

**С. М. ЛЕВИЦЬКИЙ**, канд. техн. наук, доц. ВНТУ;  
**Д. П. ПРОЦЕНКО**, канд. техн. наук, доц. ВНТУ;  
**А. А. БАРТЕЦЬКИЙ**, асп. ВНТУ

## СИСТЕМА ДІАГНОСТУВАННЯ КОНДЕНСАТОРІВ ЛАНКИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ

**Вступ.** Контроль стану та діагностика окремих елементів регульованих електроприводів змінного струму необхідні в більшій чи меншій мірі залежно від їх застосування. Діагностика допомагає запобігти незапланованому простою обладнання, організувати роботу обладнання в аварійному режимі на випадок несправності, зменшити час та затрати відновлення роботи електроприводу [1]. Автономні інвертори напруги на шинах постійного струму мають електролітичні конденсатори, призначені для фільтрування пульсуючих струмів та стабілізації напруги на вході інвертора. Конденсатори мають обмежений термін експлуатації, який часто менший, ніж у силових напівпровідників. У випадках виходу з ладу конденсатора перетворювач частоти найчастіше відключається через недостатнє згладжування напруги на шині постійного струму для проведення профілактичного обслуговування і запобігання поломки силових елементів інвертора.

**Аналіз попередніх досліджень.** В роботах [2, 3] надається оцінка факторів, які впливають на термін експлуатації електролітичних конденсаторів, а також види пошкодження конденсаторів і їх взаємозв'язок з оцінюваними факторами (робочою напругою, частотою та амплітудою пульсуючих струмів, температурою). Наведені в цих роботах результати досліджень важливі, їх потрібно застосовувати при розробці систем діагностування не лише окремо взятих конденсаторів, але і комплектних пристроїв, до складу яких вони входять. Одним з найважливіших застосувань таких конденсаторів є перетворювачі частоти регульованих електроприводів. Діагностування в темпі процесу такої ланки як шина постійного струму перетворювача частоти, а конденсатор є одним з її основних елементів, розглядається в роботі [1]. Однак в запропонованій моделі відсутня можливість відстроювання від короточасних нестійких впливів динамічних режимів роботи електроприводу на ланку постійного струму і конденсатор, що може призводити до прийняття хибних рішень першого та другого роду системою діагностування.

**Мета роботи.** Розробка математичної моделі та структури системи діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти з автономним інвертором напруги яка враховує фактичний термін напрацювання на відмову конденсатора, динамічні збурення з боку електропривода та мережі та дозволяє вчасно виявляти критичний стан робочого конденсатора.

**Матеріал і результати дослідження.** Електролітичні конденсатори, які використовуються в складі автономних інверторів напруги перетворювачів частоти регульованих електроприводів володіють відповідним терміном напрацювання на відмову в роботі (англ. *Lifetime*), який при розробці системи діагностування являється визначальним, оскільки є функціоналом багатьох критеріїв експлуатації перетворювачів частоти.

В загальному випадку фактичний термін напрацювання  $L_f$  на відмову визначається за паспортним терміном напрацювання на відмову  $L_n$  та експлуатаційним коефіцієнтом  $k$  [3]

$$L_f = L_n \cdot k. \quad (1)$$

Час напрацювання конденсатора, який відповідає поточному ресурсу може бути визначеним, виходячи з (1) як різниця між паспортним терміном напрацювання та фактичним

$$t = L_n - L_f = L_n \cdot (1 - k). \quad (2)$$

Імовірність безвідмовної роботи електронної апаратури визначається, виходячи з відомої інтенсивності відмов  $\lambda$ , що найчастіше має постійне значення ( $\lambda = const$ ) [4]

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t}, \quad (3)$$

Відповідно, імовірність виникнення відмови в процесі роботи конденсатора на момент часу  $t$  визначатиметься

$$N(t) = 1 - P(t). \quad (4)$$

Отже, функція залежності імовірності виникнення відмови  $N(t)$  від експлуатаційного коефіцієнту, яка отримана шляхом підстановки рівняння (2) в вираз (4) з відповідним перетворенням  $t$  через  $k$ , матиме вигляд симетричної експоненти (рис. 1).

$$N(k) = 1 - e^{(-\lambda \cdot L_n \cdot (1-k))}. \quad (5)$$

Слід зауважити, що більшому значенню імовірності виникнення відмови відповідає і більша кількість конденсаторів, яка вийшла з ладу при досягненні відповідного значення експлуатаційного коефіцієнта. Тому в процесі розробки структури системи діагностування в якості основного діагностичного параметру буде розглядатись саме експлуатаційний коефіцієнт  $k$ .

Експлуатаційний коефіцієнт враховує вплив трьох вагових коефіцієнтів на фактичний термін напрацювання: температури, пульсуючого (випрямленого) струму та робочої напруги та визначається їхнім добутком [5]

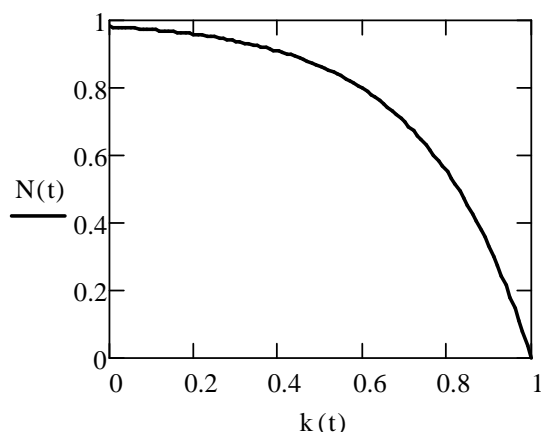


Рис. 1 Залежність імовірності виникнення відмови конденсатора від експлуатаційного коефіцієнта

$$k = k_t \cdot k_r \cdot k_v \quad (6)$$

Температурний ваговий коефіцієнт зазвичай визначається за правилом «10 Кельвінів»: зниження температури оточуючого середовища на 10 К приводить до збільшення терміну експлуатації вдвічі. Температурний коефіцієнт розраховується за формулою [6]

$$k_t = 2^{\frac{T_o - T_a}{10}}, \quad (7)$$

де  $T_o$  – максимально допустима температура експлуатації,  $T_a$  – фактична температура роботи конденсатора.

Ваговий коефіцієнт  $k_r$  враховує вплив пульсуючого струму, що отриманий після випрямлення на мостовій схемі випрямляча перетворювача частоти. На величину пульсуючого струму впливає також режим роботи електроприводу та інвертора (розгін, гальмування, динамічна зміна навантаження тощо). Внаслідок зміни амплітуди пульсуючого струму змінюватимуться і втрати потужності в конденсаторі  $I^2 \cdot ESR$  (equivalent series resistance – еквівалентний послідовний опір конденсатора в колі змінного струму), зміна втрат потужності також впливатиме на тепловий режим конденсатора. ESR конденсаторів залежить від частоти пульсуючого струму та робочої температури. В роботі приймемо значення частоти пульсуючого струму рівним 300 Гц, що відповідає частоті пульсацій випрямленої напруги в схемі Міткевича, така частота пульсацій практично не приводить до відхилення ESR відносно його номінального значення, що встановлюється при частоті 100-120 Гц [5]. В [3] запропоновано для розрахунку вагового коефіцієнту пульсуючого струму використати емпіричну залежність, яку можна виразити за допомогою рівняння (8)

$$k_r = \begin{cases} 4 \exp\left(\left(1 - \frac{I_a}{I_o}\right) \cdot \frac{T_o - T_a}{10}\right), & \text{якщо } T_a > 85^\circ\text{C}, I_a > I_o; \\ 2 \exp\left(\left(1 - \frac{I_a}{I_o}\right) \cdot \frac{T_o - T_a}{10}\right), & \text{якщо } T_a \leq 85^\circ\text{C}, I_a \leq I_o; \end{cases} \quad (8)$$

де  $I_a$  – фактичний пульсуючий струм конденсатора,  $I_o$  – номінальний пульсуючий струм конденсатора для промислової частоти.

Вплив робочої напруги на конденсаторі перетворювача частоти враховується окремим ваговим коефіцієнтом  $k_v$ . Відхилення робочої напруги ланки постійного струму перетворювачів частоти від номінальної відбувається внаслідок коливань напруги мережі живлення, перехідних процесів електроприводу (розгін – пониження напруги, гальмування – перенапруга). Для визначення  $k_v$  виробниками електронної апаратури рекомендується рівняння, яке отримане за статистичними даними випробувань конденсаторів при експлуатації на різних робочих напругах [5]

$$k_v = \begin{cases} \left(\frac{U_a}{U_o}\right)^3, & \text{якщо } \frac{U_a}{U_o} \in [0,5; 0,8]; \\ \left(\frac{U_a}{U_o}\right)^5, & \text{якщо } \frac{U_a}{U_o} \in [0,8; 1,5]; \end{cases} \quad (9)$$

де  $U_a$  – робоча напруга конденсатора перетворювача частоти,  $U_o$  – номінальна напруга конденсатора.

Отже, для встановлення експлуатаційного коефіцієнту  $k$  та визначення ступеня його наближення до несправного стану слід вимірювати наступні параметри: температуру конденсатора, миттєве значення струму конденсатора та напругу на його виводах (рис. 2). За вказаними параметрами слід по рівнянням (7-9) визначити вагові коефіцієнти, а за рівнянням (6) обчислити ваговий коефіцієнт.

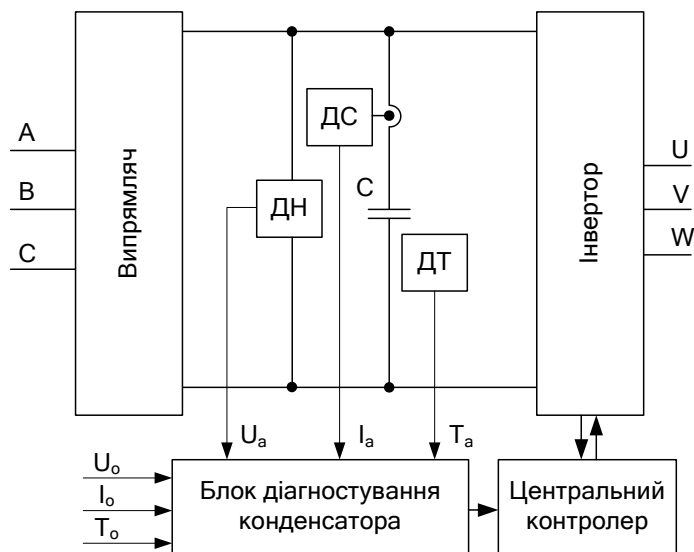


Рис. 2 – Структурна схема системи діагностування конденсаторів перетворювачів частоти

В схемі на рис. 2 ДС – датчик струму  $I_a$ , ДН – датчик напруги  $U_a$ , ДТ – датчик температури  $T_a$ . Номінальні експлуатаційні параметри  $U_o$ ,  $I_o$ ,  $T_o$  задаються в мікропроцесорному блоку діагностування відповідними константами.

За обчисленим в реальному часі значенням вагового коефіцієнту згідно виразу (5) встановлюється імовірність його виходу з ладу, що за умови досягнення критичного значення  $N(t)$  слід вважати за попередження про необхідність виведення перетворювача частоти в ремонт та заміну конденсатора. Вчасно виконаний запобіжний ремонт дозволить уникнути пошкоджень під час роботи електроприводу, простой обладнання, аварій, нещасних випадків залежно від механізму, який приводиться в дію електроприводом.

Нехай критичним значенням імовірності виходу з ладу конденсатора є  $N_k = 0,5$ . За залежністю (5) (рис. 3) встановлюється відповідне значення експлуатаційного коефіцієнту  $k$ , яке відповідає попереджувальному рівню про можливість швидкого виходу з ладу конденсатора.

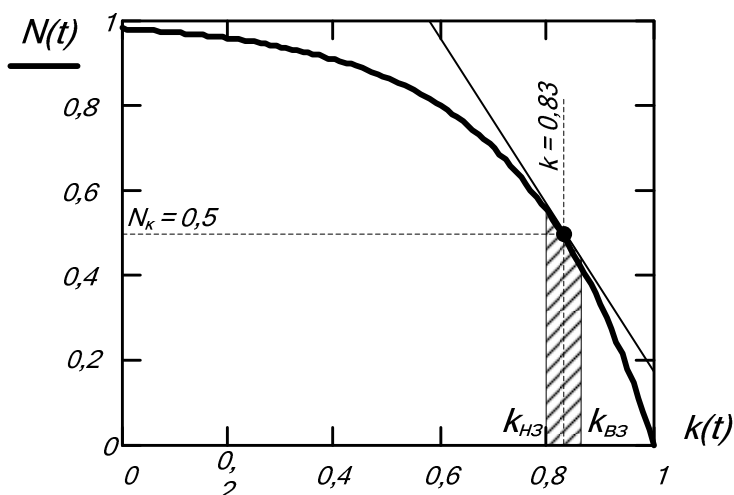


Рис. 3 – Визначення критичного значення експлуатаційного коефіцієнту

Для уникнення хибного висновку системи діагностування виділяється зона нечутливості навколо критичного значення експлуатаційного коефіцієнту (заштрихована область на рис. 3). Зона нечутливості обмежується граничними значеннями: верхнім  $k_{B3}$  та нижнім  $k_{H3}$ . Для визначення меж зони нечутливості використовується геометрична побудова – до залежності  $N(k)$  будується дотична в точці, що відповідає критичному значенню  $N_k$ . Область прилягання дотичної до функції  $N(k)$ , де їх різниця за модулем не перевищує 5% можна вважати і допустимою зоною нечутливості.

Висновок щодо можливості подальшої експлуатації перетворювача частоти з діагностованим конденсатором доцільно формувати не миттєво при виході експлуатаційного коефіцієнта  $k$  за зону нечутливості, але слід враховувати і часовий фактор. Наприклад, змінний, динамічний характер навантаження електроприводу може обумовити лише короточасний вихід коефіцієнту  $k$  за зону нечутливості, а його повернення призведе до прийняття системою діагностування хибного рішення першого роду. Для уникнення описаного варіанту роботи системи розглядається комбінована модель прийняття діагностичного висновку з врахуванням часової затримки та повторного обчислення експлуатаційного коефіцієнту з порівнянням його поточного значення з попереднім. Така модель може бути описана виразом (10).

$$k(t) = 2^{\frac{T_o - T_d(t)}{10}} \cdot m \left( 1 - \frac{I_a(t)}{I_o} \right)^{\frac{T_o - T_d(t)}{10}} \cdot \left( \frac{U_a(t)}{U_o} \right)^n,$$

$$\begin{cases} k(t) < k_{нз} \wedge k(t - \tau) < k_{нз} \wedge \frac{dk(t)}{dt} \leq 0 \rightarrow \text{несправність}; \\ k(t) \in [k_{нз}; k_{гз}] \wedge \frac{dk(t)}{dt} \leq 0 \rightarrow \text{на межі несправності}; \\ k(t) > k_{гз} \vee \left( k(t) \in [k_{нз}; k_{гз}] \wedge \frac{dk(t)}{dt} > 0 \right) \rightarrow \text{справний стан}, \end{cases} \quad (10)$$

де  $\tau$  – час затримки для формування діагностичного висновку.

Включення похідної по часу експлуатаційного коефіцієнта є обов'язковим та дозволить уникнути прийняття системою діагностування хибних рішень навіть при виході його за допустимі межі (в основному в сторону  $k_{нз}$ ), однак тенденції до повернення його в зону нечутливості, або переходу  $k(t)$  із зони нечутливості відносно критичного значення в зону справної стійкої роботи з високим  $k$ . Разом з тим при тривалому і незворотному процесі зниження обчисленого коефіцієнту  $k$  система повідомить про роботу конденсатора на межі справності, або про його несправність.

Запропонована математична модель (10) закладається в основу програмного забезпечення цифрового сигнального процесора *DSP* (*digital signal processor*), який включається в загальну систему діагностування перетворювача частоти на існуючу шину обміну даними з центральним контролером по підтримуваному ним одному з цифрових протоколів (*CAN*, *I2S* тощо). Таким чином реалізується на апаратно-програмному рівні система діагностування на рис. 2.

**Висновки.** Розглянуто вплив параметрів роботи конденсаторів перетворювачів частоти на їх термін напрацювання на відмову, що дозволяє сформулювати математичну модель системи діагностування конденсаторів та її структурну схему.

Розроблено математичну модель системи діагностування конденсаторів перетворювачів частоти, яка враховує динаміку зміни експлуатаційного коефіцієнта в часі, знак його похідної, що дозволяє уникнути прийняття системою хибних рішень першого роду, вчасно попереджувати обслуговуючий персонал про критичний стан робочого конденсатора, необхідність виведення перетворювача частоти в ремонт та запобігати пошкодженням конденсатора.

**Список літератури:** 1. *Fuchs Friedrich*. Some Diagnosis Methods for Voltage Source Inverters In Variable Speed Drives with Induction Machines/ *Friedrich W. Fuchs* // University of Kiel, Germany. – IEEE, Industrial Electronics Conference, Roanoke, Virginia, USA, 2002 – 8 p. 2. *Gasperi M. L.* A Method for Predicting the Expected Life of Bus Capacitors / *M. L. Gasperi* – Rockwell Automation // IEEE Industry Applications Society, Annual Meeting. 1997 – 6 p. 3. *Albertsen A.* Electrolytic Capacitor Lifetime Estimation / *Dr. Arne Albertsen* – Jianghai Europe Electronic Components GmbH, 2012 – 13 p. 4. *Половко А. М.* Основы теории надежности // *А. М. Половко, С. В. Гуров*. – СПб.: БХВ-Петербург. – 2008. – 704с. 5. *Радюшкин О.* Методы оценки срока эксплуатации электролитических конденсаторов / *Олег Радюшкин*. – Силовая электроника. – 2010. – № 5. – С. 19-22. 6. *Khandebharad A. R.* Electrolytic capacitor online failure detection and life prediction methodology / *A. R. Khandebharad, R. B. Dhumale, S. S. Lokhande* // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2015. – №2, vol. 4 – P.78-83. – ISSN 2321-7308.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Fuchs Friedrich*. Some Diagnosis Methods for Voltage Source Inverters In Variable Speed Drives with Induction Machines/ *Friedrich W. Fuchs* // University of Kiel, Germany. – IEEE, Industrial Electronics Conference, Roanoke, Virginia, USA, 2002 – 8 p. 2. *Gasperi M. L.* A Method for Predicting the Expected Life of Bus Capacitors / *M. L. Gasperi* – Rockwell Automation // IEEE Industry Applications Society, Annual Meeting. 1997 – 6 p. 3. *Albertsen A.* Electrolytic Capacitor Lifetime Estimation / *Dr. Arne Albertsen* – Jianghai Europe Electronic Components GmbH, 2012 – 13 p. 4. *Polovko A. M., S. V. Gurov.* *Osnovy teorii nadezhnosti*. The elements of reliability theory. – СПб.: BHV-Peterburg. – 2008. – 704 p. Print. 5. *Radiushkin O.* *Metody otsenki sroka ekspluatatsii elektroliticheskikh kondensatorov*. The valuation methods of electrolytic capacitor's lifetime. – *Silovaya elektronika*. Power Electronics – 2010. – № 5. – PP. 19-22. Print. 6. *Khandebharad A. R.* Electrolytic capacitor online failure detection and life prediction methodology / *A. R. Khandebharad, R. B. Dhumale, S. S. Lokhande* // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2015. – №2, vol. 4 – P.78-83. – ISSN 2321-7308.

Поступила (received) 03.07.2015