

УДК 621.3

д-р. техн. наук, професор Кузавков В. В. ORCID: 0000-0002-0655-9759 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Ланко А. В. ORCID: 0009-0001-1124-1526 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ІНДУКЦІЙНОГО МЕТОДУ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТА КОНТРОЛЮ

У сучасних умовах спостерігається широке застосування технічних систем подвійного призначення іноземного виробництва, зокрема у Збройних Силах. Для таких систем об'єктивно існує обмеження вхідної технічної інформації.

Отже, важливим завданням для інженерно-технічного складу при організації системи обслуговування та експлуатації зазначених систем та об'єктів стає пошук нових та удосконалення існуючих підходів для визначення показників надійності радіоелектронного обладнання, яке отримано та знаходиться в експлуатації.

Один з інструментів, який надає можливість часткового розв'язання цього завдання, є застосування безконтактного індукційного методу.

У статті наведено сутність та опис безконтактного індукційного методу, а також варіант його застосування для визначення одного з параметрів надійності об'єктів радіоелектронного обладнання. У роботі розглядається параметр довговічності радіоелектронного обладнання. Також запропоновано інженерну методику з визначення довговічності об'єкта контролю. Рішення приймається за результатами обробки даних, отриманих безконтактним індукційним датчиком, та методики оцінки ресурсу об'єкта контролю при невідомому напрацюванні від початку експлуатації. Застосування безконтактного індукційного датчика дозволило отримати та оцінити чисельні зміни параметрів найбільш низько надійного радіоелектронного компонента у складі радіоелектронного обладнання.

Запропоновані рішення для визначення довговічності радіоелектронного обладнання з обмеженою вхідною інформацією розглядаються вперше. Поставлена задача набуває особливого значення в сучасних умовах під час використання силами оборони засобів радіоелектронного обладнання від країн-партнерів (здебільшого не нового, з певним ресурсом напрацювання та/або зберігання). Все вищесказане визначило актуальність та важливість науково-технічної задачі створення (розробки) інженерних методик визначення надійності зразків радіоелектронного обладнання за окремими показниками.

Зазначається, що запропонований підхід може бути розвинений шляхом створення інших інженерних методик визначення надійності радіоелектронного обладнання за іншими окремими показниками, їхнього комплексування для прийняття рішення про надійність об'єкта контролю та визначення умов технічного обслуговування.

Ключові слова: безконтактний індукційний датчик, надійність, діагностична інформація, радіоелектронне обладнання, ресурс напрацювання, довговічність.

V. Kuzavkov, A. Lanko. Application of non-contact induction method in determining reliability indicators of the control object

In modern conditions, there is a widespread use of dual-purpose technical systems of foreign production, including in the armed forces. For such systems, there is an objective limitation of incoming technical information.

Therefore, an important task for the engineering and technical staff, when organizing the system of maintenance and operation of these systems and facilities, is to find new and improve existing approaches to determine the reliability of radio electronic equipment received and in operation.

One of the tools that makes it possible to partially solve this problem is the use of a non-contact induction method.

The article presents the essence and description of the non-contact induction method and a variant of its application for determining one of the reliability parameters of radio electronic equipment. The paper considers the parameter of radio electronic equipment durability. Also, an engineering methodology for determining the durability of the object under control is proposed. The decision is made based on the results of processing the data obtained by a non-contact induction sensor and the methodology for assessing the life of the controlled object at an unknown operating time from the beginning of operation. The use of a non-contact induction sensor made it possible to obtain and evaluate numerical changes in the parameters of the most unreliable radio-electronic component in the radio-electronic equipment

The proposed solutions for determining the durability of radio-electronic equipment with limited input information are considered for the first time. This task is of particular importance in modern conditions when the defense forces use radio-electronic equipment from partner countries (mostly not new, with a certain resource of

operation and (or) storage). All of the above has determined the relevance and importance of the scientific and technical task of creating (developing) engineering methods for determining the reliability of electronic equipment samples by individual indicators. It is noted that the proposed approach can be developed by creating other engineering methods for determining the reliability of radio-electronic equipment by other individual indicators, combining them to make a decision.

Keywords: non-contact induction sensor, reliability, diagnostic information, radio electronic equipment, service life, durability.

Постановка завдання в загальному вигляді

Реалії бойових дій в Україні спричинили новий виток модернізації та переоснащення Збройних сил України та інших військових формувань, запровадження новітніх зразків озброєння та військової техніки. До Збройних сил надходить все більша кількість радіоелектронного обладнання (РЕО) іноземного виробництва. Значна кількість цих зразків перебувала на базах та складах тривалого зберігання. Ця обставина обумовлює загострення питання визначення надійності отриманих зразків РЕО, організації технічного обслуговування та їх ремонту.

Якість виконання поставлених завдань значною мірою залежить від якості та надійності зразків РЕО, яким укомплектовані бойові підрозділи. Абсолютно всі підрозділи використовують засоби РЕО (засоби зв'язку, планшети, ноутбуки, системи відеоспостереження, комплекси керування БПЛА і т. ін.). Однак, майже для всіх зразків РЕО відсутня повна технічна інформація. Окрім того, в більшості випадків виробник озброєння не дозволяє здійснювати ремонт наданого устаткування на території іншої держави. Тому застосування традиційних (класичних) методів теорії надійності для визначених зразків не можливо або має суттєві обмеження.

Отже, одним зі шляхів вирішення питання визначення надійності та актуальним напрямком наукової роботи є розробка саме інженерних методик визначення та оцінки надійності РЕО, що гарантуватиме обґрунтоване прийняття рішення при організації технічного обслуговування та ремонту РЕО.

Аналіз публікацій за темою дослідження

У спеціальній науковій літературі розглядаються загальні підходи, математичні моделі і методи аналізу надійності РЕО [1–4]. Відповідно до загальної практики, визначення та оцінка кількісних значень показників надійності об'єктів радіоелектронної техніки розпочинається на етапах проектування та виробництва і продовжується під час її експлуатації шляхом накопичення та узагальнення статистичної інформації.

В окремих роботах [5] розглядаються питання прогнозування технічного стану РЕО як важливої складової частини теорії технічного діагностування.

Особливості застосування безконтактного індукційного методу для отримання діагностичної інформації про об'єкт контролю розглянуто в роботах [6; 7].

Питання визначення надійності РЕО в умовах обмеженої вихідної інформації про об'єкт контролю (ОК) (технічної та статистичної) в літературі розглянуто недостатньо, хоча для їх вирішення є необхідні передумови.

Метою статті є обґрунтування можливості застосування безконтактного індукційного методу для визначення та оцінки довговічності ОК (як окремого показника надійності) при обмеженій вхідній інформації про ОК.

Виклад основного матеріалу

Ефективність функціонування РЕО визначається низкою факторів, серед яких важливу роль відіграє їх надійність.

Надійність – це комплексна властивість, яка залежно від призначення об'єкта і умов його застосування може включати безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збережуваність або певні комбінації цих властивостей. Однією з найгостріших проблем

у сучасних реаліях залишається визначення безвідмовності РЕО за обмеженою вихідною інформацією про ОК.

Складність проблеми обумовлена низкою специфічних факторів. Такі зазвичай зразки тривалий час зберігалися на складах, а в комплекті постачання відсутня відповідна технічна документація, в якій відображено умови зберігання, час напрацювання, методики перевірки та оцінки фактичного технічного стану. В більшості випадків виробник систем озброєння не дозволяє здійснювати ремонт наданого устаткування на території іншої держави. Тому користувач обладнання (обслуговуючий персонал, інженерно-технічний склад) змушений здійснювати пошук способів оцінки надійності такого устаткування, способів інтеграції отриманого устаткування в існуючу систему технічного обслуговування та ремонту.

Традиційні методи та засоби визначення чисельних значень показників надійності (в тому числі довговічності) РЕО мають низку суттєвих обмежень. У зв'язку з цим ведеться активний пошук нових підходів (методів та методик) визначення надійності РЕО в умовах обмеженої вихідної інформації.

У статті наведено короткий опис безконтактного індукційного методу та варіант його застосування для визначення одного з параметрів надійності об'єктів РЕО, а саме параметра довговічності. Запропоновано інженерну методику з визначення довговічності об'єкта контролю (ОК) за результатами обробки даних, отриманих безконтактним індукційним датчиком, та методики оцінки ресурсу ОК при невідомому напрацюванні від початку експлуатації. Методика оцінки ресурсу ОК ґрунтується на аналізі зміни параметрів найбільш низько надійного радіоелектронного компонента (РЕК) у складі РЕО.

Сутність безконтактного індукційного методу наведено в низці наукових праць [6; 7]. Діагностичний параметр – сигнал, отриманий з шини живлення цифрового блока, відображує в собі фізико-хімічні процеси старіння елементної бази. Реєстрація чисельних значень діагностичного параметра відбувається безконтактним способом (безконтактним датчиком). Такий спосіб отримання діагностичної інформації мінімізує вплив засобів вимірювання на процеси, які відбуваються в РЕО, та виключає спотворення отриманої інформації.

Зміна параметрів струму (фізичного прояву діагностичного параметра) в шині живлення ОК в умовах виконання цифровим пристроєм спеціально сформованого діагностичного тесту дозволяє отримати еталон (еталонний енергетичний паспорт ОК).

Стохастичні зміни струму спричиняють зміну магнітної складової поля навколо провідника що, у свою чергу, призводить до формування діагностичного сигналу. Сигнал фіксується датчиком діагностичної інформації (ДДІ). Наявність сигналу на виході ДДІ засвідчує не лише факт роботи цифрового блока, але і відображує його фактичний технічний стан.

Наявність еталона (еталонного енергетичного паспорта) або математичної моделі, в якій відображено динаміку зміни діагностичного параметра залежно від часу експлуатації РЕО, дозволяють застосувати методику оцінки ресурсу ОК (визначити показник довговічності). Отже, висновок про довговічність ОК можливо зробити на підставі порівняння чисельних значень діагностичної інформації з графіком динаміки зміни діагностичного параметра.

Розглянемо конструкцію та принцип функціонування датчика діагностичної інформації (ДДІ). ДДІ по своїй фізичній суті є різновидом вимірювальної котушки, яка використовується для отримання діагностичної інформації (рис. 1).

На рисунку 1 позначено: e_1 – джерело змінної напруги; R_n – опір навантаження; n_1 – число витків первинної обмотки; n_2 – число витків вторинної обмотки; u_1 – напруга первинної обмотки; u_2 – напруга вторинної обмотки; Φ – електромагнітна індукція.

Запропонований датчик складається з двох котушок індуктивності, зв'язаних загальним магнітним полем. Довкола провідників, крізь які протікає струм, виникає магнітне поле.

Для отримання параметрів поля і перетворення їх в електричний сигнал, один з проводів протягнутий крізь магнітний сердечник з обмоткою. Пропущений провід виступить в ролі первинної обмотки з одного витка, вторинна обмотка може мати більшу кількість витків. Така конструкція є струмовим трансформатором, напруга та форма сигналу у вторинній обмотці якого пропорційна змінам струму в первинній обмотці.

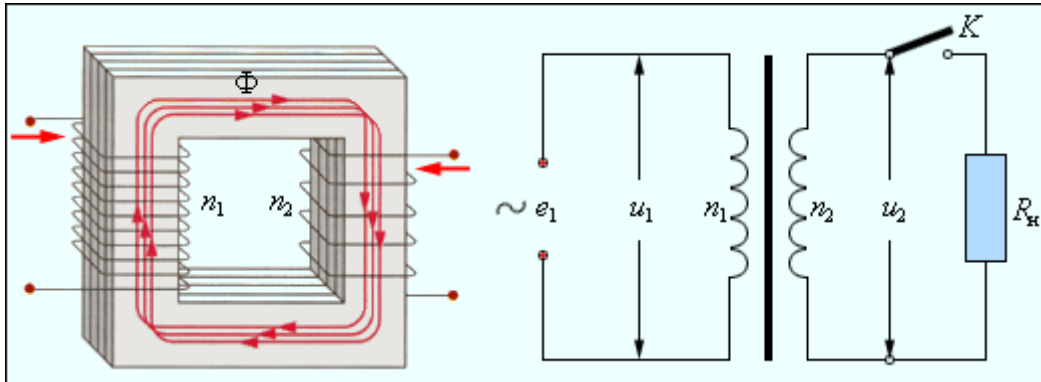


Рис. 1. Датчик діагностичної інформації

Котушка, до якої прикладається джерело змінної напруги e_1 , називається первинною обмоткою. Інша обмотка називається вторинною. До вторинної обмотки підключається навантаження R_n .

У принцип роботи ДІ покладено закон електромагнітної індукції, або закон Фарадея. Напруга первинної обмотки u_1 (напруга під'єданого джерела), пов'язана з магнітним потоком Φ , який проходить через кожен виток первинної обмотки, визначається виразом:

$$u_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

де n_1 – число витків первинної обмотки.

Аналогічно, електрорушійна сила (ЕРС), наведена у вторинній обмотці з числом витків n_2 , визначається виразом:

$$u_2 = n_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Коефіцієнт передачі напруги, або коефіцієнт трансформації n , визначається співвідношенням кількості витків:

$$n = \frac{u_2}{u_1} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Розглянемо процеси, які відбуваються в системі, де дві обмотки мають однакову кількість витків (рис. 2).

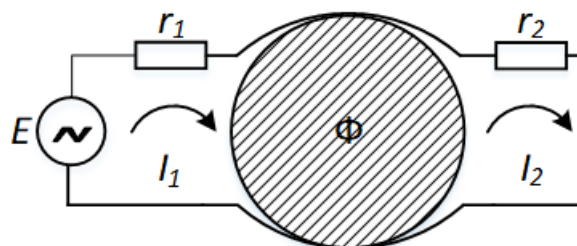


Рис. 2. Трансформатор з повним перекриттям обмоток

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

Застосуємо 2-й закон Кірхгофа та отримаємо:

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

для $M = L$

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

де M – це взаємна індуктивність, тобто індуктивність вторинної обмотки, “відчутна” з боку первинної і навпаки;

$M \frac{dI_1}{dt}$ – напруга, яка наводиться вторинною обмоткою в первинному контурі.

Взаємна індуктивність M визначається через коефіцієнт зв'язку k (при $k = 1$ і $L_1 = L_2 = L$ отримуємо $M = L$): $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$.

Записані рівняння дають еквівалентну схему датчика діагностичної інформації, представлену на рисунку 3.

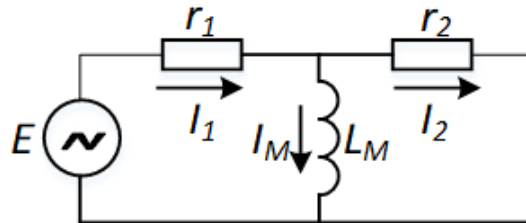


Рис. 3. Еквівалентна схема датчика з повним перекриттям обмоток

До параметра r_1 відносяться: внутрішній опір джерела, опір проводу обмотки, опір контактів і т. д., а до r_2 – опір навантаження разом з опором проводів. Якщо нехтувати величиною r_1 , то видно, що напруга джерела повністю виявляється прикладеною до навантаження і збігається за величиною (в разі $w_1 = w_2$) та фазою.

Датчик присутній на схемі у вигляді паралельної індуктивності L_M , яка називається індуктивністю намагнічення і в нашому випадку дорівнює L . Напруга джерела, прикладена до датчика, викликає струм намагнічення, який змінюється. Зміна струму намагнічення в свою чергу створює напругу на вторинній обмотці. Швидкість зміни струму пропорційна величині миттєвої напруги на обмотках.

Отже, використовуючи безконтактний датчик, ми можемо отримати чисельні значення діагностичного параметра найбільш низько надійного РЕК у складі РЕО.

У роботі [8] доведено, що до низьконадійних РЕК відносяться електролітичні конденсатори. Для таких РЕК встановлена динаміка зміни діагностичного параметра. Графічна екстраполяція значень діагностичного параметра (ДП) має вид, представлений на рисунку 4.

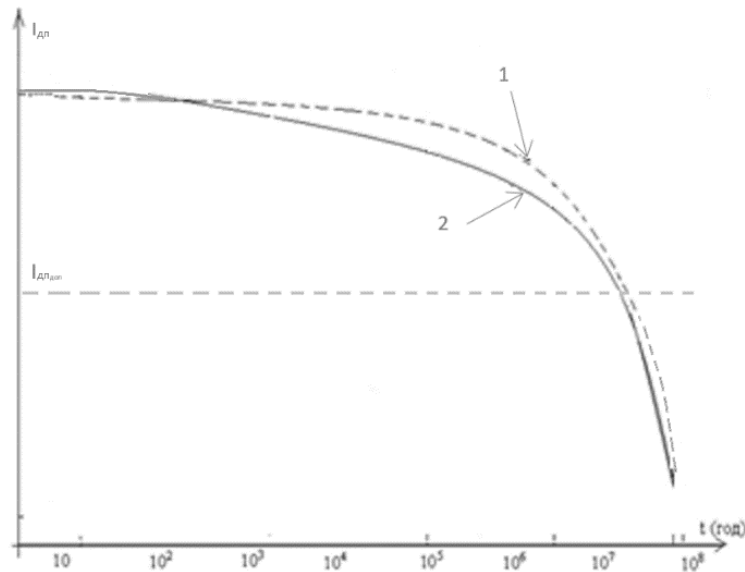


Рис. 4. Динаміка зміни сигналу на ДДІ в часі:
1 – експериментальна крива; 2 – аналітична крива

На рисунку 4 позначено: $I_{дп}$ – значення діагностичного параметра; $I_{дп_{доп}}$ – допустиме значення діагностичного параметра; $I_{дп_{ном}}$ – номінальне значення діагностичного параметра; $t_{кр}$ – критичний час напрацювання РЕК; $t_{доп}$ – максимально-допустимий час напрацювання РЕК.

Використовуючи методику оцінки ресурсу ОК при невідомому напрацюванні від початку експлуатації, стає можливим визначити термін служби РЕО.

Для вирішення цієї задачі (визначення довговічності ОК) пропонується два підходи, які взяті за основу для інженерної методики оцінки безвідмовності ОК. Маючи відомості про ресурс ОК, можемо визначати довговічність ОК.

Перший підхід – визначення ресурсу ОК, для яких наявна конструкторська та експлуатаційна документація з обліком напрацювання від початку експлуатації в паперовому або електронному вигляді.

Другий підхід – характерний для зразків, які виготовляються за межами держави і перебувають на озброєнні з невідомими параметрами.

В обох випадках оцінка безвідмовності ОК відбувається на підставі порівняння еталонних значень ДП з отриманими при застосуванні активуючої тестової послідовності значеннями. В свою чергу, еталонні енергетичні паспорти можливо отримати:

- від виробника устаткування (як результат проєктної діяльності);
- внаслідок аналітичних розрахунків з урахуванням фізико-хімічних процесів старіння РЕО під час життєвого циклу;
- як результат статистичної обробки репрезентативної вибірки результатів досліджень однотипних пристроїв з однаковими умовами експлуатації (збереження, транспортування, напрацювання);
- внаслідок проведення прискорених випробувань.

В будь-якому випадку дослідник матиме математичне очікування динаміки зміни ДП найбільш низько надійного РЕК (див. рис. 4).

Обидва підходи оцінки ресурсу ОК складають єдину методику, оскільки ґрунтуються на єдиних принципах отримання діагностичної інформації. Сукупність отриманих значень ДП після статистичної обробки дозволяє не лише зробити висновок про безвідмовність ОК, але й передбачити (з певною ймовірністю), як довго цей стан зберігатиметься.

У межах аналізу ОК першого типу для процесу формування активуючої послідовності оцінки ресурсу, реєстрація ДП, обчислення, порівняння з еталонними значеннями, повинна бути присутня низка спеціальних даних (табл. 1).

Таблиця 1

Дані для визначення ресурсу РЕО

№	Вихідні дані	Позначення	Джерело
1	Номінальне значення діагностичного параметра	P_H	Технічна документація
2	Граничне значення діагностичного параметра	$P_{гр}$	Технічна документація
3	Показник, який характеризує закономірність змін значення діагностичного параметра	α	Технічна документація
4	Напрацювання від початку експлуатації до моменту контролю	t_H	Технічна документація
5	Значення діагностичного параметра, що вимірюється під час контролю	P_K	Показання засобів вимірювання

Інформаційну модель процесу визначення ресурсу (P) при відомій закономірності зміни ДП представлено на рисунку 5.

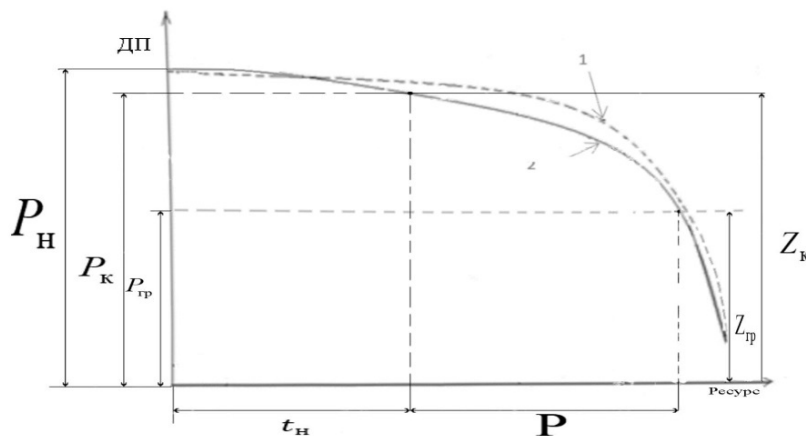


Рис. 5. Інформаційна модель визначення ресурсу об'єкта контролю при відомому напрацюванні

На рисунку 5 позначено: t_H – використаний ресурс до моменту контролю; $Z_K = P_H - P_K$ – зміна значення параметра до моменту контролю (діагностування); $Z_{гр} = P_H - P_{гр}$ – гранична зміна значення параметра; P – шуканий ресурс.

Маючи вказані дані, ресурс визначають за формулою (1):

$$P = t_H \left[\left(\frac{Z_K}{Z_{гр}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right]. \quad (1)$$

На практиці значення α знаходиться в межах від 0,8 до 2,0. Значення $Z_{гр}$, P_H , α розраховують заздалегідь і заносять в таблицю.

Таким чином, для визначення ресурсу ОК (1) необхідно провести вимірювання ДП і знати напрацювання до моменту вимірювання ДП. Значення інших показників табличні.

У другому випадку, коли відомості про напрацювання окремих складових частин РЕО військового призначення від початку експлуатації або останнього капремонту відсутні,

ресурс можливо визначити за значеннями параметрів, вимірюваних при дворазовому контролі (діагностуванні) та напрацюванні між першим і другим вимірюваннями.

Послідовність визначення ресурсу при невідомому напрацюванні від початку експлуатації представлена на рисунку 6.

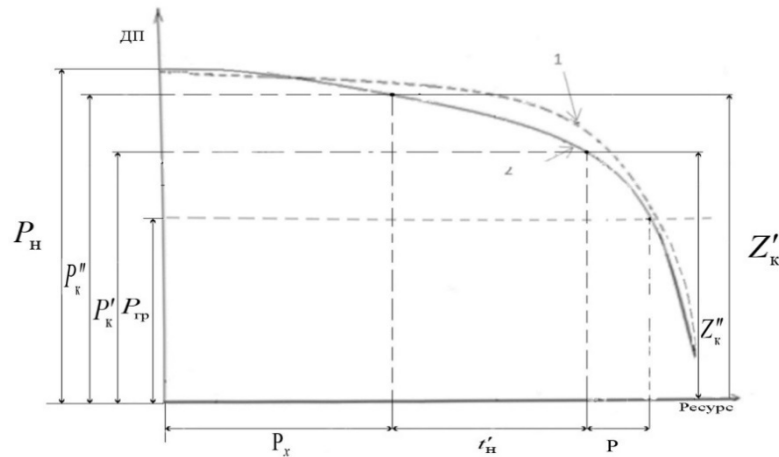


Рис. 6. Інформаційна модель визначення ресурсу об'єкта контролю при невідомому напрацюванні

На рисунку 6 застосовано наступні позначення: P'_k – значення параметра при першій перевірці; P''_k – значення параметра при повторній перевірці; $Z'_k = P'_k - P_k$ – зміна значення параметра від початку експлуатації до першої перевірки; $Z''_k = P''_k - P_k$ – зміна значення параметра від початку експлуатації до повторної перевірки; $Z_{гр} = P_n - P_{гр}$ – гранична зміна значення параметра; P_x – використаний ресурс (величина невідома); t'_n – ресурс, витрачений за час функціонування між першою і другою перевітками.

Таким чином, для визначення P при невідомому напрацюванні зразку РЕО військового призначення з початку експлуатації необхідно виміряти значення контрольованого параметра не менше двох разів і знати напрацювання за час роботи між цими вимірами (2):

$$P = t'_n \left[\frac{1}{\left(\frac{Z'_k}{Z''_k} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1} \left(\frac{Z_k}{Z_{гр}} \right) + 1 \right] \times \left[\left(\frac{Z''_k}{Z_{гр}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right]. \quad (2)$$

Висновки. Представлену методику оцінки ресурсу ОК при невідомому напрацюванні від початку експлуатації за результатами обробки даних, отриманих безконтактним індукційним датчиком, можна запропонувати як інженерну методику з визначення довговічності об'єкта контролю. Методика ґрунтується на аналізі динаміки зміни параметрів найбільш низько надійного РЕК у складі РЕО.

Напрямок подальших досліджень є розвиток запропонованого підходу створення інженерних методик визначення надійності РЕО за окремими показниками для обґрунтованого прийняття рішення про надійність ОК.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методика комплексної оцінки надійності телекомунікаційного обладнання мереж зв'язку / Д. Могилевич та ін. // Військово-технічний збірник. Експлуатація та відновлення ОБТ. 2020. № 23. С. 50–57. URL: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.23.2020.50-57>.

2. Фізичні основи теорії надійності: підручник / М. К. Жердєв, С. В. Ленков, Б. П. Креденцер та ін.; за ред. М. К. Жердєва. К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 1998. С. 19.
3. ДСТУ 3004:95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. [Чинний від 1995-01-25]. К.: Держстандарт України, 1994. 124 с. (Державний стандарт України).
4. ДСТУ 3433:96. Надійність техніки. Моделі відмов. [Чинний від 1997-12-05]. К.: Держстандарт України, 1996. 46 с. (Державний стандарт України).
5. Kuzavkov V., Khusainov P. Forecasting the technical state of the same type software and hardware equipment // Informatics and mathematical methods in simulation. 2018. Vol. 8, no. 1. P. 57–68. URL: <https://doi.org/10.15276/imms.v8.no1.57> (date of access: 13.02.2025).
6. Кузавков В. В. Безконтактний індукційний метод визначення технічного стану цифрового блока: розрахунок потужності випромінювання провідника / В. В. Кузавков, Г. І. Гайдур, С. О. Серих, Є. В. Редзюк // Зв'язок. 2016. № 1. С. 32–39. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zvjazok_2016_1_9.
7. Міночкін А., Кузавков В., Погребняк С. Визначення технічного стану складових вторинних джерел живлення за фізико-хімічними процесами в електролітичних конденсаторах під час експлуатації // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2021. Т. 40, № 1. С. 99–104. URL: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-99-104>.
8. Кузавков В. В., Погребняк С. В., Михайлюк С. С. Варіант визначення технічного стану електролітичного конденсатора методом безконтактної діагностики // Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки. 2023. № 3. С. 48–55. DOI: 10.58254/viti.3.2023.06.48.