитивних зв'язків;
- розрахунок індексів попередження елементів.

4. Моделі алгоритмів діагностування. У загальному випадку під алгоритмом розуміють математичну систему операції або скінченну послідовність правил і вказівок, після виконання якої отримують розв'язок поставленої задачі.

Визначимо емпіричні властивості алгоритмів: дискретність, направленість, детермінованість (відсутність безвихідних ситуацій) і масовість (придатність для розв'язання заданого класу задач). Для машино-орієнтованих алгоритмів обов'язковим є виконання додаткових вимог:

- збіжність (незалежно від отриманої додаткової інформації з деякого моменту часу алгоритм перестає покращуватись і перебудовуватися);
- ефективність (мінімізація деякої функції, що визначає частку хибних рішень);
- конструктивність (прийнятність щодо витрат машинного часу і оперативної пам'яті).

Розрізняють чисельні і логічні алгоритми, а також способи їхньої побудови: алгебраїчна (список послідовних приписів) або геометрична (у вигляді спрямованого графу, який задається множиною вершин і зв'язків) форма. У технічній діагностиці розрізняють безумовні та умовні алгоритми пошуку дефектів.

Елемент апаратури на будь-якому рівні декомпозиції (електро-радіоелемент (ЕРЕ), типовий елемент заміни (ТЕЗ)) може слугувати джерелом декількох несумісних відмов:

- у ланцюгах споживання енергії — джерелом обривів або перевантажень для кожного виду споживання енергії;

- за наявності в елементі декількох незалежних ланцюгів, проходження сигналів — джерелом обривів або погіршення властивостей для кожної з них.

У результаті обриву чи погіршення допустимих меж властивостей елемента апаратури наступні за ним елементи залишаються працездатними, але режим їхнього функціонування змінюється. Тому інформацію з місця обриву варто отримувати, перевіряючи стан елементів у напрямку проходження сигналів від входу до виходу.

Зворотні зв'язки розривають і створюють додаткові входи і виходи (рис. 7).

Загальні операції побудови ПЕЗ:

- об'єднання виходів багатовихідних елементів;

Безумовні алгоритми для встановлення діагнозу вимагають виконання повної сукупності приписів перевірок (в будь-якій послідовності), що є надлишковим, однак вони є зручними для оброблення результатів з використанням ЕОМ.

В умовних алгоритмах порядок виконання наступних перевірок залежить від результатів аналізу попередніх, тобто порядок виконання перевірок у кожному конкретному випадку заздалегідь не передбачений. Такі алгоритми відрізняються мінімально необхідною кількістю перевірок для встановлення діагнозу, наочністю для сприйняття оператором, практичністю виконання ремонту РЕЗ.

Класифікацію алгоритмів діагностування наведено на рис. 8. Залежно від модуля вибору елементарних перевірок алгоритми поділяють на бінарні та небінарні, які мають високу ефективність унаслідок більш певного використання інформації, отриманої в результаті перевірок. За формою подання безумовні алгоритми поділяють на спискові та матричні, які використовують для аналізу моделі об'єктів діагностування.

Якщо технічний стан визначають після виконання усіх елементарних перевірок, які формує алгоритм діагностування (АД), то його називають алгоритмом з безумовною зупинкою (позначають літерою «Б»).

Якщо результати елементарних перевірок аналізують декілька разів і технічний стан визначають у міру накопичення діагностичної інформації, то йдеться про алгоритм з умовною зупинкою (У).

Тоді всі алгоритми технічного діагностування можна класифікувати як один з таких трьох видів (див. рис. 8):

- АД безумовні з безумовною зупинкою (ББЗ);
- АД безумовні з умовною зупинкою (БУЗ);
- АД умовні з умовною зупинкою (УУЗ).

Умовні алгоритми діагностування за формою подання поділяються на дерева логічних можливостей (ДЛМ), тобто планарні графи, які не містять циклів, а також на граф-схеми (ГДЛМ) і мережі Петрі. Для діагностування об'єкта бригада ремонтників використовує групі ДЛМ.

Розглянемо деякий довільний алгоритм функціонального діагностування. Для відображення структури різних класів зручно використовувати ДЛМ з однією або кількома кореневими вершинами. Найчастіше використовують бінарні дерева з такими властивостями:

- кожна вершина дерева має не більше двох виходових і одну входову дугу;
- дерево завжди має одну вершину, яка називається кореневою, і не має входової дуги, а також кінцевих або завислих вершин, які не мають виходових дуг.

Приклади таких дерев показано на рис. 8. Вершини кожного дерева позначено точками. Вершини пронумеровані довільно, дерева вважаємо орієнтованими зверху до низу. Слід звернути увагу, що дерева на рис. 8 відповідають алгоритмам діагностування різних видів:

- ББЗ (рис. 8, а);
- БУЗ (рис. 8, б);
- УУЗ (рис. 8, в).

Форму умовних АД оптимізують за різними критеріями залежно від наявності вихідної інформації щодо ОД і умов ремонту (рис. 9):

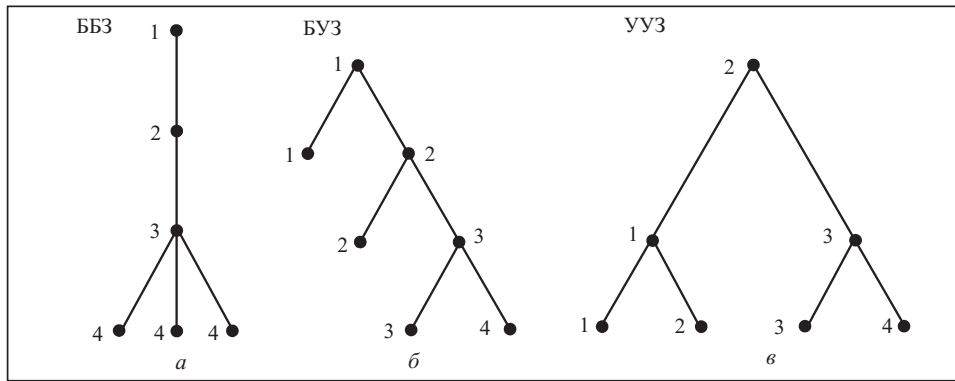


Рис. 8. Класифікація алгоритмів діагностування з використанням ДЛМ

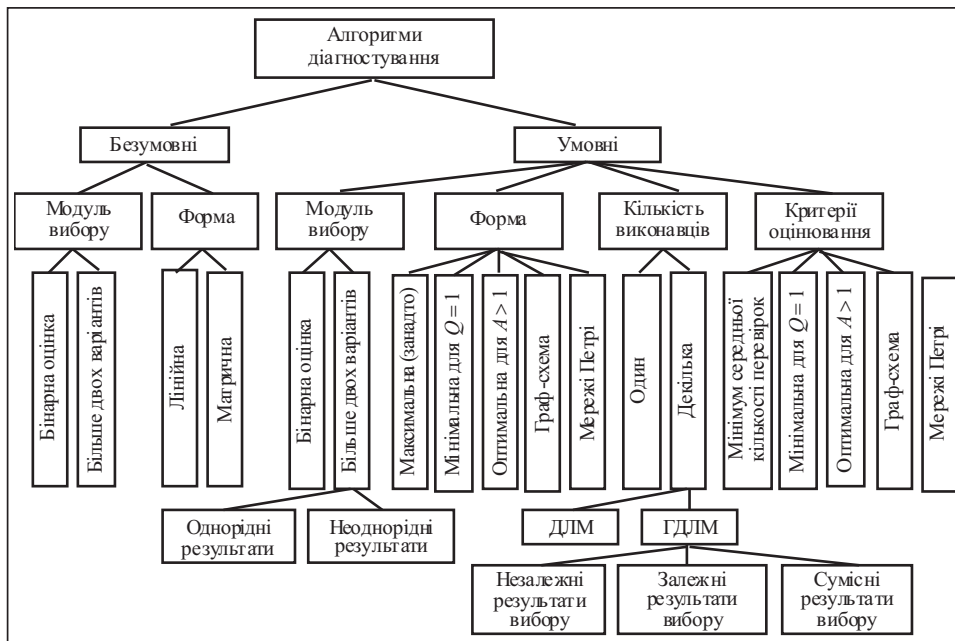


Рис. 9. Класифікація алгоритмів діагностування (Q — кратність дефектів, A — коефіцієнт готовності)

- мінімум середньої кількості перевірок;
- імовірність пріоритетного вибору (облік імовірностей відмови окремих елементів, часу виконання перевірок і усунення несправностей);
- максимум імовірності відновлення працездатності ОД у разі обмежень часу або вартості;
- мінімум T_B за умов обмежень на вартість;
- мінімум вартості відновлення працездатності у разі обмежень у часі.

Для роботи з моделями та алгоритмами діагностування розглянемо основні показники якості діагностичного забезпечення РЕЗ.

Технічна діагностика — це галузь знань, що досліджує технічний стан ОД, формує методи його визначення, а також принципи побудови та організацію систем діагностування.

Діагностика — це наука, а процес пошуку дефектів — діагностування.

Дефект — будь-яка невідповідність об'єкта заданим властивостям.

Виявлення дефекту — це встановлення факту його наявності із визначеною точністю місця знаходження.

Об'єкт діагностування — виріб або його складові частини, стан яких підлягає визначенню. Об'єкти поділяють на аналогові (сигнали набувають будь-яких значень з деякого діапазону) і дискретні (сигнали набувають значень тільки 0 та 1).

Завдання технічної діагностики: перевірка працездатності об'єкта, пошук несправностей; прогнозування стану об'єкта.

Мета технічної діагностики — контроль працездатності об'єкта під час налаштування і визначення несправного елемента у разі відмови об'єкта.

Показники якості: коефіцієнт готовності $A = T / (T + T_B)$; середній час відновлення $T_B = T_D + T_Y$; $T_D \approx 0.8 T_B$ (T_D — час діагностування, T_Y — час усунення несправності); глибина пошуку дефекту — складова частина об'єкта за точністю якої визначають місце дефекту (L); достовірність діагностування — ймовірність того, що дійсний технічний стан об'єкта збігається з діагнозом (P); відхилення діагнозу від дійсного технічного стану ОД (ρ) у разі помилки фахівця щодо результату перевірки.

Використовуючи значення $T_B < T_{BP}$, не враховують достовірність діагностування $P = p^K$ ($p_i = p$) і метрологічну надійність ЗВТ $P(\tau) = \prod_{i=1}^n P_i(\tau)$. У та-

кому випадку отримуємо $T_{BP} = \frac{t + t_Y}{P \cdot P(\tau)} \leq T_{ВП}$.

Відхилення ρ визначають за формою подання ДЛМ, застосовуючи алгоритм пошуку дефектів. АД можна використовувати, якщо $\rho \leq 0.5$, тобто несправний елемент знаходиться в конструктивному модулі, який відремонтують агрегатним методом.

4. ЗАГАЛЬНИЙ АЛГОРИТМ ТА ПРИКЛАД РОЗРОБЛЕННЯ ДІАГНОСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕЗ

Узагальнення сучасних досягнень в галузі технічної діагностики і метрології дає змогу обґрунтувати алгоритм розроблення діагностичного забезпечення РЕЗ (рис. 10).

Аналізуючи вихідні дані з керівних документів, визначають величину $T_{ВП}$, отримують опис схемної і конструктивної будови, а також за можливих умов ремонту визначають кількість μ і кваліфікацію фахівців, що впливає на значення t і t_Y . Важливим є отримання інформації щодо метрологічного забезпечення: тип і кількість ЗВТ, їхні показники, що впливають на час ремонту ($p, P(\tau)$).

Як цільову функцію розглядають досягнення мінімального часу відновлення за заданих умов роботи ремонтного органу, а показник ефективності дає змогу кількісно оцінювати відносно зменшення розрахункового часу відновлення порівняно з максимально допустимим.

Важливо якісно виконати аналіз об'єкта діагностування. Насамперед, дослідити схемну і конструктивну будову: визначити ділянки, де вбудовані засоби діагностування, щоб надалі використовувати їх для розроблення ДЗ поточного ремонту. Аналіз конструкції дає змогу визначити глибину пошуку дефектів L і вид ремонту: агрегатний чи детальний. Властивості багаторежимності і багатофункціональності, а також наявність окремих видів надлишковості також підвищують ефективність ДЗ. Важливо враховувати можливий ступінь пошкодження ОД для визначення виду ремонту: поточний (наявність одного дефекту) або усунення аварійних і пошкоджень від бойових дій (наявність кратних дефектів). При цьому доцільно оптимально розподілити час дефектації і діагностування для мінімізації значення T_{BP} .

З урахуванням вимог до ДЗ визначають критерії оптимізації для алгоритму діагностування: мінімум часу відновлення або вартості ремонту за заданих обмежень. Далі вибирають вид та форму алгоритму пошуку дефектів. Перевагу надають умовним алгоритмам мінімальної форми. За наявності тільки функціональної

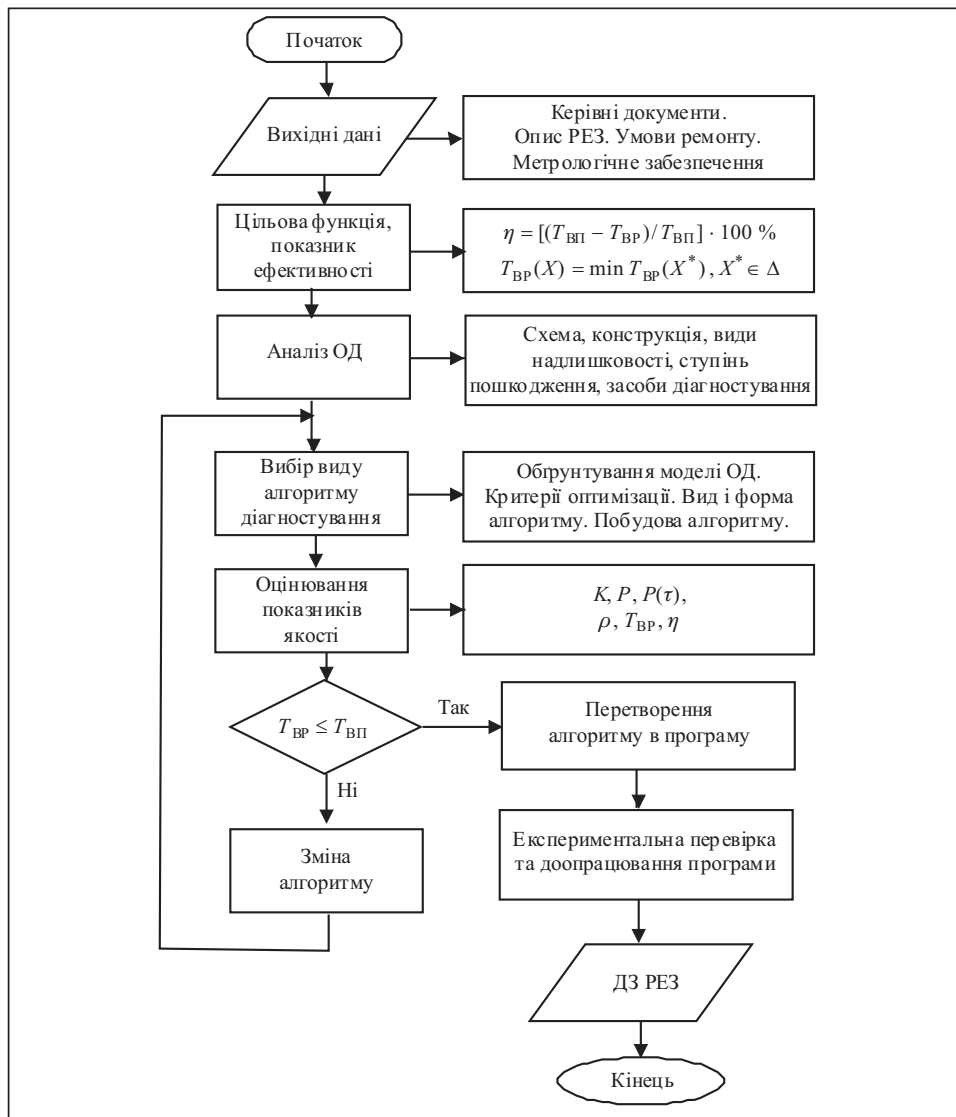


Рис. 10. Загальний алгоритм розроблення діагностичного забезпечення радіоелектронних засобів схеми виробу використовують граф інформаційно-енергетичних зв'язків як діагностичну модель і побудову алгоритму діагностування виконують методом ділення навпіл з використанням індексів передування. За наявності додаткових даних щодо часу і вартості виконання окремих перевірок, показників надійності елементів на визначеній глибині пошуку доцільно використовувати ймовірність переважного вибору перевірок, що також зменшує значення T_{BR} .

Для отриманого алгоритму пошуку дефектів кількісно оцінюють його показники якості: середню кількість перевірок для локалізації несправного елемента, ймовірність правильної постановки діагнозу, метрологічну надійність ЗВТ, відхилення діагнозу від дійсного значення у разі помилки фахівця щодо результату перевірки, розрахункове значення середнього часу відновлення і ефект від впровадження ДЗ в практику ремонту РЕЗ.

Якщо $T_{BR} > T_{BP}$, то необхідно замінити алгоритм діагностування на більш ефективний або замінити вихідні дані щодо кваліфікації фахівців, умов ремонту, якості метрологічного забезпечення. У разі $T_{BR} \leq T_{BP}$ отриманий алгоритм використовують для розроблення діагностичної програми. Якщо під час експериментальної перевірки програми виникають суперечності, які потребують по-

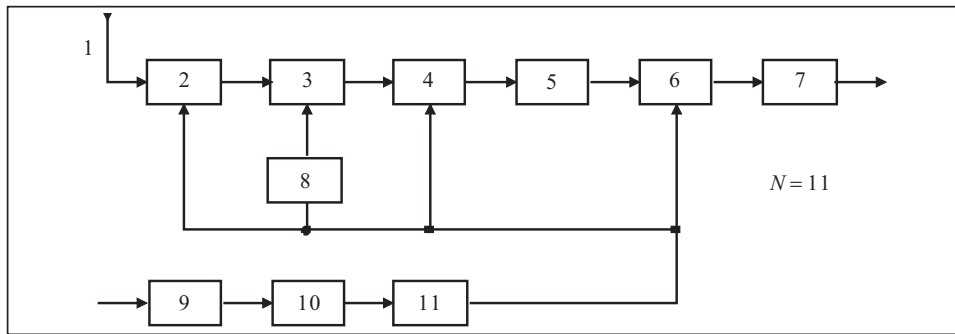


Рис. 11. Структурна схема радіоприймача

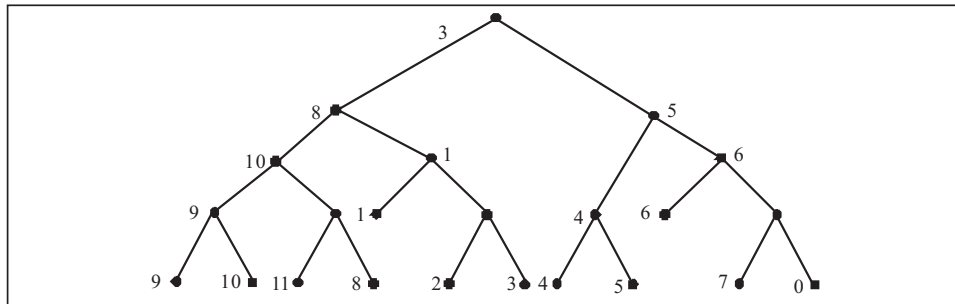


Рис. 12. Умовний алгоритм діагностування радіоприймача

яснення, то програму доопрацьовують. Отже, отримують ДЗ радіоелектронних засобів, яке відповідає вимогам.

Під час розроблення ДЗ використовують відомі рекомендації, наведені в [2, 8, 14, 15, 17], щодо оптимізації форми алгоритму діагностування із врахуванням особливостей ОД і кількісної оцінки його показників якості.

Розглянемо використання отриманих результатів на прикладі розроблення ДЗ радіоприймача (рис. 11), який складається з таких елементів: 1 — антена; 2 — підсилювач високої частоти; 3 — змішувач; 4 — підсилювач проміжної частоти; 5 — детектор; 6 — підсилювач низької частоти; 7 — гучномовець; 8 — гетеродин; 9 — трансформатор; 10 — випрямляч; 11 — фільтр.

Необхідно забезпечити $T_{ВП} \leq 30$ хв для $t = 3$ хв, $t_y = 5$ хв. Для перевірки елементів 1, 7, 9, 10 і 11 як ЗВТ використовують мультиметр для вимірювання опору, змінної та постійної напруги. На виході інших елементів форму сигналу перевіряють осцилографом. В обох випадках $p = 0.9$ і $P(\tau) = 0.97$.

У схемі на рис. 11 немає вбудованих засобів діагностування і зворотних зв'язків. Транзитивні зв'язки спостерігаються між елементами 4, 6 і 11. ОД виконано з використанням конструктивної надлишковості. Вважатимемо, що ДЗ потрібне для поточного ремонту. У цьому разі отримуємо діагностичну модель у вигляді ГЕЗ із подальшим розробленням умовного алгоритму (рис. 12) діагностування мінімальної форми методом ділення навпіл для гарантування мінімального значення $T_{ВР}$ згідно з цільовою функцією.

Алгоритм має середню кількість перевірок: $K = \frac{3 \cdot 4 + 4 \cdot 8}{11 + 1} = 3.7$. У такому випадку оцінюємо інші показники якості:

$$P = p^K = 0.66, \quad P(\tau) = 0.97^2 = 0.94,$$

$$\rho = \frac{(L + K - 1)(1 - p)p^{K-1}}{2} = 0.47 < 0.5, \quad T_{ВП} = \frac{tK + t_y}{P \cdot P(\tau)} = \frac{3 \cdot 3.7 + 5}{0.66 \cdot 0.94} = 26.8 \text{ хв},$$

$$T_{ВР} < T_{ВП}, \quad \eta = \frac{30 - 26.8}{30} \cdot 100 \%$$

Таблиця 2. Програма діагностування радіоприймача

Умовний номер перевірки	ЗВТ	Зміст перевірки	Результати перевірки	
			Не є нормою	Норма
3	Осцилограф	Перевірити наявність сигналу на виході змішувача	Перевірка 8	Перевірка 5
8	Осцилограф	Перевірити наявність сигналу на виході гетеродину	Перевірка 10	Перевірка 1
10	Мультиметр	Перевірити постійну напругу на виході випрямляча	Перевірка 9	Перевірка 11
9	Мультиметр	Перевірити змінну напругу на вторинній обмотці трансформатора	Замінити трансформатор	Замінити випрямляч
11	Мультиметр	Перевірити постійну напругу на виході фільтра	Замінити фільтр	Замінити гетеродин
1	Мультиметр	Виміряти опір антени	Усунути обрив антени	Перевірка 2
2	Осцилограф	Перевірити наявність сигналу на виході підсилювача високої частоти	Замінити підсилювач	Замінити змішувач
5	Осцилограф	Перевірити наявність сигналу на виході детектора	Перевірка 4	Перевірка 6
4	Осцилограф	Перевірити наявність сигналу на виході підсилювача проміжної частоти	Замінити підсилювач	Замінити детектор
6	Осцилограф	Перевірити наявність сигналу на виході підсилювача низької частоти	Замінити підсилювач	Перевірка 7
7	Мультиметр	Виміряти опір гучномовця	Замінити гучномовець	Радіоприймач справний

Отриманий алгоритм відповідає вимогам, тому можливе його перетворення в діагностичну програму (табл. 2).

ВИСНОВКИ

На сьогодні в Україні все більше використовують різноманітні складні системи РЕЗ у різних галузях, зокрема в сфері оборони та безпеки. У нашу країну надходить сучасне і складне обладнання різних виробників, виконане за новітніми стандартами та технологіями. Ситуації, коли обладнання невтрачене, але потребує ремонту, призводить до стану невимушеного штучного дефіциту, а тому професійне технічне діагностування стає вкрай важливим, оскільки дає змогу зменшити нестачу відповідних радіоелектронних засобів.

Сучасний розвиток ремонтної галузі РЕЗ зводиться до підвищення достовірності оцінки їхнього технічного стану, скорочення середнього часу відновлення, збільшення часу напрацювання на відмову. Але є суттєвий виняток: техніка військового призначення, яка може зазнавати пошкоджень унаслідок ведення бойових дій. У таких випадках основним показником стає час відновлення, який складає 80 % процесу технічного діагностування.

Пріоритетною задачею, розв'язання якої забезпечить як економічний, так і матеріальний ефект на загальнодержавному рівні, є розроблення та удосконалення ДЗ для РЕЗ та відновлення їхньої працездатності. Запропонований загальний алгоритм дає змогу швидко модифікувати засоби відповідно до окремих нових зразків імпоротної та вітчизняної техніки, враховуючи особливості ОД. Матеріальний ефект від впровадження — це захист життя військових, цивільного населення, інфраструктури держави.

Подальші дослідження доцільно виконати в напрямку підвищення ефективності діагностування дискретних об'єктів, а також з аварійними та бойовими пошкодженнями за наявності кратних дефектів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Острейковский В.А. Теория надежности. Москва: Высш. шк., 2003. 463с.
2. Сакович Л.М., Василюк Ю.С. Методика розробки діагностичного забезпечення поточного ремонту техніки зв'язку з комплексним використанням її надлишковості. *Зв'язок*. 2016. № 2. С. 48–55.
3. MIL-HDBK-217F. Military handbook: Reliability prediction of electronic equipment. (02-Dec-1991). 150 p.
4. Kharchenko V.A. Problems of reliability of electronic components. *Modern Electronic Materials*. 2015. Vol. 1, Iss. 3. P. 88–92. <https://doi.org/10.1016/j.moem.2016.03.002>.
5. Villanueva I., Lázaro I., Anzuarez J. Reliability analysis of LED-based electronic devices. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 35. P. 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.189>.
6. Catelani M., Ciani L. Experimental tests and reliability assessments of electronic ballast system. *Microelectronics Reliability*. 2012. Vol. 52, Iss. 9–10. P. 1833–1836. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2012.06.077>.
7. Wan Y., Huang H., Das D., Pecht M. Thermal reliability prediction and analysis for high-density electronic systems based on the Markov process. *Microelectronics Reliability*. 2016. Vol. 56. P. 182–188. <http://doi.org/10.1016/j.microrel.2015.10.006>.
8. Ксенз С.П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств. Москва: Радио и связь, 1989. 248 с.
9. Ксенз С.П., Полтаржицкий М.И., Алексеев С.П., Минеев В.В. Борьба с диагностическими ошибками при техническом обслуживании и ремонте систем управления связи и навигации. СПб.: ВАС, 2010. 240 с.
10. Локажук В.М., Савченко Ю.Г. Надійність, контроль, діагностика і модернізація ПК. Київ: Академія, 2004. 376 с.
11. Василишин В.І., Женжера С.В., Чечуй О.В., Глушко А.П. Основи теорії надійності та експлуатації радіоелектронних систем. Харків: ХНУПС, 2018. 268 с.
12. Вишневський В.В., Жердев М.К., Ленков С.В., Проценко В.О. Діагностування аналогових і цифрових пристроїв радіоелектронної техніки. Київ: ТОВ «Компанія ЛІК», 2009. 224 с.
13. Бобало Ю.Я., Волочій Б.Ю., Лозинський О.Ю., Манздії Б.А., Озірківський Л.Д., Федасюк Д.В., Щербаковських С.В., Яковина В.С. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем. Львів: Львівська політехніка, 2013. 300 с.
14. Романенко В.П. Сакович Л.М. Методика розробки діагностичного забезпечення групового пошуку дефектів при ремонті техніки зв'язку в польових умовах. *Зв'язок*. 2015. № 2. С. 53–56.
15. Рижов Є.В. Сакович Л.М. Дослідження показників якості групового пошуку дефектів під час поточного ремонту військової техніки зв'язку. *Збірник наукових праць Військової академії*. 2017. № 2 (8). С. 82–88.
16. Кононов В.Б., Науменко А.М., Водолажко О.В., Коваль О.В., Кондрашова І.І. Основи експлуатації засобів виміральної техніки військового призначення в умовах проведення АТО. Харків: ХНУПС, 2017. 288 с.
17. Kononov V., Ryzhov Ye., Sakovych L. Dependence of parameters of repair of military communication means on the quality of metrological support. *Advanced Information Systems*. 2018. Vol. 2, N 1. P. 91–95. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.17>.
18. Ryzhov Ye., Sakovych L. Minimization measurement requirements for maintenance and repair special communication means. *Collection «Information Technology and Security»*. 2017. Vol. 5, N 1. P. 106–114. <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2017.5.1.120586>.

L. Sakovich, S. Gnatiuk, S. Semekha, D. Volosheniuk, I. Popov

FORMALIZATION OF DEVELOPING DIAGNOSTIC SUPPORT FOR RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT

Abstract. The authors analyze modern achievements in technical diagnostics and metrology and their possibility to improve the quality of diagnostic support of promising and existing radio-electronic technical means. A general algorithm for the development of diagnostic support for radio-electronic devices is proposed, taking into account their structure, repair conditions, and metrological support to minimize the average recovery time.

Keywords: radio-electronic means, technical diagnostics, diagnostic and metrological support.

Надійшла до редакції 01.08.2023