

д-р техн. наук Кузавков В. В. ORCID: 0000-0002-0655-9759 (ВІТІ)
Погребняк С. В. ORCID: 0000-0002-7902-9847 (ВІТІ)
Михайлюк С. С. ORCID: 0009-0001-5665-8866 (ВІТІ)

ВАРІАНТ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО КОНДЕНСАТОРА МЕТОДОМ БЕЗКОНТАКТНОЇ ДІАГНОСТИКИ

Під час повномасштабної війни в Україні сили оборони почали отримувати засоби радіоелектронного озброєння від країн-партнерів. Зразки озброєння, які надаються, здебільшого не нові та мають певний ресурс напруження та (або) терміни зберігання. Внаслідок цього загострилось питання діагностування технічного стану таких зразків. У статті наведено варіант визначення технічних характеристик одного з низьконадійних радіоелектронних компонентів (електролітичного конденсатора) сучасних імпульсних блоків живлення радіоелектронного устаткування. Розглядаються практичні способи та вимірювальні прилади для діагностування та типові проблеми, з якими доводиться зіткнутися під час проведення робіт з визначення технічного стану об'єкта контролю. Описано основні фізичні властивості, які покладено в основу запропонованого методу визначення технічного стану та представлені еквівалентної схеми датчика діагностичного сигналу.

Представлений метод базується на використанні безконтактного індукційного датчика. Визначення технічного стану радіоелектронного компоненту здійснюється на основі аналізу вихідних сигналів функціональних вузлів, які містять даний компонент. Використання запропонованого методу вимагає наявності еталонного сигналу (відповіді на тестовий сигнал), з яким порівнюється сигнал, отриманий під час перевірки. Запропоновано можливий варіант використання спеціального програмного забезпечення, яке надає можливість наочної презентації отриманої діагностичної інформації та її візуалізації в різних видах. Описано основні технічні характеристики обладнання, що використовується.

Спираючись на потенційну ефективність, інформативність та безпечність запропонованого способу, обґрунтовано доцільність непринципової зміни конструктиву об'єкта контролю з метою застосування запропонованого методу як безпосередньо в блоках монтованих плат та схем, так і на випробувальних стендах.

Ключові слова: безконтактний індукційний метод, датчик діагностичного сигналу, гістограма, низьконадійний елемент, діагностичний параметр.

V. Kuzavkov, S. Pohrebniak, S. Mykhailiuk Variant of determining the technical condition of an electrolytic capacitor by contactless method.

In the course of the full-scale war in Ukraine, the defense forces began to receive radio-electronic weapons from partner countries. The samples of weapons that are provided are mostly not new and have a certain service life and (or) shelf life. As a result, the issue of diagnosing the technical condition of such samples became more acute.

The article provides a variant of determining the technical characteristics of one of the low-reliability radio electronic components (electrolytic capacitor) of modern pulsed power supply units of radio electronic equipment. Practical methods and measuring devices for diagnosis and typical problems that have to be faced during work on determining the technical condition of the control object are considered.

The main physical properties are described, which are the basis of the proposed method of determining the technical condition and the presented equivalent circuit of the diagnostic signal sensor. Calculations of empirical studies and assumptions expressed in previous works of the authors have been mathematically confirmed.

The presented method is based on the use of a non-contact induction method. The determination of the technical condition of the radio-electronic component is carried out on the basis of the analysis of the output signals of the functional nodes that contain this component. The use of the proposed method requires the availability of a reference signal (response to the test signal) with which the signal obtained during the test is compared.

Based on the potential effectiveness, informativeness and safety of the proposed method, the expediency of a non-fundamental change in the design of the control object is substantiated, in order to effectively apply the proposed method both directly in the blocks of mounted boards and circuits and on test stands.

Keywords: non-contact induction method, diagnostic signal sensor, histogram, low-reliability element, diagnostic parameter.

Постановка завдання в загальному вигляді. Збройна агресія Росії проти України спричинила новий виток модернізації та переоснащення Збройних сил України та інших військових формувань на новітні зразки озброєння та військової техніки. До сил оборони України надходить все більша кількість радіоелектронної апаратури. Значна кількість цих зразків перебувала на базах та складах тривалого зберігання. Поставки західного озброєння

від країн-партнерів обумовили загострення питання технічного діагностування зразків радіоелектронного озброєння. Виконання завдань за призначенням підрозділів та частин значною мірою залежить від якості та надійності зразків радіоелектронного озброєння, яким вони укомплектовані. Враховуючи специфіку та масштабність театру бойових дій, значна увага приділяється надійності та захищеності системи зв'язку та координації дій підрозділів. Абсолютно всі підрозділи використовують засоби радіоелектронної апаратури (засоби зв'язку, планшети, ноутбуки, системи відеоспостереження, комплекси керування БПЛА і т. ін.). Всі ці засоби мають блоки живлення в тому чи іншому варіанті виконання. Однак термін експлуатації таких блоків живлення в рази перевищує «терміни життя» низьконадійних радіоелектронних компонентів (РЕК). Процеси «старіння» та «зношування» РЕК мають різну природу та інтенсивність. Це обумовлено, перш за все, різними початковими фізичними властивостями РЕК та умовами експлуатації. Отже, важливим є моніторинг стану РЕК як фундаментальної процедури оцінки працездатності радіоелектронного озброєння, що забезпечує прогностичний ремонт для гарантування стабільної роботи.

Аналіз публікацій за темою дослідження. Проблемі визначення технічного стану РЕК присвячено велика кількість робіт як вітчизняних, так і закордонних вчених [1–6; 21–24]. Існуюча система технічного діагностування, яка використовується в Збройних силах України, застаріла і не повною мірою відповідає вимогам сьогодення [7]. Як відомо, причиною переважної більшості відмов радіоелектронної апаратури є несправність низьконадійних елементів, до яких відносять і електролітичні конденсатори [8; 9; 21–27]. Різноманітні методи визначення технічного стану РЕК стали об'єктами досліджень багатьох наукових шкіл, які працюють в галузі технічної діагностики [10–12; 20–24; 30–32]. Роботи, опубліковані за останній час, зосереджені на підвищенні надійності електролітичних конденсаторів в ланцюгах постійного струму та пошуку методів підвищення часу життя електролітичних конденсаторів [25; 26]. Однак пошук «неінвазивного» варіанта визначення технічного стану РЕК є актуальним з огляду на формфактор та специфіку апаратури подвійного призначення, що використовується в Збройних силах України. Існуючі методи визначення технічного стану передбачають втручання в об'єкт контролю та необхідність вилучення (випаювання) електролітичного конденсатора для правильного (коректного) визначення його технічного стану. Це вимагає великої витрати часу, наявності спеціальних інструментів та пристроїв, а також специфічної навченості персоналу. Саме тому все більшу увагу міжнародна наукова спільнота приділяє безконтактним онлайн методам визначення технічного стану електролітичних конденсаторів [27–30]. Автори цих робіт намагаються обґрунтувати можливість визначення технічного стану електролітичних конденсаторів в ланцюгах постійного струму безконтактними методами та пропонують варіанти різних схемотехнічних рішень вбудованих систем контролю для вирішення поставлених задач. При чому запропоновані системи контролю передбачають наявність того чи іншого периферійного устаткування (осцилографи, мікроконтролери, ESR-вимірювачі, LCR-вимірювачі та мікрокомп'ютери зі спеціалізованим програмним забезпеченням).

Метою статті є обґрунтування можливості визначення технічного стану електролітичних конденсаторів безконтактним індукційним методом в імпульсних блоках живлення радіоелектронного обладнання без необхідності випаювання конденсаторів та використання спеціалізованого периферійного устаткування.

Виклад основного матеріалу. Як відомо, близько 30 % всіх несправностей електронної апаратури викликана відмовами електролітичних конденсаторів [31]. Пошук несправних низьконадійних елементів за допомогою тестера чи вимірювального пристрою ємності має ряд недоліків та обмежень. Це обумовлюється необхідністю випаювання «підозрюваного» конденсатора та вимірювання його ємності. Ємність несправного конденсатора може відрізнитися від номінальної на незначну величину, а значення такої характеристики як ESR (Equivalent Series Resistance – еквівалентного послідовного опору) може бути досить великим. Саме ESR є важливішим параметром для вимірювання під час пошуку несправного конденсатора. У більшості випадків це конденсатори імпульсних блоків

живлення в апаратурі подвійного призначення, імпульсних блоків живлення комп'ютерів, імпульсних перетворювачах на материнських платах, драйвери двигунів, малі розгортки та ін. У цих місцях конденсатори піддаються значному нагріванню і швидше виходять з ладу – «висихають».

Існуючі методики діагностування електролітичних конденсаторів використовують різноманітні мультиметри, або спеціалізовані цифрові тестери. Наприклад, пристрій для вимірювання ESR та ємності конденсаторів Mega328 LCR-T4. Відповідно до характеристик, пристрій налаштований на формування синусоїдального струмі частотою 62,5 кГц. Незважаючи на те, що частоти імпульсних блоків живлення та перетворювачів лежать у діапазоні 20–100 кГц, форма перевірного сигналу не відповідає формі сигналу у ланцюгах реальних схем живлення.

Окрім того, вимірювання проводяться без демонтажу конденсатора з штампованої плати шляхом контактного підключення вимірювального пристрою. Для імпульсних блоків живлення напруга у окремих частинах схеми досягає рівня 400 В і конструктивно передбачаються відповідні обмеження до елементів схеми. Тому, для отримання доступу до певних радіокомпонентів іноді необхідно виконати повну розборку пристрою.

Слід зазначити також, що алгоритм розрахунку ESR на базі вимірної напруги не може повністю враховувати нелінійності, пов'язані з ненульовим вихідним опором генератору тестового сигналу, а також пропорції зміни напруги на низькоомних дільниках. Отже, неможливо забезпечити необхідну точність та лінійність вимірювань у всьому діапазоні.

Тому в статті пропонується використовувати метод безконтактного діагностування. Цей пристрій діагностування складеться з індукційного датчика [14; 15] (роботу якого наведено нижче), аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та спеціалізованого програмного забезпечення. Рішення про технічний стан приймається за результатами порівняння зразкового (еталонного) сигналу схеми з отриманими під час перевірки за детермінованим підходом розпізнання [19]. Використовуючи метод статистичних рішень при відомих граничних значеннях x_0 параметра x об'єкта контролю, приймається рішення про працездатний або непрацездатний стан. Параметром x може виступати як ємність конденсатора (C), так і його еквівалентний послідовний опір (ESR).

Граничними значеннями для ємності прийнято вважати її зменшення більш ніж на 20 %, а граничним значенням ESR є його збільшення більш ніж у 2 рази від номінальних значень [32]. У такому випадку правило прийняття рішення матиме вигляд (1) [19]:

$$\text{при } x < x_0 \quad x \in D_1; \quad x > x_0 \quad x \in D_2. \quad (1)$$

Для значень, які можуть набувати параметри x в нашому випадку, вираз (1) матиме вигляд (2), (3):

$$x < 2x \quad x \in D_1; \quad x > 2x \quad x \in D_2, \quad (2)$$

де x – параметр ESR;

D_1 – справний стан;

D_2 – дефектний стан.

$$x > 0,2x \quad x \in D_1; \quad x < 0,2x \quad x \in D_2, \quad (3)$$

де x – параметр C ;

D_1 – справний стан;

D_2 – дефектний стан.

З метою мінімізації кількості помилкових рішень при оцінці стану ОК виконання нерівностей (2) та (3) одночасно дає максимальну щільність ймовірного розподілу.

Розглянемо конструкцію та принцип функціонування датчика [16], який використовується для зняття діагностичної інформації (рис. 1). Довкола кожного з активних провідників виникає магнітне поле. Щоб отримати параметри поля і перетворити їх в електричний сигнал, необхідно провід пропустити крізь магнітний сердечник з обмоткою. Як наслідок, цей провід виконує роль первинної обмотки (з одного витка), вторинна обмотка може мати більшу кількість витків. Наведена конструкція є струмовим трансформатором, напруга та форма сигналу у вторинній обмотці якого пропорційна зміні струму первинної обмотки [17].

Як відомо, всі трансформатори складаються з кількох котушок індуктивності, пов'язаних загальним магнітним полем.

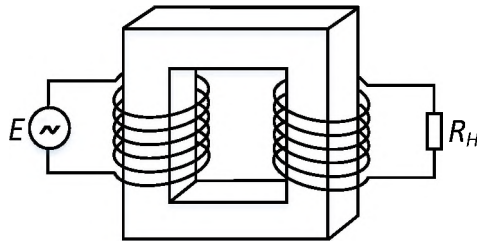


Рис. 1. Датчик діагностичної інформації

Котушка, до якої прикладається джерело змінної напруги E , називається первинною обмоткою. Інші називаються вторинними, до них підключається навантаження R_H .

Принцип роботи трансформатора виходить із закону електромагнітної індукції (закону Фарадея). Напруга первинної обмотки E_1 (напруга підключеного джерела) пов'язана з магнітним потоком Φ , який проходить через кожен виток первинної обмотки, співвідношенням:

$$E_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

де w_1 – число витків первинної обмотки.

Аналогічно, ЕРС, наведена у вторинній обмотці з числом витків w_2 , має вигляд:

$$E_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Звідси витікає, що коефіцієнт передачі напруги або коефіцієнт трансформації n визначається лише відношенням витків:

$$n = \frac{E_2}{E_1} = \frac{w_2}{w_1}.$$

Розглянемо процеси, які відбуваються в трансформаторі струму (рис. 2).

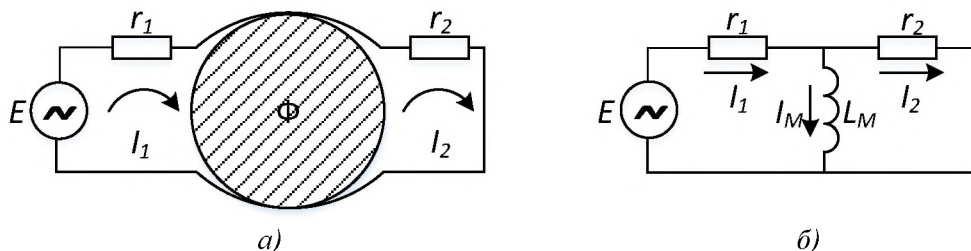


Рис. 2. Трансформатор:
а – з перекриттям обмоток; б – його еквівалентна схема

Нехай кожна обмотка має індуктивність L . Розташуємо їх так, щоб магнітний потік Φ , який створюється первинною обмоткою, повністю охоплювався вторинною обмоткою.

У цьому випадку коефіцієнт зв'язку обмоток дорівнює одиниці. Як відомо, падіння напруги на індуктивності пов'язане з магнітним потоком наступним співвідношенням:

$$U_1 = \frac{d\Phi}{dt} = L \frac{dI}{dt},$$

де I – струм, якій протікає через індуктивність.

Відповідно до 2-го закону Кірхгофа:

$$E = I_1 r_1 + L \frac{dI_1}{dt} - M \frac{dI_2}{dt} = I_1 r_1 + L \left(\frac{dI_1}{dt} - \frac{dI_2}{dt} \right) \text{ для } M = L,$$

$$E_0 = I_2 r_2 + L \frac{dI_2}{dt} - M \frac{dI_1}{dt} = I_2 r_2 + L \left(\frac{dI_2}{dt} - \frac{dI_1}{dt} \right) \text{ для } M = L,$$

де M – це взаємна індуктивність, тобто індуктивність вторинної обмотки, «видима» з боку первинної і навпаки; $M \frac{dI_2}{dt}$ – напруга, яка наводиться вторинною обмоткою в первинному контурі.

Взаємна індуктивність M визначається через коефіцієнт зв'язку k (при $k=1$ і $L_1=L_2=L_3$ отримуємо $M=L$):

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}.$$

Таким чином, отримаємо еквівалентну схему датчика діагностичного сигналу. До r_1 входить внутрішній опір джерела, опір проводу обмотки й т. ін., а до r_2 – опір навантаження разом з опором проводів та іншими втратами. Якщо нехтувати величиною r_1 , то видно, що напруга джерела повністю виявляється прикладеною до навантаження і збігається за величиною (в разі $w_1 = w_2$) і фазою.

Трансформатор як індуктивний елемент присутній на схемі у вигляді паралельної індуктивності L_m , яка називається індуктивністю намагнічування і в нашому випадку дорівнює L . Напруга джерела, прикладена до трансформатора, викликає струм намагнічування, який змінюється, а зміна струму, у свою чергу, створює напругу на вторинній обмотці. Таким чином, головна умова роботи трансформатора – наявність струму, який змінюється. Швидкість зміни струму пропорційна величині миттєвої напруги на обмотках.

Датчик діагностичної інформації можливо виконати на броньованому, або кільцевому феритовому сердечнику з високою магнітною проникністю, який розмикається. Таке виконання діагностичного датчика дозволяє переносити його від одної точки виміру до іншої, не втручаючись в роботу самого об'єкта контролю (ОК), яким є імпульсний блок живлення.

Сутність вимірювань [14; 17] полягає у дослідженні параметрів сигналу, отриманого безконтактним методом з перемички між функціональними вузлами об'єкта контролю в умовах реального функціонування ОК.

Розглянемо принцип функціонування пристрою визначення технічного стану конденсаторів безконтактним індукційним методом на прикладі простих радіоелектронних чотириполосників. До таких пристроїв відносимо широко розповсюджені диференціюючий (рис. 3) та інтегруючий (рис. 4) [18] ланцюги елементів цифрової схемотехніки.

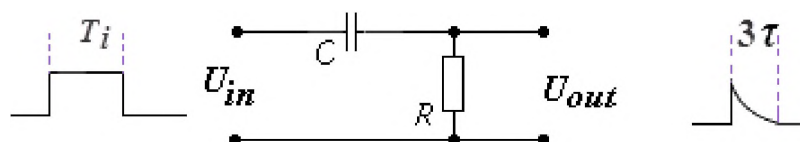


Рис. 3. Диференціюючий ланцюг

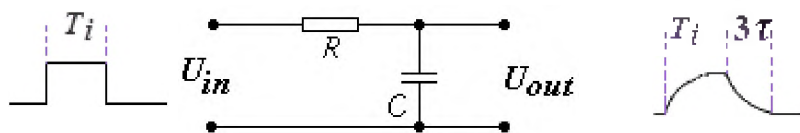


Рис. 4. Інтегруючий ланцюг

На рисунках 3, 4 зображено вхідний сигнал (у вигляді прямокутного імпульсу) та реакція ланцюгів на нього. В обох випадках форма та часові параметри вихідного сигналу залежать від чисельних значень складових радіоелектронних компонентів (R , C). Вважаємо, що величина R (в Ом) є незмінною в часі, а часові характеристики перехідних процесів залежать виключно від значення ємності C (в Ф). У такому випадку справедливо стверджувати, що зміна форми вихідного сигналу залежить від зміни ємності конденсатора.

Наведені графіки добре відомі і зазвичай спостерігаються за допомогою осцилографа. У запропонованому методі безконтактного індукційного діагностування сигнал, отриманий за допомогою датчика діагностичних сигналів (ДДС), надходить на АЦП. Аналого-цифрове перетворення здійснює 16-розрядний (65536 кодових позицій) АЦП з частотою квантування 44 кГц. Кількість вимірювань за секунду становить біля 3×10^9 , отже при амплітуді вхідного аналогового сигналу 100 мВ зазначені кількісні показники є достатніми для вирішення основних завдань технічного діагностування.

Подальша обробка сигналу виконується спеціальним програмним забезпеченням. Як спеціалізоване програмне забезпечення (СПЗ) використано ліцензійний програмний пакет Adobe Audition (Cool Edit Pro, Wave Lab Pro). Особливістю зазначеного СПЗ є можливість не лише візуалізувати процеси, які відбуваються в об'єкті контролю, а й накопичувати відповідну інформацію з подальшою статистичною обробкою. Внаслідок обробки інформації отримуємо впорядкований розподіл енергії дискретних відліків у вихідному сигналі.

Вказане СПЗ дозволяє виконати декілька способів аналізу отриманої цифрової інформації – фазовий (Phase Meter), частотний (Frequency Analysis) та амплітудний (Amplitude Statistics), кожен з яких має відповідний спосіб візуалізації. Наявність інформативного способу представлення діагностичної інформації дозволяє значно спростити та прискорити її обробку, агрегацію та прийняття відповідних рішень.

На рисунку 5 представлено результати статистично опрацьованої інформації з ДДС для різного стану конденсатора в об'єкті контролю.

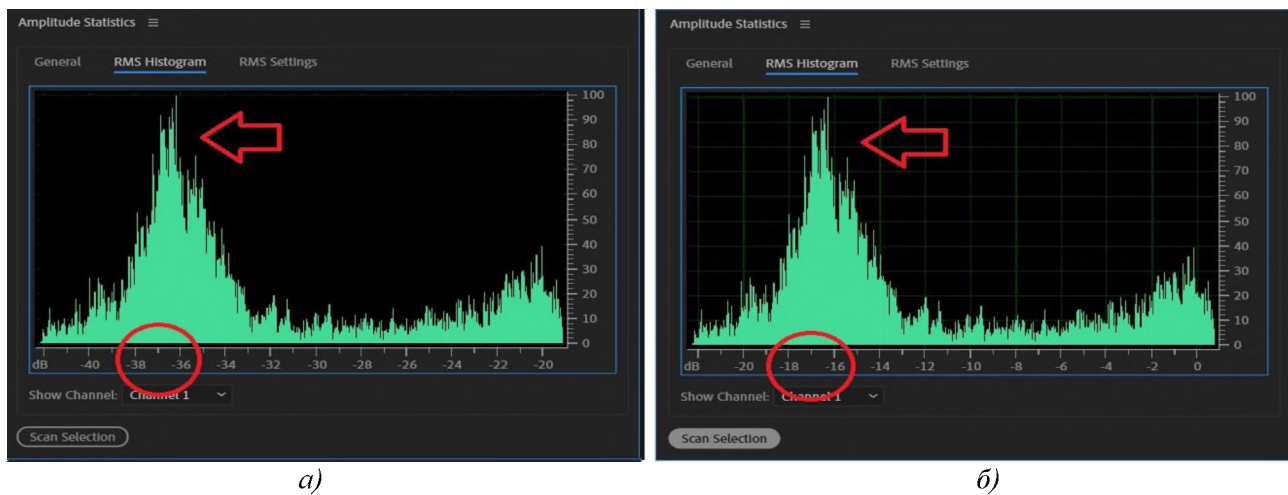


Рис. 5. Гістограма (опрацьований сигнал ДДС):
 а – еталонний сигнал; б – сигнал, отриманий під час контролю

Обидві гістограми не лише візуалізують зміну стану об'єкта контролю, а й містять кількісну інформацію про енергетичну наповненість сигналу з ДДС. На осі абсцис відкладено значення енергетичного рівня в dB, а по осі ординат – кількість таких відліків. Результати, отримані з еталонного ОК (рис. 5, а), відображають максимальне значення вибірки, яке припадає на діапазон -38...-36 dB. При визначенні стану об'єкта контролю енергетичний максимум вибірки припадає значення -18...-16 dB (рис. 5, б). Що свідчить про відмінність у 20 dB. Зростання енергії обумовлено деградацією якості параметрів електролітичного конденсатора (параметри резистора вважатимемо незмінними в часі).

Для радіоелектронних компонентів особливо важливих зразків обладнання процедура прийняття рішення про технічний стан об'єкта контролю відбувається незалежно від оператора засобами автоматизованої системи діагностування (АСД), як запропоновано в [28–30], при цьому база даних АСД при кожному запуску процедури контролю поповнюється додатковими сигнатурами стану конденсатору, відповідність яких очікуваним результатам свідчить про належний (або неналежний) технічний стан об'єкта контролю з точки зору апаратної складової, а стрибкоподібні відхилення в сигнатурі відгуку свідчатимуть про високу імовірність виходу устаткування з ладу найближчим часом.

Висновки. У роботі представлено фізичні основи функціонування діагностичного датчика, описано його властивості, які дозволяють використовувати його для вирішення завдань контролю технічного стану конденсатора.

Представлений метод позбавлений недоліків існуючих систем контролю та має ряд переваг, до яких можна віднести:

– практична цінність запропонованого способу полягає в тому, що в реальному часі швидко та без втручання в схемотехнічні рішення об'єкта контролю безпосередньо на місці експлуатації можливо визначати фактичний технічний стан;

– економічна доцільність використання даного методу не потребує розробки СПЗ. Запропоновані в цій статті ліцензійні пакети СПЗ володіють необхідними характеристиками для обробки знятої з ДДС інформації, її візуалізації та зберігання. Для побудови автоматичної системи діагностування можна використовувати існуючі нейронні мережі, розроблені для схожих схемотехнічних рішень;

– простота використання, що не потребує спеціального навчання оператора для проведення технічного діагностування та можливість визначення технічного стану за даними лише одного діагностичного параметра.

Напрямок подальших досліджень пропонується розробка еталонних значень граничних параметрів ємності та послідовного еквівалентного опору для різних номіналів ємності електролітичних конденсаторів. Шляхом проведення форсованих випробувань статистично повної вибірки планується отримати набір значень ємності з відповідними значеннями енергетичних рівнів, для різних часових відрізків експлуатації електролітичних конденсаторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жердев М. К., Вишнівський В. В., Сазонов Ю. І., Жиров Г. Б. Удосконалення системи ремонту пристроїв, які містять цифрові елементи // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Шевченка. Випуск № 1. Київ: ВІКНУ, 2005. С. 51–57.
2. Тюрин С. Ф., Громов О. А. Разработка контрольных и диагностических тестов для КМОП элементов с избыточным базисом // Приволжский научный вестник. Ижевск: ИЦНП, 2013. Вип. 1 (17). С. 13–21.
3. Шевченко В. В. Визначення технічного стану цифрових типових елементів заміни за допомогою електромагнітного методу діагностування // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2015. № 1. С. 136–139.
4. Волков Ю. В. Системы технического диагностирования, автоматического управления и защиты: учеб. пособ. Ч. 1. СПб: ВШТЭ СПбГУПТД, 2016. 115 с.
5. Кравчук Р. В., Стецюк О. І., Чешун В. М. Функціональний підхід в діагностуванні цифрових процесів і елементів пам'яті // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Хмельницький національний університет. 2018. Вип. 2. С. 106–110.
6. H. Czichos, ed., Handbook of Technical Diagnostics, Springer Heidelberg, New York, 2013 // URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25850-3> (дата звернення: 28.03.2023).
7. Глухов С. І. Аналіз існуючих методів діагностування типових елементів заміни радіоелектронних засобів озброєння та обґрунтування необхідності використання інформаційних технологій при їх застосуванні // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Шевченка. 2016. Вип. 52. С. 12–19.
8. Погребняк С. В. Аналіз основних несправностей новітньої радіоелектронної зброї // Збірник тез доповідей науково-практичної конференції НАНУ. Львів. 2020. С. 164.
9. Ленков С. Особливості моделювання відмов відновлюваного складного технічного об'єкта з ієрархічною структурою / С. Ленков та ін. // Східноєвропейський журнал передових технологій. 2017. Вип. 4. С. 34–42.

10. Жиров Г. Б. Методика контролю технічного стану цифрових пристроїв енергостатичним методом на місці дислокації об'єктів РЕЗО // Збірник наукових праць Одеського ордену Леніна ін-ту Сухопутних військ. 2005. Вип. 11. С. 55–61.
11. Жердев М. К., Вишнівський В. В., Жиров Г. Б. Контроль технічного стану цифрових пристроїв енергостатичним методом // Зб. наук. пр. ВІПІ НТУУ «КПІ». 2005. № 1. С. 51–57.
12. Вишнівський В. В., Гахович С. В., Катін П. Ю., Крущенко В. В. Пристрій для діагностування цифрових ТЕЗ з використанням енергодинамічного процесу // Вісник Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Шевченка. 2003. Вип. № 6. С. 70–74.
13. Про затвердження Положення про технічне забезпечення зв'язку в Національній гвардії України: наказ МВС від 06.11.2015 № 1384 // Верховна Рада України: офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1499-15#n12> (дата звернення: 28.03.2023).
14. Вишнівський В. В., Жердев М. К., Креденцер Б. П., Кузавков В. В., Редзюк Є. В. Безконтактний індукційний метод діагностики радіоелектронних блоків // Збірник наукових праць Військового інституту КНУ ім. Т. Шевченка. 2013. Вип. 43. С. 17–23 // Національна бібліотека ім. В.І. Вернадського. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpvkn_2013_43_5 (дата звернення: 28.03.2023).
15. Погребняк С. В. Індуктивний метод як перспективний спосіб діагностики технічного стану вторинних джерел живлення // Modern Scientific research Achievements innovation and development prospects: VIII International scientific and practical conference, Berlin, Germany, 23–25.01.2022. P. 258–260.
16. Кузавков В. В., Гайдур Г. І., Серих С. А., Редзюк Є. В. Безконтактний індукційний метод визначення технічного стану цифрового блоку: розрахунок потужності випромінювання провідника // Зв'язок. Державний університет зв'язку. Київ, 2016. Вип. 1. С. 32–39.
17. Сегеда М. С., Мазур Т. А. Математичне моделювання вільних коливань в обмотці трансформатора при різних формах імпульсу напруги // Інтелектуальні енергетичні системи (ESS13): матеріали 3 Міжнародної науково-технічної конференції, м. Мукачеве, 10–14 червня 2013 р. 235 с.
18. Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Загарій Г. І., Соболев Ю. В. Лінійні електричні схеми пристроїв автоматики та зв'язку: навч. пос. Харків: УкрДАЗТ, 2007. 285 с.
19. Аврутов В. В., Бурау Н. И. Надежность и диагностика приборов и систем НТУУ «КПІ». Киев, 2014. 158 с.
20. Yu Tack Kim, Simulation study on the lifetime of electrochemical capacitors using the accelerated degradation test under temperature and voltage stresses / Yu Tack Kim, Kwang-Bum Kim, Yoo Eo Hyun, Ick-Jun Kim, Sunhye Yang // Microelectronics Reliability, Volume 55, Issue 12, Part B, 2015, pp. 2712–2720.
21. Чжао, З., Даварі, П., Лу, В., Ван, Х., Блайберг Ф. Огляд методів моніторингу стану конденсаторів у програмах ланцюгів постійного струму. IEEE Trans. Силовий Електрон. 2021. № 36. 3692–3716.
22. Бу, Ю., Ду, Х. Метод моніторингу стану VEN конденсаторів ланцюгів постійного струму для перетворювачів енергії. IEEE Trans. Пром Електрон. 2019, 66, 1296–1306.
23. Мiao, В., Лю, Х., Лам, КН, Понг, РWT Моніторинг стану електролітичних конденсаторів у підвищуючих перетворювачах за допомогою магнітних датчиків. IEEE Sens. J. 2019, 19, 10393–10402.
24. Ю, Ю., Чжоу, Т., Чжу, М., Ху Д. Діагностика несправностей і прогнозування терміну служби алюмінієвих електролітичних конденсаторів постійного струму, які використовуються в трифазних перетворювачах змінного/постійного/змінного струму // Матеріали Другої Міжнародної конференції 2012 року з приладобудування, вимірювань, комп'ютерів, зв'язку та управління, Харбін, Китай, 8–10 грудня 2012 р. С. 825–830.
25. Н. Wang і F. Blaabjerg, «Надійність конденсаторів для програм постійного струму в силових електронних перетворювачах – огляд», IEEE Trans. Інд. При., Вип. 50, № 5, 2014. С. 3569–3578.
26. Н. Wang, P. Davari, Н. Wang, D. Kumar, F. Zare, and F. Blaabjerg “Lifetime estimation of dc-link capacitors in adjustable speed drives under grid voltage unbalances,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, № 5. 2019, pp. 4064–4078.
27. W. Miao, X. Liu, K. H. Lam, and P. W. T. Pong, “Condition monitoring of electrolytic capacitors in boost converters by magnetic sensors,” IEEE Sens. J., vol. 19, № 22. 2019, pp. 10393–10402.
28. L. Ren and C. Gong, “Online estimation scheme of output capacitor’s ESR and $\tan\delta$ for Buck converter”, IET Power Electron., vol. 12, № 11. 2019, pp. 2978–2986.
29. A. M. R. Amaral and A. J. M. Cardoso, “On-line fault detection of aluminum electrolytic capacitors, in step-down dc-dc converters, using input current and output voltage ripple,” IET Power Electron., vol. 5, № 3. 2012, pp. 315–322.
30. Н. Givi, E. Farjah, and T. Ghanbari, “A comprehensive monitoring system for online fault diagnosis and aging detection of non-isolated dc–dc converters’ components,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, № 7. 2019, pp. 6858–6875.
31. Н. Wang, M. Liserre, and F. Blaabjerg, “Toward reliable power electronics: Challenges, design tools, and opportunities,” IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 7, № 2. 2013, pp. 17–26.
32. Hoanglong Dang, Hyejin Park, Sangshin Kwak, Seungdeog Choi DC-Link Electrolytic Capacitors Monitoring Techniques Based on Advanced Learning Intelligence Techniques for Three-Phase Inverters MDPI. Machines. 2022, 10, 1174. URL: <https://www.researchgate.net/publication/366115422> (дата звернення: 14.04.2023).