

## АЛГОРИТМИ ТЕСТОВОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ВЕНТИЛЬНИХ КІЛ

Ручка О. О.<sup>1</sup>, Рикун В. Г.<sup>1</sup>, Новіков С. В.<sup>1</sup>, Гнатова Г. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет Повітряних сил імені Івана Кожедуба,  
Інститут цивільної авіації

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** У статті розглянуті алгоритми діагностування вентильних кіл, а саме: алгоритм діагностування вентильних кіл при відсутності обмежень вибору датчиків реакцій, алгоритм діагностування на основі інформаційного критерію, алгоритм діагностування методом поділу. Крім того, розглянуто використання датчиків струму для складання алгоритму тестового діагностування.

**Ключові слова:** алгоритм; діагностування; метод; вентиль; вентильне коло; датчик; тест; відмова; перевірка; реакції справного й несправного кола.

### Вступ

Вентильні кола є окремим випадком електричних кіл. Поняття кола й набір утворюючих його елементів не відрізняються від загальноприйнятих, тобто елементами кола є резистори, реактори, конденсатори, трансформатори, джерела струму й напруги, нелінійні елементи, в окремому випадку вентилі, керовані елементи (транзистори, тиристори) [1, 2].

Завдання діагностування зводяться в такий спосіб: відома розрахункова топологічна структура кола, параметри його елементів, а для керованих елементів – спосіб керування й параметри керуючих сигналів. Для кола, що діагностується відомі вхідні впливи (вид і значення напруги живлення), розрахункові значення вихідних параметрів; відомі часові співвідношення між параметрами внутрішніх сигналів і змінною напругою мережі (тривалість сигналів керування, закон регулювання часових параметрів, спосіб синхронізації з мережею) [3, 4].

При тестовому діагностуванні кіл повинні вирішуватися наступні завдання:

– перевірка стану кола, тобто визначення необхідних коефіцієнтів передачі. Цей вид контролю застосовують як для лінійних кіл (частотні фільтри різних видів), так і для кіл, заснованих на використанні елементів з нелінійними характеристиками (стабілітрони, обмежувачі напруги й ін.);

– виявлення елементів, що відмовили. Відмови кола можуть бути обумовлені як раптовими змінами, або поступовою зміною параметрів елементів, так і зміною топологічної структури через порушення в монтажі (втрата контакту в з'єднаннях, замикання й обриви в провідниках). На рівні аналізу кола, заданого

принциповою схемою, що не враховує конструктивних особливостей, топології монтажу й т.п., можна діагностувати тільки відмови елементів і ті порушення в монтажі, які електрично еквівалентні відмовам елементів;

– на систему діагностування може впливати перевірка граничних параметрів. Особливо актуальна така перевірка для елементів, які старіють та чутливі до термоциклів. Нарешті, в результаті зіставлення параметрів кола, які виміряні у різний час, можна оцінити швидкість їхньої зміни й прогнозувати стан кола. Завдання прогнозування найбільш складне, воно вимагає виявлення інформативних параметрів і тривалого збереження цих параметрів.

В даній статті обговорюються шляхи рішення перших двох завдань: перевірки стану й пошуку елементів, що відмовили. Завдання перевірки може розглядатися як окремий випадок ідентифікації кола.

### Аналіз публікацій

Існує достатня кількість публікацій, які присвячені даним питанням. [3 - 10].

В навчальному посібнику [3] викладено основні теоретичні та методичні рекомендації щодо методів діагностування вентильних розрядників елементів електроенергетичного обладнання. В роботі [4] описано метод побудови діагностичних моделей об'єктів у вигляді резистивних електричних кіл. На основі оцінки похибок побічно вимірюваних діагностичних ознак показано підхід до вибору контрольних вимірюваних величин, які залежать від топології кола, що діагностується. В статті [5] розглядається локальна діагностика електричного кола за допомогою методу головних

величин, а саме методу напруг головних перетинів і методу головних контурних струмів. Проводиться аналіз електричного кола і визначаються параметри гілок схильних до зносу, на підставі чого робиться висновок про пошкодження даної ділянки.

В роботі [6] автори зазначають, що при наявності неточних вимірювань і невизначеності апріорної інформації діагностична модель повинна розглядатися як набір суперечливих лінійних рівнянь і потрібно шукати рішення на основі, наприклад, методу найменших квадратів. На базі цього пропонується проводити корегування отриманого рішення у відповідності до поставленої мети.

В статті [7] представлено метод діагностики електричних кіл для модульного багаторівневого перетворювача постійного струму в постійний струм (MMDDC), який застосовується в суперконденсаторній системі накопичення енергії. Запропонований метод заснований на аналізі вихідних характеристик субмодуля як в нормальних умовах, так і в умовах відмови. Для MMDDC різні типи несправностей розімкненого кола відображаються вихідною напругою підмодуля в певних режимах роботи. Тому пропонується простий і ефективний метод діагностики за допомогою апаратної схеми і алгоритму швидкого виявлення несправності. Апаратна схема відповідає за виявлення вихідного напруги субмодуля, і його вихідний результат передається в процесор для виконання остаточної діагностики несправності разом з сигналами приводу. Запропонований підхід дозволяє уникнути складних математичних операцій і мінімізує час проведення діагностики.

В роботі [8] представлені експериментальні дослідження діагностики приводів і механізмів вимикачів. Авторами статті проведено аналіз симптомів змін стану механізму, що полягають в характеристиках руху, виконаних на вимикачі середньої напруги з внесеними дефектами.

В статті [9] запропоновано метод вибору асинхронного тягового електроприводу для електромобіля, який дозволив би оцінити необхідні технічні, екологічні та експлуатаційні якості. Цей метод заснований на проведенні діагностування обладнання за його вібродіагностичними характеристиками.

В роботі [10] представлено модулювання електричної силової системи електробуса, в якій окремі блоки проводять діагностування

електричних силових кіл та по його результатам виробляють відповідний керуючий сигнал. Цей сигнал безпосередньо управляє роботою силових перетворювачів, або вентиляльних елементів силових електричних кіл.

Проведений огляд та аналіз публікацій показує, що оцінка працездатності вентиляльних кіл, складання алгоритмів їхнього діагностування є досить актуальним завданням. Рішення зазначеного завдання дозволить більш ефективно та якісно використовувати складні вентиляльні кола, які існують в різноманітних електричних системах, що застосовуються в різних галузях народного господарства та промисловості.

### Мета та постановка задачі

Побудова алгоритму діагностування вентиляльного кола складається у виборі таких тестових сигналів, контрольних точок і реакцій, які забезпечили б мінімальне значення інформаційної ємності алгоритму (ІСА) при мінімальній кількості датчиків. При цьому варто прагнути до використання в якості реакцій напруг (потенціалів вузлів), що дозволяє обходитися без убудованих у силові кола датчиків струму. Проте застосування зовнішніх датчиків, виявляється достатнім лише в тих випадках, коли можна бути впевненим, що струм джерела тестового сигналу повністю або частково протікає через елемент, що діагностується (рис.1, а), або паралельно йому були включені тільки ті елементи, про які відомо, що вони у справному стані.

Таким чином, у колах, що діагностуються можна виділити контури двох типів: до першого типу віднесемо контури, що містять тільки ті елементи, які можуть відмовити (рис. 1, б-д), всі інші контури, опір яких не стає рівним нулю при пробоях складових елементів, належать до другого типу.

Тестові моделі, що однозначно визначають стан кола, вдається одержати тільки в тому випадку, якщо коло не містить контурів першого типу, в противному випадку необхідне застосування вбудованих датчиків або штучна зміна структури кола. Для побудови різних тестових моделей необхідно одержати інформацію про струм кожного контуру першого типу. Таким чином, число вбудованих датчиків струму  $d_B$  повинне дорівнювати числу контурів першого типу  $k_1$ :

$$d_B = k_1. \quad (1)$$

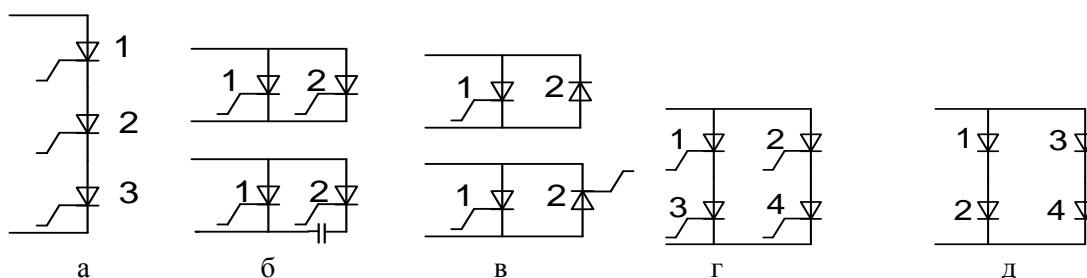


Рис. 1. Вентильні кола: а – послідовне; б – паралельне; в – зустрічно-паралельне; г – тиристорне мостове; д – діодне мостове

Багато перетворювальних кіл складаються тільки з контурів першого типу (рис. 1, б-д), тому можна сказати, що число вбудованих датчиків, як правило, дорівнює числу незалежних контурів.

Незалежні контури в колі, що діагностується, можна виявляти за допомогою структурної моделі, що являє собою топологічний граф кола. Кількість незалежних контурів графа (потужність безлічі фундаментальних циклів) визначається з урахуванням числа дуг графа  $c$ , числа вершин  $v$  і кількістю зв'язних компонентів графа  $p$  [9]:

$$k = c - v + p. \quad (2)$$

Оскільки при діагностуванні кола, що відповідають незв'язним компонентам структурної моделі, можуть розглядатися роздільно, то  $p = 1$ :

$$k = c - v + 1. \quad (3)$$

Застосування вбудованих датчиків може бути виключено, якщо кратність відмов обмежена таким чином, що контури першого типу не утворюються або є можливість запобігти протіканню струму по цих контурах шляхом їхнього розмикання.

Метою роботи є аналіз та дослідження основних алгоритмів діагностування електричних кіл різних типів.

#### Загальні питання складання алгоритмів

Нехай коло являє собою багатополіусник, описуваний рівняннями:

$$\begin{aligned} U_1 &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + \dots + Z_{1n}I_n; \\ U_2 &= Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 + \dots + Z_{2n}I_n; \\ U_n &= Z_{n1}I_1 + Z_{n2}I_2 + \dots + Z_{nn}I_n, \end{aligned} \quad (4)$$

або  $U = ZI$ .

Також правомірним буде запис у формі  $I = YU$ . Параметрична ідентифікація кола із

заданою структурою припускає визначення всіх  $Z_{ij}$  або  $Y_{ij}$ . Необхідне число експериментів  $N_E = n^2$  для незв'язних багатополіусників  $Z_{ij} \neq Z_{ji}$ ,  $Y_{ij} \neq Y_{ji}$  та  $N_E = \frac{1}{2}n(n+1)$  для зв'язних.

При цьому можлива, зокрема, наступна методика експериментів:

– визначення власного опору  $Z_{ij}$  (провідності  $Y_{ij}$ ):

$$Z_{ii} = \frac{U_i}{I_i}, \quad (5)$$

при цьому всі  $I_i = 0$  для  $j \neq i$ ;

– визначення взаємного опору  $Z_{ij}$  (провідності  $Y_{ij}$ )  $j \neq i$ :

$$\begin{aligned} Z_{ii} &= \frac{(U_i - Z_{ii}I_i)}{I_i}; \\ Y_{ij} &= \frac{(I_i - Y_{ii}I_i)}{U_j}. \end{aligned} \quad (6)$$

В першому випадку для визначення кожного опору (провідності) необхідно виміряти два параметри, у другому – три. Повне число вимірів для повної параметричної ідентифікації  $n$ -поліусника:

$$N_n = \frac{(3n^2 + 1)}{2}, \quad (7)$$

причому це число повинне бути збільшене з урахуванням частотної залежності. Кожен вимірюваний параметр  $Z_{ij}$  або  $Y_{ij}$  визначається деяким реальним колом, що містить  $R$ ,  $L$ ,  $C$  – елементи, джерела, трансформатори, ключі. Тому рішення завдання контролю кола можна уявити собі таким чином: за розрахунковим

значенням параметрів кола визначаються параметри багатополосника, у результаті описаних вище експериментів вимірюються їхні реальні значення й зіставляються з розрахунковими. Оскільки в загальному випадку опір залежить від частоти, вибір частот, на яких здійснюються виміри, або форми сигналу залежить від порядку системи й значень параметрів.

Для того щоб вибрати тестовий сигнал, що подається на входи багатополосника, застосуємо поняття контрастності тесту. Контрастність тесту – це відношення реакції справного й несправного кіл на той саме тестовий вплив. Якщо параметр кола  $N$  є деякою функцією параметрів елементів кола  $q_i$ :

$$N = \varphi_1(q_1, q_2, q_3, \dots, q_i, \dots, q_m), \quad (8)$$

то вплив елемента  $q_i$  на  $N$  визначається одним з виразів:

$$\begin{aligned} \Delta N &= \frac{d\varphi}{dq_i} \Delta q_i = A_i \Delta q_i; \\ \frac{\Delta N}{N} &= \frac{d\varphi}{dq_i} \frac{q_i}{\varphi(q_i)} \frac{\Delta q_i}{q_i} = B_i \frac{\Delta q_i}{q_i}. \end{aligned} \quad (9)$$

Тут  $A_i$  – коефіцієнт впливу, обумовлений частинною похідною або відношенням збільшень:

$$A_i = \frac{d\varphi_1}{dq_i}; \quad (10)$$

$B_i$  – коефіцієнт впливу, дорівнює відношенню відносних збільшень:

$$B_i = \frac{d\varphi}{dq_i} \frac{q_i}{\varphi(q_i)}. \quad (11)$$

Контрастність тесту – більш загальна характеристика, вона може визначатися одним з наступних виразів:

$$\begin{aligned} K_{T1} &= \frac{dR_u}{dZ}; \\ K_{T2} &= \frac{dR_u}{dZ} \frac{Z}{R_u} = \frac{\Delta R_u / R_u}{\Delta Z / Z}. \end{aligned} \quad (12)$$

де  $R_u$  – реакція кола на тестовий вплив, наприклад струм вузла при заданому потенціалі або

потенціал вузла при фіксованому струмі;

$Z$  – опір елемента кола, зміна якого спричиняє зміну реакції.

Вирази для  $K_T$  придатні при ненульових значеннях реакції у випадку параметричних (поступових) відмов елементів. Вони втрачають сенс, якщо реакція вимірюється компенсаційним методом, а також при раптових відмовах, коли збільшення параметрів елементів стають нескінченними. У цьому останньому випадку зручніше користуватися співвідношенням відповідних реакцій для кіл, що містять справний й несправний елементи:

$$K_{T3} = \frac{R_{uc}}{R_{unc}}. \quad (13)$$

У лінійних колах, які можуть бути представлені типологічними зв'язковими невідродженими графами, будь-яка пара вузлів  $k, l$  дозволяє записати опір  $Z_{kl}$ , який залежить від всіх компонентів кола:

$$Z_{kl} = f(Z), \quad (14)$$

тому зміна будь-якого параметра, тим більше будь-яка раптова відмова (обрив, замикання) принципово не можуть вплинути на  $Z_{kl}$ . Проте на практиці вплив деяких параметрів на відповідну реакцію дуже малий. Контрастність тесту залежить від багатьох факторів, з яких відзначимо три найбільш істотні: вид тестового сигналу; топологію кола, що діагностується і вплив, що маскує, розкид параметрів.

Таким чином, для перевірки справності кола можна запропонувати такий алгоритм:

– обчислюються всі  $Z_{ii}(\omega)$  і  $Z_{ij}(\omega)$ , потім здійснюється вимір всіх  $Z_{ii}(\omega)$  і  $Z_{ij}(\omega)$ .

– для  $LC$  – кола досить обчислити всі характерні частоти (частоти, що відповідають нулям і полюсам  $Z_{ij}$ ) і здійснити виміри  $Z$  на цих частотах. Якщо  $Z$  приймає екстремальні значення, коло може вважатися справним.

Для кіл з резистивними елементами контроль також здійснюється по зіставленню частотних характеристик обмірюваних і розрахованих опорів.

Якщо коло несправне і потрібно визначити елементи, що відмовили, можна застосувати такі способи:

– визначення частотних залежностей  $Z_{ij}$  й обчислення параметрів елементів;

– безпосередній вимір параметрів елементів.

Перевага першого способу – можливість

оперувати тільки із зовнішніми виводами багатополосника, тобто немає необхідності у вимірі потенціалів внутрішніх вузлів і струмів внутрішніх гілок. Недоліки пов'язані з необхідністю громіздких обчислень і з малою контрастністю тестів для деяких елементів.

Принципове обмеження цього способу пов'язане з неможливістю виявлення відмов окремих елементів, якщо їхнє з'єднання входить в усі вирази  $Z_{ij}$  в однаковій формі, і ці елементи мають однакові частотні характеристики. Так, зовнішніми засобами неможливо визначити елемент, що відмовив, у групі таких же елементів, з'єднаних паралельно або послідовно.

Обмеження другого способу обумовлені неприпустимістю введення в коло довільного числа датчиків струму й напруги. Інженерні рішення повинні для кожного типу кола виходити з компромісу між такими кількісними оцінками, які можуть мати різні вагові коефіцієнти залежно від робочих струмів, напруг, умов експлуатації, імовірності відмов окремих елементів, режимів діагностування. Обмежуючими факторами є:

- число контрольованих вузлових потенціалів;
- число контрольованих струмів гілок;
- можлива кратність відмов елементів;
- об'єм пам'яті діагностуючого пристрою;
- кількість тестів у повній процедурі;
- час діагностування.

#### **Алгоритм діагностування при відсутності обмежень на вибір датчиків**

Програма розробки алгоритму діагностування при відсутності обмежень на вибір датчиків зводиться до послідовного виконання наступних операцій:

1. Будується структурна модель схеми.
2. По структурній моделі визначається число контурів, визначається, чи є контури першого типу і чи приводить задана кратність відмов до їхнього замикання.
3. Якщо контури першого типу відсутні, то визначають послідовність операцій, які виявляють пробой елементів.
4. Якщо коло містить контури першого типу, то вибирають місця установки датчиків струму, що вбудовані.
5. Визначається послідовність перевірок, що виявляють замикання контурів, після чого виконується п. 3.
6. Вибирається послідовність перевірок, що виявляють обриви.
7. Визначаються обсяг і послідовність операцій до допускового контролю.

При виборі перевірок для кіл, що містять тиристри, доцільно застосовувати імпульсні тестові сигнали, що забезпечує природну комутацію тиристорів і дозволяє використати один генератор для формування анодної та керуючої напруг. Тиристри можуть перебувати в трьох станах: справний, пробитий, некерований. Перевірка стану тиристора може проводитися у двох різних режимах: під час відсутності керуючих сигналів і при їхній подачі. При відсутності керуючого сигналу справний стан однаковий із втратою керованості, а при подачі імпульсу керування еквівалентні справний і короткозамкнений стани, отже, для одержання діагнозу необхідно як мінімум дві перевірки. Насамперед, варто проводити перевірку, що виявляє пробій, який не вимагає додаткового керуючого впливу на тиристор. Крім того, відсутність пробою дозволяє використати тиристор як роздільник, що розмикає відповідний контур.

При діагностуванні кіл, що містять більшу кількість контурів першого типу, в результаті зростання необхідного числа датчиків з'являється можливість збільшувати число можливих результатів перевірок.

До складу багатьох автономних інверторів напруги входять діодно-тиристорні кола, які також підлягають діагностуванню. При обмеженні несправностей діодів пробоями, в якості тестових сигналів можуть бути використані однополярні імпульси. Датчики реакцій устанавлюються в колах зворотніх діодів, які, як правило, менш завантажені при роботі інвертора.

#### **Синтез алгоритмів діагностування на основі інформаційного критерію**

При розробці алгоритмів діагностування, що використовують тільки зовнішні датчики, особливого значення набуває вибір тестових сигналів і точок підключення генераторів тестів до випробуваної схеми. Найбільш складний вибір першої елементарної перевірки, що пов'язане з максимальною невизначеністю технічного стану.

Якщо є можливість перевірки стану кожного елемента окремо, незалежно від станів інших елементів, то насамперед перевіряється стан елемента з найбільшою ймовірністю відмови. При рівній імовірності відмови всіх елементів порядок перевірки несуттєвий. В інших випадках вибір елементарних перевірок може проводитися на основі інформаційних критеріїв. Перевірки, що забезпечують одержання максимального обсягу діагностичної

інформації, дозволяють розділити множину станів на більше число підмножин  $\gamma$ , отже, скоротити потужність цих підмножин. Скорочення потужності підмножин зменшує невизначеність стану  $\gamma$  число елементів, які можуть відмовити, а це у свою чергу спрощує вибір наступних перевірок.

Найбільший обсяг діагностичної інформації за допомогою зовнішніх датчиків надходить, якщо струм генератора тесту протікає через найбільше число елементів, що діагностуються а кожна несправність викликає властиву тільки їй реакцію. Для одержання максимальної інформації в якості контрольної точки при першій перевірці варто вибирати вузли кола, через які замикається найбільше число контурів з різними несправностями. У перетворювальних схемах такою властивістю володіють вузли, до яких підключаються джерела живлення, навантаження, комутаційні вузли в пристроях із примусовою комутацією.

Несправності елементів вентильного кола насамперед впливають на такі характеристики сигналів, як амплітуда й полярність. При діагностуванні лінійних частотно залежних кіл важливого значення набувають часові й частотні характеристики. Із сигналів, формування яких не викликає особливих труднощів, найбільшу інформативність мають двополярні імпульсні й гармонійні сигнали.

#### **Синтез алгоритмів діагностування методом поділу**

Розглянуті вище приклади показують, що діагностуванню перешкоджає наявність в електричних колах зв'язаних контурів. Виникає необхідність поділу контурів або за допомогою датчиків, що дають інформацію про стан кожного контуру окремо, або шляхом вибору тестового сигналу, що враховує властивості елементів, стан яких вважається відомим. В останньому випадку поділ контурів еквівалентно поділу кола на ряд слабо пов'язаних ланок. Як вже відзначалося, такий поділ дозволяє скоротити ІСА й спростити аналіз станів. Поділ об'єкта дозволяє звести рішення складного багатофакторного завдання до рішення декількох більш простих. Крім того, поділ кола на окремі ланки дозволяє зменшити число убудованих датчиків.

Оскільки механічні розмикання в діагностуємих колах у більшості випадків неприпустимі, то виникає завдання організації псевдорозривів за допомогою елементів, опір яких може бути значним. Назвемо такі елементи роздільниками. Поділ може бути повним

( $Z_p \rightarrow \infty$ ) і частковим ( $Z_p \neq 0$ ). Розділові властивості залежать від стану елемента  $\gamma$  виду тестового сигналу.

Найбільш повний поділ при будь-яких видах сигналів забезпечує електромеханічні комутаційні апарати. Однак комутаційні апарати встановлюються, як правило, у вхідних і вихідних колах вентильних пристроїв (ВП) і не забезпечують поділу внутрішніх кіл. Тиристри, для яких установлена відсутність пробою, також є повними роздільниками для будь-яких сигналів. Справні діоди забезпечують поділ при певній полярності сигналу. Трансформатори по постійному струму є повними роздільниками кіл, підключених до різних обмоток, і забезпечують частковий поділ при відсутності повних коротких замикань і використанні високочастотних сигналів для кіл, приєднаних до однієї обмотки.

Конденсатори в справному стані можуть служити повними роздільниками для постійних напруг, частковими – для гармонійних й імпульсних сигналів відповідної частоти. Реактори мають значний опір для високочастотних сигналів. Резистори забезпечують частковий поділ при будь-якому виді сигналу.

Розглянемо поняття рангу роздільника. До роздільників першого рангу віднесемо комутаційні апарати й тиристри. Діоди конденсатори й трансформатори виділимо в групу роздільників другого рангу. Реактори віднесемо до третього рангу. Резистори являють собою роздільники нижчого, четвертого рангу. Чим вище ранг роздільника, тим переважніше його використання з погляду зменшення впливу кіл, що маскують, тим менше обмежень накладається на вибір тестових сигналів. Поділ двох кіл можуть забезпечити лише роздільники, які включені в гілку, що замикає контур, утворений зазначеними колами. Тому доцільність використання того або іншого роздільника визначається не тільки його власним рангом, але й розташуванням у колі.

На реакцію можуть впливати тільки ті елементи, які входять до складу контурів, по яких протікає струм генератора тестового сигналу. Якщо для якого-небудь тестового сигналу структурна модель кола не містить замкнутих контурів, тобто являє собою дерево, то стан кожного з елементів, що становлять гілку дерева, може бути визначеним за допомогою зовнішніх датчиків. Таким чином найбільший топологічний ранг мають роздільники, розташовані в дугах, розмикання яких перетворює структурну модель кола в дерево.

Мінімальне число дуг, які необхідно розімкнути для перетворення графа в основне дерево, тобто до зв'язного підграфа, що не має циклів, дорівнює потужності множини фундаментальних циклів графа. Повне число різних остовних дерев графа дорівнює визначнику різниці матриці ступенів вершин і матриці зв'язності графа. Це число велике навіть для порівняно простих графів. Виникає проблема вибору дерева, яке утвориться виключенням дуг, що містять справні елементи. У загальному випадку завдання вибору оптимального дерева може бути вирішене шляхом побудови повного списку остовних дерев й їхнього попарного порівняння. Процедура породження всіх дерев графа складається з декількох кроків. Перший крок полягає в приписуванні дугам графа номерів від 1 до  $c$ , де  $c$  – число ребер. На наступних кроках вибирається ребро, яке разом з обраними на попередніх етапах утворить частина конструюемого дерева. Обране ребро не повинне приводити до появи циклу. Якщо цикл з'являється, то дане ребро відкидається й перевіріці піддається наступне ребро з більшим номером. Якщо циклу немає, то ребро додається до вже відібраних, і процес повторюється доти, доки не буде побудоване остовне дерево. Ребра перебираються в порядку зростання номерів, що приводить до вичерпного й безповторного рішення завдання.

Процес побудови повного списку остовних дерев трудомісткий і вимагає великого обсягу пам'яті при машинній обробці. Спростити завдання допомагає апріорна інформація про стан елементів і про ймовірності відмов роздільників різного типу. Насамперед як роздільники варто використати елементи, про які відомо, що вони не пробиті. Такий вибір відповідає найбільш повному рішенню завдань діагностики, тому що отримане дерево містить всі елементи, стан яких потрібно визначити. Природно, що найбільший ефект виходить при використанні вже на першому кроці роздільників першого рангу. У цьому випадку відсутні обмеження на вибір тестових сигналів і забезпечується максимальна контрастність реакцій.

Однак у більшості випадків використання роздільників вищого рангу при першій перевірці виявляється неможливим. Це обумовлено тим, що комутаційні апарати, як правило, використовуються для відключення зо-

внішніх пристроїв і не впливають на структуру діагностуемого об'єкта. Що стосується тиристорів, то їхнє застосування в якості роздільників можливо лише після перевірки на відсутність пробою. Тому насамперед для поділу доводиться використовувати реактори й обмотки трансформаторів, повне коротке замикання яких мало ймовірно. Можливо також використання резисторів, хоча вони і є роздільниками нижчого рангу й при будь-якому виді сигналу забезпечують лише частковий поділ. Відкидаючи дуги, що мають індуктивний або активний опір, одержуємо тестовий підграф, дуги якого можуть виявитися короткозамкненими. Якщо тестовий підграф містить незв'язні або висячі області, то короткі замикання елементів у цих областях виявляються шляхом перевірки за допомогою високочастотного сигналу, що забезпечує більші значення індуктивних опорів. Той факт, що коливальні контури в перетворювальних колах характеризуються порівняно низькими резонансними частотами й низькими добротностями, дозволяє зневажити впливом резонансних ефектів на розділові властивості індуктивних елементів при відповідному виборі частоти тестового сигналу.

Підграф, отриманий в результаті виключення дуг, що містять роздільники, може являти собою дерево (рис. 2, *a*) або містити цикли (рис.2, *b*). У першому випадку завдання діагностики елементів кола розв'язні при будь-якій кратності відмов. Алгоритм діагностування ланок вибирається залежно від їхньої структури, ймовірності відмов складових елементів, апріорної інформації й т.п. Доцільно насамперед перевіряти стан роздільників першого рангу, що при відсутності пробоїв дає можливість використати їхні розділові властивості на наступних етапах. Цикли в тестовому підграфі можна замінити еквівалентними ребрами, при цьому підграф перетворюється в дерево.

Умови проведення перевірок з використанням псевдорозривів не дозволяють проводити допускове параметричне діагностування. Цей факт необхідно враховувати в процесі розробки алгоритму діагностування при виборі послідовності перевірок. Допусковий контроль варто проводити після того, як установлена відсутність замикань роздільників вищого рангу, що дозволяє використати будь-які необхідні тестові сигнали.

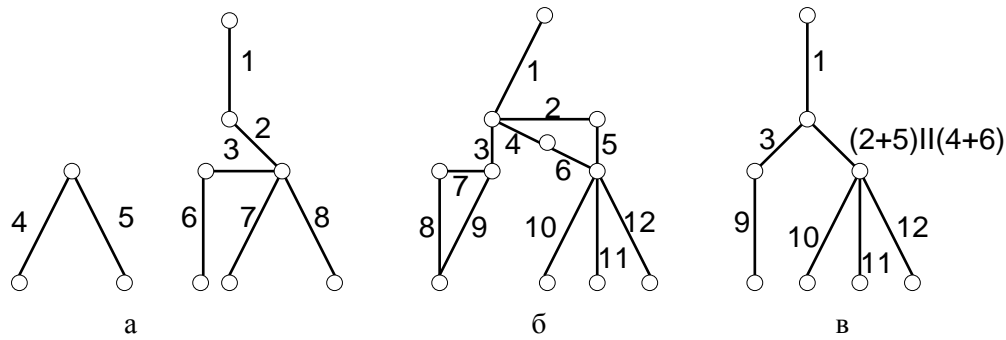


Рис. 2. Граф ланок: а – без циклів; б – з циклами; в – перетворений

Алгоритми діагностування з використанням індуктивних роздільників дозволяють забезпечити максимальну глибину пошуку дефекту без застосування убудованих датчиків. Крім впливу паралельних кіл один на одного, алгоритм діагностування з поділом зводиться до послідовної перевірки стану ланок з елементів, включених послідовно, або кожного елемента окремо.

Розглянемо метод розробки алгоритму діагностування, якому можна розбити на ряд етапів.

1. На першому етапі визначається можливість використання в якості роздільників комутаційних апаратів (КА). Якщо така можливість є, то блоки, зв'язані між собою через контакти КА, розглядаються як незалежні й всі наступні операції застосовуються до кожного блоку окремо. Діагностування починається із блоку, який має найбільшу ймовірність відмови.

2. Для обраного блоку будується структурна модель кола й на її основі отримують тестові підграфи.

3. Якщо тестовий підграф містить цикли, то по наведеній формулі для числа контурів визначається необхідна кількість роздільників і вибираються місця установки індуктивних роздільників.

4. З урахуванням псевдорозривів будується тестове дерево.

5. Визначаються контрольні точки для діагностування пробів вентильних елементів і вибирається послідовність їх перевірки.

6. Вибирається послідовність перевірок керованості тиристорів, справні тиристори можна використати надалі в якості керованих ключів.

7. При необхідності планується контроль обривів діодів.

8. Визначаються форми допускового контролю й обирається послідовність проведення перевірок елементів, розташованих у висячих галузях тестового підграфа.

## Висновки

Проведені дослідження дозволяють зазначити, що діагностування параметрів може використовуватися для виявлення поступових відмов, для прогнозування стану об'єкту, а також для виявлення раптових відмов, включаючи ті, які викликають зміна структури кола: обриви або замикання кіл.

Запропоновано поділ електричного кола, що дозволяє скоротити інформаційної ємності алгоритму й спростити аналіз станів. Поділ об'єкта діагностування дозволяє звести рішення складного багатofакторного завдання до рішення декількох більш простих. Крім того, поділ кола на окремі ланки дозволяє зменшити число убудованих датчиків.

Зазначено, що алгоритми діагностування з використанням індуктивних роздільників дозволяють забезпечити максимальну глибину пошуку дефекту без застосування убудованих датчиків. Крім впливу паралельних кіл один на одного, алгоритм діагностування з поділом зводиться до послідовної перевірки стану ланок з елементів, включених послідовно, або кожного елемента окремо.

Крім розглянутих в роботі алгоритмів тестового діагностування вентильних кіл існують також інші способи визначення працездатності останніх. Однак саме алгоритми тестового діагностування набувають зараз широкого використання.

Кожен алгоритм має свої переваги та недоліки, а вибір конкретного з них визначається саме їхніми співвідношеннями та умовами роботи вентильного кола.

## Література

1. Гнатів А. В., Тарасова В. В., Новіченок С. М. Теоретичні основи електротехніки: навч. – метод. посіб. Ч.2. Харків, 2006. 242 с.
2. Bird J. Electrical Circuit Theory and Technology. 5th ed. Abingdon. 2014. 769 p.
3. Привалов Е. Е. Диагностика вентильных разрядников электроэнергетического оборудования. Ставрополь, 2015. 68 с.



4. Панкин А. М. Построение диагностических моделей резистивных электрических цепей. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2008. №. 9. С. 44-49.
5. Хусаинов Ш. Н., Киесш И. Е. Локальная диагностика электрических цепей. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2012. №. 16 (275). С. 103-106.
6. Gorbenko Y., Kiryukha V., Yablokova V. Methods of Increasing the Reliability of Solving the Problem of Diagnostics of Electrical Circuits. *2019 International Science and Technology Conference "EastConf"*. (Vladivostok, 1-2 March 2019). IEEE, 2019. – С. 1-5.
7. Bi K.; Quntao An, Jiandong Duan; Li Sun; Kuo Gai. Fast diagnostic method of open circuit fault for modular multilevel dc/dc converter applied in energy storage system. *IEEE Transactions on Power Electronics*. (Taiwan, 29 December 2016) 32. 5. 3292-3296.
8. Pochanke Z., Chmielak W., Daszczyński T. Experimental studies of circuit breaker drives and mechanisms diagnostics. *2016 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*. (Koscielisko-Zakopane, 26 June – 1 July 2016). IEEE, 2016. С. 1-5.
9. Migal V., Arhun Shc., Hnatov A., Dvadnenko V., Ponikarovska S. Substantiating the Criteria for Assessing the Quality of Asynchronous Traction Electric Motors in Electric Vehicles and Hybrid Cars. *한국정밀공학회지*. 2019. Т. 36. №. 10. С. 989-999.
10. Hnatov, A., Arhun, S., Tarasov, K., Hnatova, H., Mygal, V., Patlins, A. Researching the model of electric propulsion system for bus using Matlab Simulink. In: *USB PROCEEDINGS of 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. (Latvia, 7-9 October, 2019). Latvia, 2019, pp.#051-1-#051-6.
11. *Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. 16 (275). 103-106.
12. Gorbenko Y., Kiryukha V., Yablokova V. (2019) Methods of Increasing the Reliability of Solving the Problem of Diagnostics of Electrical Circuits. *2019 International Science and Technology Conference "EastConf"* (Vladivostok, 1-2 March 2019). 1-5.
13. Bi K.; Quntao An, Jiandong Duan; Li Sun; Kuo Gai. (2016) Fast diagnostic method of open circuit fault for modular multilevel dc/dc converter applied in energy storage system. *IEEE Transactions on Power Electronics*.. (Taiwan, 29 December 2016) 32. 5. 3292-3296.
14. Pochanke Z., Chmielak W., Daszczyński T. (2016) Experimental studies of circuit breaker drives and mechanisms diagnostics. *2016 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*. (Koscielisko-Zakopane, 26 June – 1 July 2016). 1-5.
15. Migal V., Arhun Shc., Hnatov A., Dvadnenko V., Ponikarovska S. (2019) Substantiating the Criteria for Assessing the Quality of Asynchronous Traction Electric Motors in Electric Vehicles and Hybrid Cars. *한국정밀공학회지*. 36. 10. 989-999.
16. Hnatov, A., Arhun, S., Tarasov, K., Hnatova, H., Mygal, V., Patlins, A. (2019) Researching the model of electric propulsion system for bus using Matlab Simulink. In: *USB PROCEEDINGS of 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. (Latvia, 7-9 October, 2019).#051-1-#051-6.

### Reference

1. Hnatov A. V., Tarasova V. V., Novichonok S. M. (2006) *Teoretychni osnovy` elektrotexniky` Chasty` na 2*. [Theoretical foundations of electrical engineering. Part 2]. [in Ukrainian].
2. Bird J. (2014) *Electrical Circuit Theory and Technology*. 5th ed..
3. Privalov E. E. (2015) *Diagnostika ventilnykh razryadnikov elektroenergeticheskogo oborudovaniya*. [Diagnostics of valve arresters of electric power equipment]. [in Russian]
4. Pankin A. M. (2008) *Postroenie diagnosticheskikh modeley rezistivnykh elektricheskikh tsepey*. [Construction of diagnostic models of resistive electrical circuits.] *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika*.. 9. 44-49.
5. Husainov Sh. N., Kiessh I. E. (2012) *Lokalnaya diagnostika elektricheskikh tsepey*. [Local diagnosis of electrical circuits.] *Vestnik Yuzhno-*

**Ручка Александр Омелянович**<sup>1</sup>, к.т.н., доц., e-mail: rykun.vova1961@gmail.com, тел. +38 067-774-86-83,

**Рикун Володимир Георгійович**<sup>1</sup>, к.т.н., доц., e-mail: rykun.vova1961@gmail.com, тел. +38 067-774-86-83,

**Новіков Станіслав Володимирович**<sup>1</sup>, студент, e-mail: rykun.vova1961@gmail.com, тел. +38 067-774-86-83,

**Гнатова Ганна Андріївна**<sup>2</sup>, студент автомоб. факультету ХНАДУ, тел. 099-067-98-09, e-mail: annagnatova22@gmail.com,

<sup>1</sup>Харківський національний університет Повітряних сил імені Івана Кожедуба, Інститут цивільної авіації, 61023, м. Харків, вул. Сумська 77/79

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25

### Algorithms of test diagnostics of valve circuits

**Abstract. Problem.** *Valve circuits are a special case of electric circuits. The concepts of the electric circuit and the set of its forming elements do not differ from the conventional ones, that is, its elements are ordinary electrical elements and so-called valves - transistors, thyristors. This article explores the ways to solve problems such as checking the status and finding the failing electrical components. The*

verification task can be considered as a separate case of electric circuit identification. Therefore, the evaluation of the performance of the valve circuits, the compilation of algorithms for their diagnosis is quite an urgent task. Solving this problem will allow more efficient and qualitative use of complex valve circuits, which exist in various electrical systems used in various sectors of the economy and industry. **Goal.** The goal is analysis and study of basic algorithms for diagnosing electrical circuits of different types. **Methodology.** The article deals with some algorithms for the diagnosis of valve circuits, namely: the algorithm for the diagnosis of valve circuits in the absence of restrictions on the choice of reaction sensors, the algorithm of diagnosis based on the information criterion, the algorithm of diagnosis by the method of separation. In addition, the use of current sensors for compiling a test diagnosis algorithm is considered. **Results.** Diagnosis of parameters can be used to detect gradual failures, to predict the state of an object, and to detect sudden failures, including those that cause a change in the structure of the circle: breakage or circuit closure. **Originality.** Separation of the electric circuit is proposed, which allows to reduce the information capacity of the algorithm and to simplify the analysis of states. Separation of the object of diagnosis allows to reduce the solution of complex multifactor problem to the solution of several simpler ones. In addition, the division of the circle into separate links allows to reduce the number of built-in sensors. **Practical value.** Diagnosis algorithms using inductive dividers allow maximum depth of defect detection without the use of built-in sensors. In addition to the influence of parallel circles on each other, the split-diagnostics algorithm is reduced for sequential check of the status of the links from the elements included in series, or each element separately.

**Key words:** algorithm; diagnosis; method; valve; valve circle; sensor; test; failure; check; reactions of the working and faulty circle.

**Ruchka Oleksandr**<sup>1</sup>, Ph.D., Assoc. Prof., e-mail: rykun.vova1961@gmail.com, tel. 067-774-86-83,

**Rykun Volodymyr**<sup>1</sup>, Ph.D., Assoc. Prof., e-mail: rykun.vova1961@gmail.com, tel. 067-774-86-83,

**Novikov Stanislav**<sup>1</sup>, student, e-mail: rykun.vova1961@gmail.com, tel. 067-774-86-83,

**Hnatova Hanna**<sup>2</sup>, student, tel. 099-067-98-09, e-mail: annagnatova22@gmail.com,

<sup>1</sup>Ivan Kozhedub Kharkiv University of Air Force, Sumy 77/79 street, Kharkiv, 61023, Ukraine.

<sup>2</sup>Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

#### **Алгоритмы тестового диагностирования вентильных схем**

**Аннотация.** В статье рассмотрены некоторые алгоритмы диагностирования вентильных кругов, а именно: алгоритм диагностики вентильных цепей при отсутствии ограничений выбора датчиков реакций, алгоритм диагностики на основе информационного критерия, алгоритм диагностики методом деления. Кроме того, рассмотрено использование датчиков тока для составления алгоритма тестового диагностирования.

**Ключевые слова:** алгоритм; диагностирования; метод; вентиль; Вентильное круг; датчик; тест; отказ; проверка; реакции исправного и неисправного круга.

**Ручка Александр Омелянович**<sup>1</sup>, к.т.н., доц., e-mail: rykun.vova1961@gmail.com, тел. +38 067-774-86-83,

**Рыкун Владимир Георгиевич**<sup>1</sup>, к.т.н., доц., e-mail: rykun.vova1961@gmail.com, тел. +38 067-774-86-83,

**Новиков Станислав Владимирович**<sup>1</sup>, студент, e-mail: rykun.vova1961@gmail.com, тел. +38 067-774-86-83,

**Гнатова Анна Андреевна**<sup>2</sup>, студент, тел. 099-067-98-09, e-mail: annagnatova22@gmail.com,

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет Воздушных сил имени Ивана Кожедуба, Институт гражданской авиации, 61023, г. Харьков, ул. Сумская 77/79.

<sup>2</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.