

ВІЙСЬКОВА ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

УДК 621.396.967

д.тех.н., доц. Глухов С.І. (ВІКНУ)
к.т.н., с.н.с. Гахович С.В. (ВІКНУ)
к.т.н., с.н.с. Охрамович М.М. (ВІКНУ)
д. філос. з інформ. техн. Коваль М.О. (ВІКНУ)
к.пед.н. Кравченко О.І. (ВІКНУ)

DOI: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2022/77-01>

МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО ТИПОВОГО ЕЛЕМЕНТУ ЗАМІНИ З КОМПЛЕКСНИМ ВИКОРИСТАННЯМ ДЖЕРЕЛ ДІАГНОСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

У статті приведено порядок організації дослідження контролю технічного стану в сучасній радіоелектронній техніці, яка виконана на елементній базі четвертого та п'ятого поколінь. Показано комплексне використання декількох методів контролю працездатності цифрових типових елементів заміни, що містять мікроконтролери та здійснено розрахунок значень вихідних перемінних узагальненого модуля який відповідає дійсним фізичним об'єктам і може бути використаний у математичній моделі цифрового типового елемента заміни. Для скорочення кількості контрольних точок, в якості джерела діагностичної інформації використано параметри енергодинамічного процесу, що виникають у шині живлення цифрових елементів при їх перемиканні із одного логічного стану в інший. Це дає змогу зменшити кількість контрольних точок до однієї (шини живлення), одержуючи при цьому діагностичну інформацію про технічний стан кожного логічного елемента.

Робота розділена на чотири етапи, які включають в себе:

- аналіз внутрішньої структури та виділення підсистем у типовому елементі заміни;
- декомпозицію типового елемента заміни та виділення груп перемінних;
- синтез структурно-функціональної моделі цифрового типового елемента заміни;
- моделювання процесу взаємодії розробленої математичної моделі узагальненого модуля мікроконтролера з зовнішнім середовищем, аналіз ступеня адекватності моделі дійсним фізичним об'єктам.

Таким чином, запропоновано структурно-функціональну модель цифрового типового елемента заміни, в якому передбачено комплексне використання двох джерел діагностичної інформації: вихідних реакцій та характеристик енергодинамічного процесу в шині живлення цифрового ТЕЗ.

Ключові слова: енергодинамічний метод діагностування, радіоелектронна техніка, математична модель, джерело діагностичної інформації, типовий елемент заміни.

Вступ. Процес підготовки і організації контролю технічного стану в сучасній радіоелектронній техніці (РЕТ), яка виконана на елементній базі четвертого і п'ятого поколінь, досить складний. Ця складність обумовлена, зокрема, використанням у складі нової техніки цифрових типових елементів заміни (ТЕЗ), які містять інтегральні схеми (ІС) та мікроконтролери.

Для ухвалення рішення про технічний стан ТЕЗ і локалізації дефектів необхідно провести технічне діагностування з перевіркою працездатності і визначення причин виникнення дефектів. Процес проведення діагностування цифрових ТЕЗ складається у вимірі й аналізі параметрів вихідних сигналів функціональних елементів, чи підсистем або деякого узагальнюючого сигналу в цілому. Для виміру й аналізу параметрів вихідних сигналів функціональних елементів і підсистем організують додаткові виходи, що називаються контрольними точками. Набір значень параметрів, що відображають якість інформації про технічний стан ТЕЗ, однозначно зв'язаний з кількістю контрольних точок, установлених на ньому. З ускладненням ТЕЗ збільшується число параметрів контролю, по яких приймають

рішення про технічний стан. Вибір найбільш інформативних параметрів дозволяє значною мірою скоротити число контрольних точок.

Аналіз останніх досліджень. На теперішній час існуючі методи контролю технічного стану цифрових елементів поодиноці не дозволяють домогтися прийнятних результатів визначення технічного стану цифрових ТЕЗ з високою достовірністю за припустимий час. Це пов'язано з тим, що елементи, які складають цифровий ТЕЗ, мають велику кількість активних елементів на кристалі обмеженої площі, складну внутрішню структуру і високу ймовірність виникнення кратних дефектів, обмежену кількість виводів і контрольних точок [1, 2]. Тому, з метою досягнення прийнятних характеристик діагностування, сьогодні перспективним є комплексне використання декількох методів контролю працездатності цифрових ТЕЗ, що містять мікроконтролери.

Для скорочення числа контрольних точок при діагностуванні цифрових ТЕЗ, доцільно використовувати в якості джерела діагностичної інформації параметри енергодинамічного процесу (ЕДП), що виникають у шині живлення цифрових елементів при їх переключенні із одного логічного стану в інший. Це дозволяє зменшити кількість контрольних точок до однієї (шини живлення), одержуючи при цьому діагностичну інформацію про технічний стан кожного логічного елемента (ЛЕ) [1-3].

Мета статті. В статті пропонується нова структурно-функціональна модель цифрового ТЕЗ в якій передбачається комплексне використання двох джерел діагностичної інформації (ДІ): вихідних реакцій (ВР) та характеристик енергодинамічного процесу в шині живлення цифрового ТЕЗ.

Виклад основного матеріалу. Побудову означеної структурно-функціональної моделі проведемо в чотири етапи, використовуючи при цьому відомі підходи [3]:

- 1) аналіз внутрішньої структури та виділення підсистем у ТЕЗ;
- 2) декомпозиція ТЕЗ та виділення груп перемінних;
- 3) синтез структурно-функціональної моделі цифрового ТЕЗ;
- 4) моделювання процесу взаємодії розробленої математичної моделі (ММ)

узагальненого модуля мікроконтролера з зовнішнім середовищем, аналіз ступеня адекватності моделі дійсним фізичним об'єктам.

На першому етапі виділяються підсистеми у цифровому ТЕЗ. З урахуванням характеристик енергодинамічного процесу (ЕДП) внутрішню структуру ТЕЗ можна представити сукупністю трьох підсистем – інформаційної, керуючої і енергоживлення [4]. За допомогою інформаційної підсистеми здійснюється передача, опрацювання і збереження даних. Керуюча підсистема виконує допоміжні функції (аналізує інформаційні потоки згідно алгоритму опрацювання через модулі інформаційної підсистеми, генерує керуючі сигнали, які необхідні для роботи інформаційної підсистеми, а також формує сигнали для зв'язку ТЕЗ із зовнішнім середовищем). Підсистема енергозабезпечення призначена для живлення складових елементів цифрового ТЕЗ (логічних елементів з рівнями, що відповідають напругам живлення $U_{жив}$, причому $U_{жив} = \{U_{жив 1}, \dots, U_{жив i}, \dots, U_{жив p}\}$, де p – число шин живлення, для яких характерні відповідні струми споживання при протіканні ЕДП, причому $I_{жив} = \{I_{жив 1}, \dots, I_{жив i}, \dots, I_{жив p}\}$.

Вхідні діяння (ВД), що надходять на керуючу та інформаційну підсистеми ТЕЗ поділимо на два класи: керуючі та інформаційні. Під інформаційними вхідними діяннями D^S і керуючими вхідними діяннями D^U будемо розуміти сигнали, які утворюють відповідні множини багатомірних вхідних перемінних, причому

$$D^S = \{D_1^S, \dots, D_i^S, \dots, D_\xi^S\}, \quad D^U = \{D_1^U, \dots, D_i^U, \dots, D_\psi^U\},$$

де ξ, ψ – число вхідних інформаційних та керуючих шин відповідно.

Множину D^U розділимо на дві підмножини $\{I\}$ і $\{D^C\}$ так, що

$$D^U = \{I\} \cup \{D^C\}.$$

Підмножину $\{I\}$ утворюють керуючі сигнали ТЕЗ причому

$$I = \{I_1, \dots, I_i, \dots, I_\mu\}, \quad I_i \in (0, 1, T),$$

де μ – число керуючих сигналів, за допомогою яких цифровий ТЕЗ виконує керування зовнішніми пристроями чи, навпаки, зовнішні пристрої здійснюють безпосередній вплив на процес обробки даних у ТЕЗ. Ці сигнали подаються і знімаються, як правило, зі спеціально призначених входів і виходів [5, 6]; T – байдуже або невизначене значення сигналу.

Підмножину D^C утворюють команди мікроконтролерів, причому

$$D^C = \{D_1^C, \dots, D_i^C, \dots, D_c^C\}, \quad D_i^C = \{C_{i1}, \dots, C_{ij}, \dots, C_{ig}\}, \quad C_{ij} \in (0, 1, T),$$

де c – число команд в системі команд мікроконтролера; g – розрядність i -ої команди.

Множина D^C задає множину функцій Φ , причому $\Phi = \{\Phi_1, \dots, \Phi_j, \dots, \Phi_\tau\}$,

де τ – число функцій, які реалізує цифровий ТЕЗ; Φ_j – функція, згідно якій вхідній перемінній D_i^S ставиться у відповідність вихідна перемінна D_i^Z [1, 5]. Вихідні реакції ТЕЗ на вхідні діяння утворюють множину багатомірних вихідних перемінних D^Z , причому

$$D^Z = \{D_1^Z, \dots, D_i^Z, \dots, D_r^Z\}, \quad D_i^Z = \{Z_{i1}, \dots, Z_{ij}, \dots, Z_{is}\}, \quad Z_{ij} \in (0, 1, T),$$

де r – число вихідних шин; S – розрядність i -ої вихідної шини.

Множина D^Z утворюється з множини D^S за рахунок функціональних перетворень вхідних перемінних, за допомогою яких здійснюється переключення точно визначених елементів. У цьому випадку справедливим є наступний вираз:

$$D^Z = F(D^S, D^U). \quad (1)$$

Шина живлення з відповідними $U_{\text{жив}}$ є невід'ємною частиною цифрового ТЕЗ та, як правило, загальною для всіх його елементів. У цьому випадку справедливим є наступний вираз:

$$I_{\text{жив}} = F(D^Z, D^S, D^U). \quad (2)$$

Вираз (2) показує аналітичну залежність $I_{\text{жив}}$ від інформаційних та керуючих ВД і вихідних реакцій мікроконтролерів. Аналіз виразів (1) і (2) показує, що контроль технічного стану цифрового ТЕЗ можна здійснити по двом джерелами діагностичної інформації: характеристиками ЕДП і ВР.

На другому етапі здійснюється декомпозиція цифрового ТЕЗ на рівні, які залежать від глибини представлення внутрішньої структури, та виділення груп перемінних. У зв'язку з необхідністю обліку великої кількості внутрішніх зв'язків і складності структури сучасного ТЕЗ найбільш раціонально будувати багаторівневу ієрархічну модель. Декомпозиція цифрового ТЕЗ на структурні рівні необхідна для спрощення розрахунків (дозволяє скоротити розглянуту множину припустимих D^S і D^U). Також, це дає можливість, в залежності від наявної інформації про об'єкт діагностування (ОД) у розробника тестової послідовності (ТП), використовувати моделі різного рівня, що значно спрощує побудову та упорядкування ТП [7, 8].

За допомогою теорії графів представимо цифровий ТЕЗ як сукупність взаємопов'язаних елементів – ЛЕ, мікроконтролерів, які розташовані на ньому, а мікроконтролери представимо у вигляді сукупності функціонально-завершених вузлів (частин мікроконтролера, що виконують деякі операції над вхідними даними), які далі будемо називати *модулями*.

Перший ієрархічний рівень – це рівень ТЕЗ. На ньому представлені найбільш загальні властивості ТЕЗ: найменування мікроконтролерів, які розміщені на ньому; зв'язки між мікроконтролерами (можливість здійснення обміну даними); статистика відмов; розмір мінімального повного тесту та інша інформація загального характеру. Ці властивості представимо у вигляді орієнтованого зваженого по вершинам графа $G(V, X)$, де вершини $V^m \in V$ ($m = \overline{1, v}$) – це мікроконтролери, а ребра $X^n \in X$ – зв'язки між ними. Напрямок ребра показує можливу послідовність обміну даними.

Вага вершини – це мінімальна кількість тестових послідовностей, які необхідні для повного тесту при контролі технічного стану мікроконтролера, яку представляє дана вершина. Для логічної завершеності додаємо дві вершини, які відповідають входу та виходу і мають відповідно мінімальний та максимальний номери. Це полегшує процес визначення першого та останнього елемента в тестовій послідовності. Дана модель представлена на рис. 1.

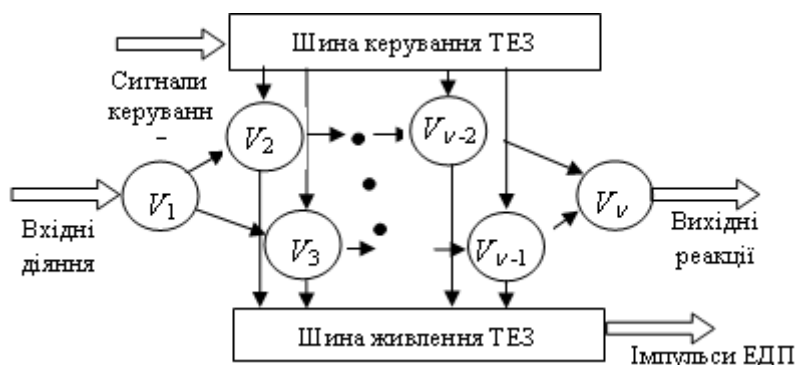


Рисунок 1– Модель цифрового ТЕЗ як сукупність взаємопов’язаних логічних елементів

Модель рівня ТЕЗ може знаходитись в одному з N станів, якій відповідає подачі на відповідний мікроконтролер об’єкта діагностування сигналу "вибір кристала". Перехід з стану s^i до стану s^j здійснюється відповідно з наступним виразом:

$$s^i \xrightarrow{n^j = f(N^i)} s^j, \quad n^j \in N,$$

де s^i – теперішній стан моделі; s^j – наступний стан моделі; N^i – множина вершин, в які можливо здійснити перехід з вершин n^i ; n^j – вершина графа, яка належить множині N^i і знаходиться як функція над цією множиною; $f(N^i)$ – функція над множиною N^i , яка визначається критерієм вибору.

Таким чином, представлений графічний рівень цифрового ТЕЗ дозволяє визначити порядок тестування мікроконтролерів, які розміщені на ньому, та використовувати структурні підходи для синтезу ТП.

Другий ієрархічний рівень – це рівень мікроконтролера. На цьому рівні необхідно надати інформацію про модулі, з яких складається мікроконтролер, логічні зв’язки між модулями, розмір мінімального повного тесту модуля. Цю інформацію представимо орієнтованим зваженим по вершинам графом, вершини якого $V_n^v \in V^v$ ($n = \overline{1, N}$) – це модулі мікроконтролера, а орієнтовані ребра $x^k \in X$ вказують на зв’язок між ними. Вага кожної вершини показує кількість наборів даних, які необхідні для мінімального повного тесту відповідного модуля. Додатково вводяться дві вершини, які відповідають входу та виходу з мінімальним та максимальним номерами відповідно. Дана модель представлена на рис. 2.

Модель рівня складового елемента може знаходитись в одному з L станів, якій відповідає подачі на відповідний модуль об’єкта діагностування керуючого сигналу. Перехід з стану s_n^i до стану s_n^j здійснюється відповідно наступному виразу:

$$s_n^i \xrightarrow{l^j = f(L^i)} s_n^j, \quad l^j \in L^i,$$

де s_n^i – теперішній стан моделі; s_n^j – наступний стан моделі; L^i – множина вершин, в які можливо здійснити перехід з вершин l^i ; l^j – вершина графа, яка належить множині L^i і знаходиться як функція над цією множиною; $f(L^i)$ – функція над множиною L^i , яка визначається критерієм вибору.

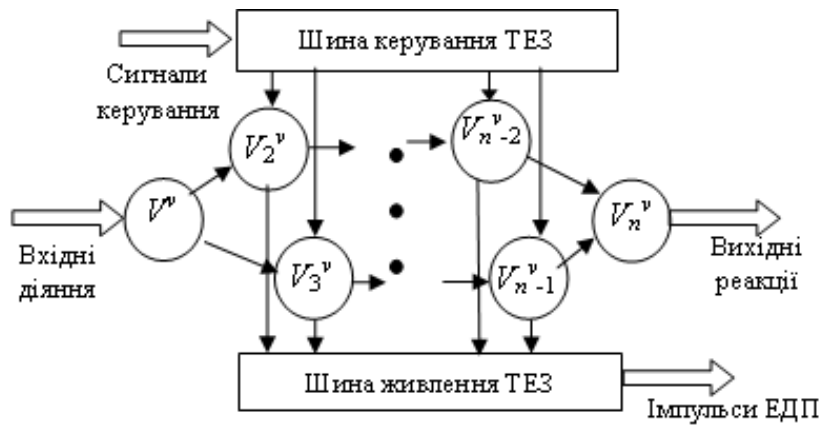


Рисунок 2— Модель цифрового ТЕЗ з мікроконтролером та логічними зв'язки між модулями

Даний рівень дозволяє використовувати для побудови ТП структурно-функціональні підходи на рівні ЛЕ, визначити послідовність перевірки модулів.

Останній ієрархічний рівень – це рівень модуля мікроконтролера. Для отримання математичної моделі розглянемо функціональні залежності стана модуля від вхідних діянь та конструктивного виконання модуля.

На третьому етапі здійснюється синтез математичної моделі для цифрового ТЕЗ. Виходячи з ієрархії розробленої моделі, розглянемо перемінні, які діють на зовнішніх виводах модуля, отримаємо вираз для узагальненого модуля мікроконтролера.

У загальному випадку на кожний модуль надходять інформаційні і керуючі діяння та подаються відповідні рівні напруги живлення, а сам модуль може мати декілька вихідних шин даних і живлення. Обмежимося розглядом модулів з однією вихідною шиною даних і живлення. Модулі з декількома вихідними шинами і шинами живлення будемо розділяти на деяку сукупність модулів з однією вихідною шиною даних і шиною живлення.

За конструктивно-схемотехнічним рішенням всі модулі можна розділити на асинхронні і синхронні [9, 10]. У *асинхронних* модулів ВР на інформаційні ВД з'являється через термін t_s (затримка при поширенні сигналу в схемі). У *синхронних* модулів термін появи ВР на інформаційні ВД залежить як від терміну t_s , так і від часу t_c (час надходження на відповідні входи цих модулів синхронізуючих імпульсів $\gamma_c, \gamma_c \in J$). Синхросигнал γ_c представляє собою одиничний (нульовий) імпульс, що надходить у точно визначені (дискретні) моменти часу $t_i \in T$ (T – множина дискретних моментів часу). Сигнал, що обробляється у мікроконтролері, послідовно проходить через вказані модулі.

За реакцією на ВД всі модулі можна розділити на комбінаційні і послідовні [10]. *Модулі комбінаційного типу* – це такі модулі, ВР яких залежить тільки від ВД, що діють у даний момент часу t_i , і не залежить від ВД, що діяли у попередній момент часу t_{i-1} . До таких модулів відносяться схеми, які не містять елементів пам'яті (мультиплектори, арифметико-логічні пристрої, багаторозрядні зрушувачі та ін.). *Модулі послідовного типу* – це такі модулі, ВР яких залежить як від ВД, що діють на його входах у даний момент часу t_i , так і ВД, що надійшли на його входи у n попередніх моментів часу $t_j, j = \overline{(i-n), i}$. До таких модулів відносяться схеми, які містять елементи пам'яті (реєстри, лічильники та ін.).

Загальні перемінні модулів обох типів розділимо на наступні групи:

1) множина інструкцій $J = \{J_1, \dots, J_i, \dots, J_d\}$, $J_i = \{\Omega_{i1}, \dots, \Omega_{ij}, \dots, \Omega_{iu}\}$, $\Omega_{ij} \in (0, 1, T)$, (d – кількість керуючих інструкцій; u – розрядність керуючої шини модуля);

2) множина багатомірних вхідних перемінних $D^x = \{D_1^x, \dots, D_i^x, \dots, D_k^x\}$, $D_i^x = \{X_{i1}, \dots, X_{ij}, \dots, X_{ib}\}$, $X_{ij} \in (0, 1, T)$, (k – кількість зовнішніх шин мікроконтролера чи вихідних шин модуля комбінаційного типу; b – розрядність i -ої шини ВД, яка являє собою зовнішню шину мікроконтролера або вихідну шину модуля комбінаційного типу);

3) множина багатомірних вхідних перемінних $D^Y = \{D_1^Y, \dots, D_i^Y, \dots, D_h^Y\}$, $D_i^Y = \{Y_{i1}, \dots, Y_{ie}, \dots, Y_{ir}\}$, $Y_{ie} \in (0, 1, T)$, (h – кількість шин, які відповідають перемінній стана модуля послідовного типу; r – розрядність i -ої шини ВД, яка відповідає вихідній перемінній стана модуля послідовного типу).

Перемінні модуля комбінаційного типу розділимо на наступні групи:

1) множина багатомірних вихідних перемінних $D_{\text{комб}}^z = \{Z_1^k, \dots, Z_i^k, \dots, Z_v^k\}$, $Z_i^k \in (0, 1, T)$, (v – розрядність вихідної шини модуля комбінаційного типу);

2) значення напруги шини живлення $U_{\text{комб}}$, для якої характерним є те, що при протіканні ЕДП струм споживання $I_{\text{комб}}$ залежить від виду тестових діянь і технології виготовлення мікроконтролера (транзисторно-транзисторна логіка (ТТЛ), емітерно-зв'язана логіка (ЕЗЛ) та ін.).

Перемінні модуля послідовного типу розділимо на наступні групи:

1) множина багатомірних вихідних перемінних $D_{\text{посл}}^z$, якій відповідає перемінна стана $D_{\text{посл}}^z = \{Z_1^f, \dots, Z_i^f, \dots, Z_f^f\}$, $Z_i^f \in (0, 1, T)$, (f – розрядність вихідної шини модуля послідовного типу);

2) значення напруги шини живлення $U_{\text{посл}}$, для якої характерним є те, що при протіканні ЕДП струм споживання $I_{\text{посл}}$ залежить від виду тестових діянь, внутрішнього стана модуля, технології виготовлення мікроконтролера (ТТЛ, ЕЗЛ та ін.).

Для отримання єдиної та однозначної залежності ВР від інформаційних ВД об'єднаємо всі зовнішні інформаційні вхідні шини і всі внутрішні шини в одну з узагальною розрядністю H таким чином, що

$$\{D^x\} \cup \{D^Y\} = \{D^I\} = \{I_1, \dots, I_i, \dots, I_H\}, \quad H = \sum_{i=1}^k b_i + \sum_{i=1}^h r_i, \quad I_i \in (0, 1, T).$$

Об'єднання (узагальнення) декількох однорідних шин в одну припустимо. В цьому випадку зберігаються фізичний зміст процесів, що описуються, і коректність ММ, а також здійснюється перехід від однієї форми представлення вхідних перемінних до іншої [11].

В узагальненому модулі вихідна перемінна D^w описується наступним виразом:

$$D^w = \{w_1, \dots, w_i, \dots, w_\gamma\}, \quad w_i \in (0, 1, T),$$

де γ – розрядність вихідної шини.

Для модуля комбінаційного типу $D^w = D_{\text{комб}}^z$, для модуля послідовного типу $D^w = D_{\text{посл}}^z$. В узагальненому модулі при протіканні ЕДП значенню напруги $U_{\text{узаг}}$ шини живлення відповідає струм споживання $I_{\text{узаг}}$. При цьому для модуля комбінаційного і послідовного типів $I_{\text{узаг}} = I_{\text{комб}} \cup I_{\text{посл}}$.

Таким чином, ММ l -го узагальненого модуля має наступний вид:

$$M_F^l = F(T, D^I, D^w, \Phi^w, I_{\text{узаг}}, J),$$

де Φ^w – множина функцій, що визначають значення D^w відповідного типу модуля при відомих T , J і D^w . Допоміжним параметром, який характеризує складність розробленої функціональної моделі мікроконтролера, являється формат множини функцій Φ^w перемінних J , D^w , D^I , що визначає їх розмірність, тобто $\Phi^w = \langle D^I, D^w, J \rangle$ [12].

Зважаючи на те, що шина живлення є загальною для всіх елементів, які складають мікроконтролер, можна стверджувати, що при урахуванні характеристик ЕДП в об'єкті діагностування буде справедливим наступний вираз:

$$I_{\text{узаг}} = F(\Phi_i^w(D^I(J_i))).$$

Математична модель мікроконтролера, яка представлена на рисунку 2, має наступний вид:

$$M_F^{\text{bic}} = F(\sum_l M_F^l, D^C, \Phi, D^S, D^Z),$$

де l – кількість модулів в мікроконтролері.

Таким чином, узагальнена ММ цифрового ТЕЗ (див. рисунок 1) може бути представлена в наступному вигляді [13]:

$$M_F^{\text{тез}} = F(\sum_k M_F^{k, \text{bic}}, I), \quad (3)$$

де k – кількість ВІС на ТЕЗ.

На четвертому етапі здійснюється моделювання процесу взаємодії, розробленої узагальноної ММ модуля мікроконтролера з зовнішнім середовищем і аналіз ступеня адекватності ММ цифрового ТЕЗ реальним фізичним об'єктам. Для цього розглянемо взаємодію модулів комбінаційного і послідовного типів з зовнішнім середовищем.

Аналізуючи вираз (1), можна стверджувати, що для модуля комбінаційного типу при виконанні будь-якої заданої інструкції $J_i \in J$ значення вихідної перемінної $D^w(J_i)$ у момент часу $t_i \in T$ буде визначатись наступним виразом:

$$D^w(J_i) = \Phi_i^w(D^l(J_i)), \quad i = \overline{1, d}, \quad (4)$$

де $D^l(J_i)$ – значення в даний момент часу $t_i \in T$ підмножини перемінних вхідних діянь, що беруть участь у виконанні інструкції J_i ; Φ_i^w – функція, визначена інструкцією J_i .

Для визначення ВР і реакції в шині живлення модуля послідовного типу в момент часу $t_i \in T$ крім зовнішньої складової ВД D_i^x необхідно визначити значення внутрішньої складової вхідного діяння D_i^y . Перемінна D_i^y відповідає значенню вихідної перемінної D^w , визначеної на попередньому такті в момент часу $t_{i-1} \in T$, тобто

$$D^{Y_i} = D^{w_{i-1}}.$$

У цьому випадку значення $D^{w_{i-1}}$ визначається згідно з виразом (4). Зі зміною інструкції змінюється функція, яку виконує модуль, тобто $J_i \rightarrow \Phi_i^w$. Будемо вважати, що всі функції з множини Φ^w в модулі здійснюються роздільно [13].

Перемінні стану $\{D_1^Y, \dots, D_i^Y, \dots, D_h^Y\}$ модуля змінюються тільки під дією синхросигналів γ_c з множини J . Таким чином, при наявності у керуючому діянні синхросигналу γ_c значення перемінної D^Y визначається згідно з формулою (4), що відповідає значенню $D^{Y_{t_i}}$, визначеному в модулі після надходження синхросигналу γ_c . Якщо перемінною $D^{Y_{t_i}}$ керують декілька синхросигналів γ_c , то в тактовий момент часу $t_i \in T$ можна реалізувати тільки один синхросигнал. Для однозначного визначення перемінної D^Y синхросигнал потрібно реалізувати після того, як були змінені всі інші перемінні керуючого сигналу J і ВД D^l . При відсутності синхросигналу γ_c йому присвоюється нейтральне значення, яке показує, що значення перемінної стана D^Y не змінюється, тобто $D^{Y_{t_{i+1}}} = D^{Y_{t_i}}$. [14].

Розрахунок значень вихідних перемінних модулів виконується наступним чином. Для послідовного з'єднання модулів комбінаційного і послідовного типів при ВД, який містить в собі синхросигнал, значення вихідних перемінних комбінаційних модулів визначається, виходячи зі значень перемінних стана заданих в момент t_i , тобто до реалізації синхросигналу. При цих же ВД значення вихідних перемінних послідовних модулів визначаються після реалізації синхросигналу. Значення вихідних перемінних комбінаційних модулів, які

визначені після реалізації синхросигналу, визначаються на наступному ВД, в якому всім синхросигналам призначено нейтральні значення, а перемінним стана $D^{Y t_i}$ – значення, які установилися на попередньому входньому наборі. В загальному випадку значення вихідних перемінних модулів ТЕЗ визначаються за допомогою послідовних входніх даних (ВД), які складаються з двох наборів. В першому наборі реалізуємо синхросигнал, інструкцію J_i , яка визначає функцію ϕ_i^w модуля, і визначає значення перемінної стана. В другому наборі за допомогою входніх перемінних D^I визначаємо значення перемінних стана D^Y .

Висновки. Показаний розрахунок значень вихідних перемінних узагальненого модуля відповідає дійсним фізичним об'єктам і може бути використаний для моделювання процесу взаємодії в ММ цифрового ТЕЗ. Як видно вираз (3) є узагальнюючим і справедливим для будь якого ТЕЗ. Таким чином, розроблена узагальнена математична модель цифрового ТЕЗ з урахуванням ЕДП відображає реальні фізичні процеси, які протікають в ТЕЗ, універсальна і може бути використана в якості базової моделі для розгляду типових дефектів, розробки загальних правил та методики побудови тесової послідовності і розробки методу контролю технічного стану цифрових ТЕЗ з урахуванням ЕДП.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Василюшин В.І., Женжера С.В., Чечуй О.В., Глушко А.П. Основи теорії надійності та експлуатації радіоелектронних систем. Харків: ХНУПС, 2018, 268 с.
2. Багринцев В.Т. Компьютерная электроника и микропроцессоры: Учебное пособие / В.Т. Багринцев, В.В. Багринцев, В.А. Ульшин. - Луганск: Изд-во "Ноулидж", 2010, 376 с.:
3. Вишнівський В.В. Аналіз методів форсованих випробувань для отримання залежності зміни діагностичного параметра від часу напрацювання напівпровідникових РЕК / В. В. Вишнівський, В.В. Василенко, В.В. Кузавков // Системи управління, навігації та зв'язку. – П.: ПНТУ. – 2015. – Вип. 1(33). – С. 18-21.
4. Вишнівський В.В. Проблема побудови та впровадження автономних автоматизованих систем діагностування радіоелектронного озброєння / В.В. Вишнівський, В.В. Кузавков, Г.І. Гайдур // Науковий журнал Інформаційна безпека Східно український національний університет ім. Володимира Даля. – Луганськ, 2014. – Вип. № 4(16). – С. 151-157.
5. Волошин, О. Ф. Моделі та методи прийняття рішень : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / О. Ф. Волошин, С. О. Мащенко. - 2-ге вид., перероб. та допов. - К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2010. - 336 с.
6. Жердев М.К. Концептуальні засади методу діагностування сучасних цифрових типових елементів заміни по форматним частотам перехідного процесу в шині живлення/М.К. Жердев, В.О. Савран // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2016.- Вип.52. – С 20-32.
7. Жердев М.К. Узагальнення результатів форсованих випробувань радіоелектронних компонентів / М.К. Жердев, В.В. Кузавков // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Шевченка. – К., 2015. – № 49. – С. 40-48.
8. Жиров Г.Б. Узагальнена діагностична модель цифрової ВІС для енергостатичного методу діагностування /Г.Б. Жиров // Вісник КНУ ім. Тараса Шевченка. – Сер. Військово-спеціальні науки. – К.: Київ. ун-т, 2005. – Вип. 11. – С. 55-60.
9. Надійність систем з надлишковістю: методи, моделі, оптимізація: [монографія] / Б. П. Креденцер [та ін. ; під наук. ред. д-ра техн. наук, проф. Б. П. Креденцера; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". - К.: Фенікс, 2013. - 341 с.
10. Ланецкий Б. Н. Адаптивное управление техническим состоянием и надежностью сложных технических систем в условиях ресурсных ограничений / Б. Н. Ланецкий, В. В. Лукьянчук // Системи озброєння і військова техніка. – Х. : ХУПС, 2011. – Вип. 2 (26). – С. 149–151.

11. Зубарев В.В., Ковтуненко А. П., Раскин Л. Г. Математические методы оценки и прогнозирования технических показателей эксплуатационных свойств радиоэлектронных систем .Киев. Книжное изд-во НАУ, 2007. 296 с.

12. Кулик І. В. Засоби автоматизованої оцінки показників ефективності стратегій технічного обслуговування і ремонту систем радіоелектронного комплексу: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.12.17 Львів, 2013. 20 с.

13. Шкуліпа П.А. Шляхи і методи підвищення ефективності автономних автоматизованих систем технічного діагностування радіоелектронних пристроїв спеціального призначення / П.А. Шкуліпа, М.К., Жердєв, С.В. Ленков, Ю.О. Гунченко // Журнал «Сучасна спеціальна техніка», 2012. – № 3 (30). – С 69 – 74.

14. Шкуліпа П.А. Основні напрямки розвитку автоматизованих систем технічного діагностування об'єктів радіоелектроніки / П.А. Шкуліпа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2012. – № 6.– С. 192 – 194.

REFERENCES:

1. Vasilishin V.I., Zhenzhera S.V., Chechuj O.V., Glushko A.P.(2018), “Osnovi teoriiy nadijnosti ta ekspluatatsiyi radioelektronnih sistem. [Basics of the theory of reliability and operation of radio electronic systems], Harkiv, HNUPS, 268 p.

2. Bagrincev V.T., Bagrincev V.V., Ulshin V.A., “Kompyuternaya elektronika i mikroprocessory: Uchebnoe posobie” [Computer Electronics and Microprocessors: Study Guide], Lugansk, Izd-vo Noulidzh, 376 p.

3. Vyshnivskiy V.V., Vasylenko, V.V., Kuzavkov V.V.“ Analiz metodiv forsovanykh vyprobuvan dlia otrymannya zalezhnosti zminy diahnostychnoho parametra vid chasu napratsiuvannya napivprovodnykovykh REK” [Analysis of forced test methods to obtain the dependence of the diagnostic parameter change on the operating time of semiconductor RECs], Management, navigation and communication systems. PNTU. Issue 1(33). pp. 18-21.

4. Vishnivskij V.V. Problema pobudovi ta vprovadzhennya avtonomnih avtomatizovanih sistem diaagnostuvannya radioelektronnoho ozbroyennya / V.V. Vishnivskij, V.V. Kuzavkov, G.I. Gajdur // Naukovij zhurnal Informacijna bezpeka Shidno ukrajinskij nacionalnij universitet im. Volodimira Dalya. – Lugansk, 2014. – Vip. № 4(16). – S. 151-157.

5. Voloshin, O. F., Mashenko S. O., (2010) “Modeli ta metodi priynyattya rishen : navch. posib. dlya stud. vish. navch. zakl” [Decision-making models and methods: teaching. manual for students higher education closing], VidavnicHO-poligrafichnij centr , Kiyivskij universitet, 336 p.

6. Zhierdev M.K., Savran V.O.(2016) Kontseptualni zasady metodu diahnostuvannya suchasnykh tsyfrovyykh typovykh elementiv zaminy po formatnym chastotam perekhidnoho protsesu v shyni zhyvlennia [Conceptual foundations of the method of diagnosing modern digital typical replacement elements by the format frequencies of the transition process in the power bus], Collection of scientific works of the Military Institute of Taras Shevchenko Kyiv National University.K. VIKNU, Issue 52, pp. 20-32.

7. Zherdiev, M.K., Kuzavkov, V.V. (2015), “Uzahal'нення резул'татив форсованых vyprobuvan' radioelektronnykh komponentiv” [Summary of results of the forced test of radio-electronic components], Zbirnyk naukovykh prats' Vijs'kovoho instytutu Kyivs'koho natsional'noho universytetu imeni Tarasa Shevchenka, No. 49, Kyiv, pp. 40-48.

8. Zhyrov H.B.(2005),“Uzahalnena diahnostychna model tsyfrovoi VIS dlia enerhostatychnoho metodu diahnostuvannya” Generalized diagnostic model of digital VIS for the energy-static method of diagnosis], Bulletin of KNU named after Taras Shevchenko. Ser Military special sciences. K.: Kyiv. University, No.11 pp 55-60.

9. Kredencer B. P.(2013) “Nadijnist sistem z nadlishkovistyju: metodi, modeli, optimizaciya” [Reliability of systems with redundancy: methods, models, optimizatio], Nac. tehn. un-t Ukrayini "Kiyiv. politehn. in-t, Feniks, 341 p.

10. Laneckij B. N., Lukyanchuk V.V., (2011) “Adaptivnoe upravlenie tehničeskim sostojaniem i nadezhnostju slozhnyh tehničeskix sistem v usloviyah resursnyh ogranichenij”, [Adaptive control of the technical condition and reliability of complex technical systems under resource constraints], Sistemi ozbrojenija i vijskova tehnika, HUPS, Vip. 2 (26) pp. 149–151.

11. Zubaryev V.V., Kovtunenکو A. P., Raskin L. G. (2007) “Matematicheskie metody ocenki i prognozirovaniya tehničeskix pokazatelej ekspluatacionnyh svojstv radioelektronnyh sistem” [Mathematical methods for assessing and predicting the technical indicators of the operational properties of radio electronic systems], Knizhnoe izd-vo NAU, Kiev. 296 p.

12. Kulik I. V. (2013), Means of automated evaluation of indicators of effectiveness of strategies of technical maintenance and repair of systems of radio-electronic complex. Extended abstract of candidate’s thesis. Lviv: ONTU [in Ukrainian].

13. Shkulipa P.A., Zherdyev M.K., Lyenkov S.V., Gunchenko Yu.O. (2012) “Shlyahi i metodi pidvishennja efektyvnosti avtonomnih avtomatizovanih sistem tehničnogo diagnostuvannya radioelektronnih prystroyiv specialnogo pryznachennja ” [Ways and methods of increasing the efficiency of autonomous automated systems technical diagnostics of special purpose radio electronic devices], Zhurnal Suchasna specialna tehnika, № 3 (30). pp 69 – 74.

14. Shkulipa P.A. (2012) “Osnovni napryamki rozvitku avtomatizovanih sistem tehničnogo diagnostuvannya ob’ektiv radioelektroniki” [The main directions of the development of automated systems for technical diagnostics of radio electronics objects], Visnik Hmelnickogo nacionalnogo universitetu. Tehnichni nauki, Hmelnickij, № 6. pp.192 – 194.

**Doctor of Technical Sciences Hlukhov S.V.,
PhD Gakhovych S.V.,
PhD Okhramovych M.M.,
PhD Koval M.O.,
PhD Kravchenko O.I.**

MODEL OF A DIGITAL STANDARD REPLACEMENT ELEMENT WITH INTEGRATED USE OF DIAGNOSTIC INFORMATION SOURCES

The paper presents the procedure for organizing the study of technical condition control in modern radio-electronic equipment, which is made on the element base of the fourth and fifth generations. The complex use of several methods of performance control is shown in digital standard replacement elements containing microcontrollers and calculated values of the output variables of the generalized module that correspond to real physical objects and could be used in the mathematical model of a digital standard replacement element. To reduce the number of test points in the diagnosis of digital standard replacement elements, as a source of diagnostic information used the parameters of the energy-dynamic process that occur in the power bus of digital elements when they switch from one logical state to another. This makes it possible to reduce the number of control points to one (power bus), while obtaining diagnostic information about technical condition of each logical element.

The study is divided into four stages, which include:

- analysis of the internal structure and allocation of subsystems in a typical replacement element;
- decomposition of a typical replacement element and allocation of groups of variables;
- synthesis of the structural and functional model of a digital typical replacement element;
- simulation of the process of interaction of the developed mathematical model of the generalized microcontroller module with the external environment, analysis of the degree of adequacy of the model to real physical objects. In summary, the structural-functional model of a digital typical replacement element, which provides for the integrated use of two sources of diagnostic information: output reactions and characteristics of the energy-dynamic process in the power bus digital thesis.

Keywords: energy-dynamic diagnostic method, radio-electronic equipment, mathematical model, source of diagnostic information, typical replacement element.