

УДК 621.341.572

**С. М. ЛЕВИЦЬКИЙ** (канд. техн. наук, доц.), **Д. П. ПРОЦЕНКО**, (канд. техн. наук, доц.)

**А. А. БАРТЕЦЬКИЙ**

**Вінницький національний технічний університет**

**procenkod@rambler.ru**

## **МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ПРИСТРІЙ ДІАГНОСТУВАННЯ КОНДЕНСАТОРІВ ЛАНКИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ**

*Розроблено мікропроцесорний пристрій діагностування конденсаторів перетворювачів частоти, який 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. Здійснено синтез апаратного та програмного забезпечення необхідного для побудови системи діагностування фільтруючих конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти.*

**Ключові слова:** *електропривод, перетворювач частоти, конденсатор, діагностування, експлуатаційний коефіцієнт, мікроконтролер, автономний інвертор напруги, випрямляч, математична модель, несправність.*

**Постановка проблеми.** Діагностика елементів регульованих електроприводів змінного струму необхідна для запобігання виникнення аварійних ситуацій та незапланованих простоїв технологічного обладнання. Особливо гостро відчувається необхідність діагностування перетворювачів частоти, які на сьогоднішній день є ключовим елементом регульованих електроприводів змінного струму [1]. Автономні інвертори напруги на шинах постійного струму мають електrolітичні конденсатори, призначені для фільтрування пульсуючих струмів та стабілізації напруги на вході інвертора. Фільтруючі конденсатори, мають обмежений термін експлуатації, який залежить від умов експлуатації, і він часто менший, ніж у силових напівпровідникових елементів інвертора. Якщо конденсатор виходить з ладу, або змінює свої характеристики перетворювач частоти найчастіше відключається через недостатнє згладжування напруги на шині постійного струму для проведення профілактичного обслуговування і запобігання поломки силових елементів інвертора. Для уникнення несправності викликаной зміною характеристик конденсатора ланки постійного струму необхідно застосовувати сучасні пристрої діагностування, які дозволять визначати критичний стан конденсатора, ще до виходу його характеристик за межі допустимих значень.

**Аналіз попередніх досліджень.** В роботах [2, 3] надається оцінка факторів, які впливають на термін експлуатації електrolітичних 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 запропонованому пристрої відсутня можливість відстроювання від короткочасних 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.** Метою роботи є підвищення надійності функціонування перетворювачів частоти з автономним інвертором напруги, за рахунок розробки мікропроцесорного пристрою діагностування конденсаторів ланки постійного струму, який враховує фактичний термін напрацювання на відмову, динамічні збурення з боку електропривода та мережі та дозволяє виявляти критичний стан конденсатора.

**Матеріали дослідження** В роботі [4] запропоновано математичну модель системи діагностування конденсаторів перетворювачів частоти, яка враховує вплив температури, пульсуючого струму та коливання напруги мережі, додатково в моделі враховано динаміку зміни експлуатаційного коефіцієнта в часі, знак його похідної. 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, може мати місце лише короткочасний вихід коефіцієнту  $k$  за зону нечутливості, а його повернення призведе до прийняття системою діагностування хибного рішення першого роду, тому пропонується комбінована модель прийняття діагностичного висновку з врахуванням часової затримки та повторного обчислення експлуатаційного коефіцієнту з порівнянням його поточного значення з

попереднім. Аналітично модель описується системою рівнянь (1).

$$\begin{cases}
 k(t) = 2^{\frac{T_o - T_a(t)}{10}} \cdot m \left(1 - \frac{I_a(t)}{I_o}\right)^{\frac{T_o - T_a(t)}{10}} \cdot \left(\frac{U_a(t)}{U_o}\right)^n; \\
 k(t) < k_{нз} \wedge k(t - \tau) < k_{нз} \wedge \frac{dk(t)}{dt} \leq 0 \rightarrow \text{несправність}; \\
 k(t) \in [k_{нз}; k_{єз}] \wedge \frac{dk(t)}{dt} \leq 0 \rightarrow \text{на межі несправності}; \\
 k(t) > k_{єз} \vee \left(k(t) \in [k_{нз}; k_{єз}] \wedge \frac{dk(t)}{dt} > 0\right) \rightarrow \text{справний стан};
 \end{cases}
 \quad (1)$$

де  $\tau$  – час затримки для формування діагностичного висновку;  $T_o$  – максимально допустима температура експлуатації,  $T_a$  – фактична температура роботи конденсатора;  $I_a$  – фактичний пульсуючий струм конденсатора,  $I_o$  – номінальний пульсуючий струм конденсатора для промислової частоти;  $U_a$  – робоча напруга конденсатора перетворювача частоти,  $U_o$  – номінальна напруга конденсатора;  $m$  – температурний коефіцієнт;  $k$  – експлуатаційний коефіцієнт;  $k_{єз}$  - верхнє граничне значення експлуатаційного коефіцієнта;  $k_{нз}$  - нижнє граничне значення експлуатаційного коефіцієнта.

Запропоновано схему мікропроцесорного пристрою діагностування конденсаторів перетворювачів частоти, який функціонує згідно із рівняннями системи (10). Електричну схему пристрою представлено на рисунку 1.

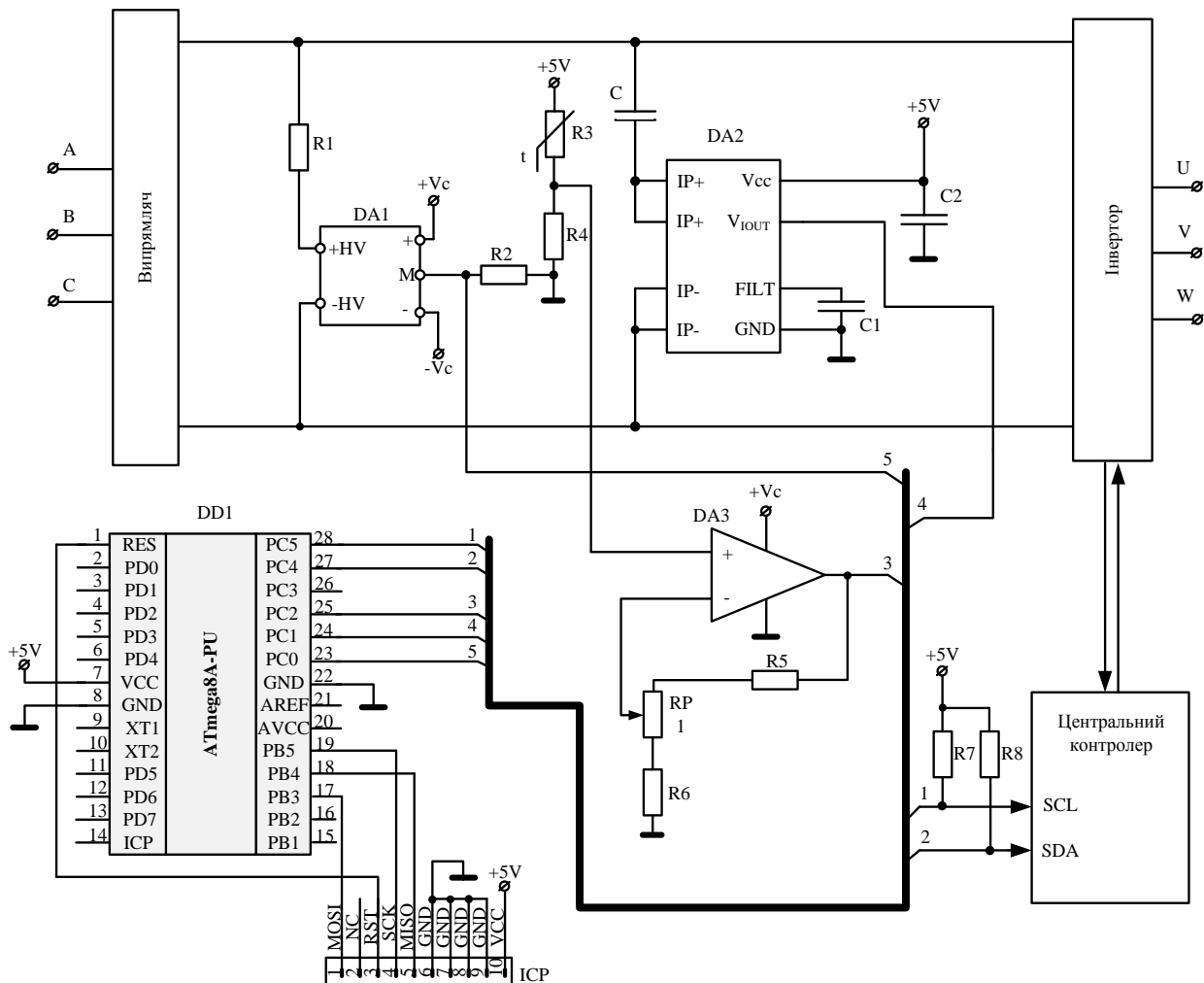


Рисунок 1 - Схема мікропроцесорного пристрою діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти

Реалізувати запропоновану систему діагностування конденсаторів перетворювачів частоти, можна використовуючи 8-розрядний RISC мікроконтролер Atmega8A-PU виробництва фірми Atmel, який для вирішення поставленої задачі має в своєму складі 23 програмованих канали портів вводу/виводу, модуль 10 – розрядного АЦП з шістьма мультиплексованими входами, три таймери, які можуть працювати в режимах

таймера, захвата та в режимі ШІМ, адресований модуль USART з підтримкою RS-232, Мікроконтролер має оптимізовану структуру та систему команд.

В якості сенсора напруги використовується компенсаційний сенсор напруги L25-P, який забезпечує гальванічну розв'язку інформаційного кола та силового кола. Вихідний сигнал L25-P можна безпосередньо підключати до вивода АЦП мікроконтролера, після додавання навантажувального резистора R3. Сигнал струму конденсатора формується на виході сенсора струму ACS712, даний сенсор також працює на ефекті Холла та має вихідний сигнал адаптований для застосування в мікропроцесорній техніці, конденсатори C1 та C2 призначені для фільтрації сигналу. Значення температури перетворюється у відповідний електричний сигнал з використанням лінійного термометра опору моделі 700-101BAA-B00, який встановлено безпосередньо на конденсаторі та з'єднаний за схемою подільника напруги з резистором R4. Сигнал напруги пропорційний температурі конденсатора з виходу подільника R3, R4 підсилюється операційним підсилювачем DA3, включеним за схемою неінвертуючого підсилювача з можливістю регулювання коефіцієнта підсилення потенціометром RP1. Зв'язок мікропроцесорного пристрою діагностування конденсаторів з центральним контролером керування інвертором здійснюється по стандартному протоколу TWI. Для зміни констант та початкових значень експлуатаційних параметрів пристрій оснащено гніздом для внутрішньосхемного програмування ICP.

Робота схеми полягає в циклічному опитуванні сигналів сенсорів, що надходять на входи АЦП мікроконтролера та визначенні технічного стану конденсатора ланки постійного струму перетворювача частоти, який визначається згідно моделі діагностування описаної системою рівнянь (1).

Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою діагностування конденсаторів перетворювачів частоти представлено на рисунку 2.

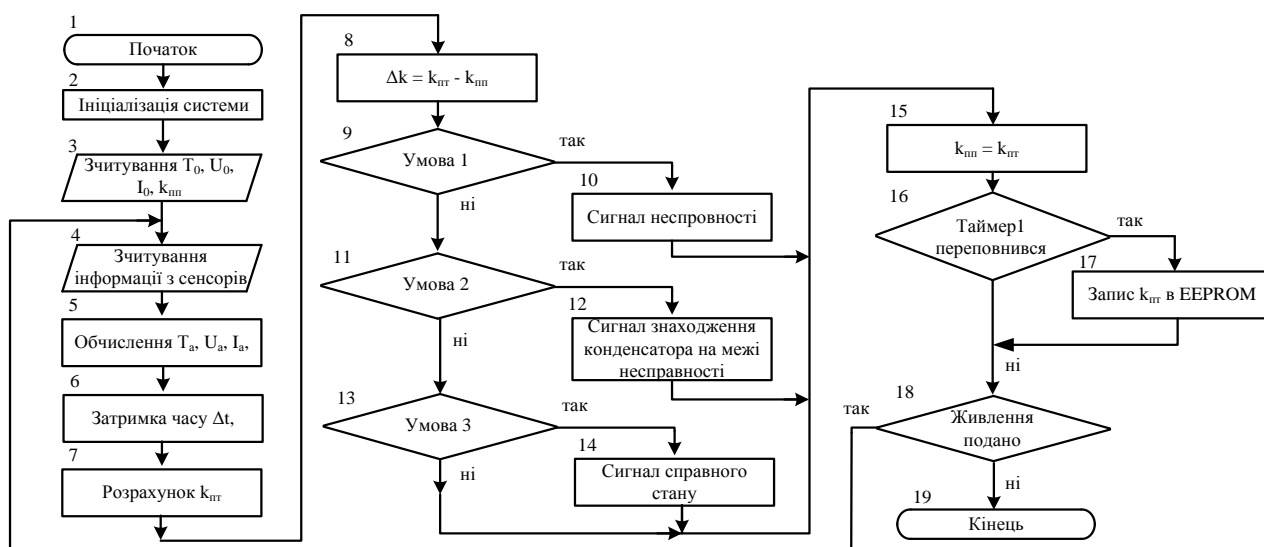


Рисунок 2 - Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою діагностування конденсаторів перетворювачів частоти

Алгоритм містить такі складові: в блоці 2 відбувається ініціалізація мікропроцесорної системи та налаштування портів та початкових значень необхідних параметрів; в блоці 3 проводиться зчитування інформації з внутрішньої енергонезалежної пам'яті значень експлуатаційних параметрів  $I_\phi$ ,  $T_\phi$ ,  $U_\phi$  та попереднього значення експлуатаційного коефіцієнта  $k_{nm}$ ; в блоках 4, 5 проводиться зчитування та перетворення за допомогою АЦП мікроконтролера значень напруг з виводів портів до яких під'єднано сенсори струму конденсатора, напруги на шині постійного струму та температури конденсатора; блоки 6, 7 забезпечують розрахунок поточного значення експлуатаційного коефіцієнта  $k_{nm}$  згідно першої формули системи (1) через час  $\Delta t$ ; в блоці 8 відбувається визначення зміни значення експлуатаційного параметра  $\Delta k$ , яка відбувається за фіксовані проміжки часу  $\Delta t$ , таким чином  $\Delta k$  пропорційний першій похідній від  $k$  по часу; в блоці 9 відбувається перевірка умови згідно другого рівняння системи (1), якщо дана умова виконується контролер формує сигнал несправності, який передається до центрального контролера по мережі TWI; в блоці 11 відбувається перевірка умови згідно третього рівняння системи (1), якщо дана умова виконується контролер формує сигнал перебування конденсатора на межі несправності, який передається до центрального контролера; в блоці 12 відбувається перевірка умови згідно четвертого рівняння системи (1), якщо дана умова виконується контролер формує сигнал справного стану, який передається до центрального контролера по мережі TWI; в блоці 15 відбувається запис попереднього значення експлуатаційного коефіцієнта, що дорівнює його поточному значенню; блоки 16, 17 відповідають за запис в енергонезалежну пам'ять (EEPROM) попереднього значення експлуатаційного коефіцієнта через визначені таймером рівні проміжки часу.

На рисунку 3 наведено фрагмент лістингу програми на мові програмування C, який описує основні функціональні можливості розробленого мікропроцесорного пристрою діагностування конденсаторів ланки

постійного струму перетворювачів частоти. Зокрема змінні  $U_m$ ,  $I_c$  та  $T_c$  формуються в результаті виконання функції аналого-цифрового перетворення напруги з входів A0, A1 та A2, які відповідають напрузі ланки постійного струму, струму конденсатора та температури конденсатора.

```

U_m = analogRead(A0);
I_c = analogRead(A1);
T_c = analogRead(A2);

k_pt = model(U_m, I_c, T_c);
dk = k_pt - k_pp;
if(k_pt < k_lw && k_pp < k_lw && dk <= 0){
    twi_val = Code_1; // код несправного стану
}
if(k_pt >= k_lw && k_pt <= k_hi && dk <= 0){
    twi_val = Code_2; // код стану на межі несправності стану
}
if(k_pt > k_hi || (k_pt >= k_lw && k_pt <= k_hi && dk > 0)){
    twi_val = Code_3; // код справного стану
}
Wire.beginTransmission(Address); // початок передачі даних
Wire.write(twi_val); // відправка байта twi_val
Wire.endTransmission(); // кінець передачі даних

```

Рисунок 3 - Фрагмент лістингу програми мікроконтролера пристрою діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти

Функція `model()` за вказаними значеннями повертає значення експлуатаційного коефіцієнта в змінну `k_pt`. Далі перевіряються умови для визначення діагностичного стану згідно рівнянь системи (1), коди які відповідають стану конденсатора передаються центральному контролеру за адресою `Address` по мережі TWI. Дана програма може бути зашита в мікроконтролер який буде в темпі процесу функціонування перетворювача частоти здійснювати діагностування стану електролітичного конденсатора ланки постійного струму з метою своєчасного виявлення його несправності без виникнення аварійних режимів.

**Висновки.** В роботі запропоновано теоретичні та прикладні аспекти реалізації мікропроцесорного пристрою діагностування фільтруючих електролітичних конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти, який враховує динаміку зміни експлуатаційного коефіцієнта в часі, знак його похідної, що дозволяє уникнути прийняття системою хибних рішень, вчасно попереджувати обслуговуючий персонал про критичний стан робочого конденсатора, необхідність виведення перетворювача частоти в ремонт та запобігати пошкодженням конденсатора. Здійснено синтез апаратного та програмного забезпечення необхідного для побудови системи діагностування фільтруючих конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти. Запропонований алгоритм та програмна реалізація мікропроцесорного пристрою легко інтегруються в загальну систему діагностування елементів перетворювачів частоти.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fuchs Friedrich (2003), "Some Diagnosis Methods for Voltage Source Inverters In Variable Speed Drives with Induction Machines", *Industrial Electronics Society, The 29th Annual Conference of the IEEE*, Roanoke, Virginia, USA, Nov 2-3, 2003, p 8.
2. Gasperi, M. L.(1997), "A Method for Predicting the Expected Life of Bus Capacitors", *Industry Applications Conference, 1997, Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97*, , New Orleans, Oct. 5-9, 1997, pp. 1042-1047, vol 2.
3. Albertsen, A (2012), "Electrolytic Capacitor Lifetime Estimation", *Jianghai Europe Electronic Components GmbH*, Vol 3, 2012, pp. 52-54 p.
4. Левицький С.М., Проценко Д.П., Бартецький А.А. Система діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти // Вісник НТУ «ХП», 2015.- Вип. 12.- С.320-323.

#### REFERENCES

1. Fuchs Friedrich (2003), "Some Diagnosis Methods for Voltage Source Inverters In Variable Speed Drives with Induction Machines", *Industrial Electronics Society, The 29th Annual Conference of the IEEE*, Roanoke, Virginia, USA, Nov 2-3, 2003, p 8.
2. Gasperi, M. L.(1997), "A Method for Predicting the Expected Life of Bus Capacitors", *Industry Applications Conference, 1997, Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97*, , New Orleans, Oct. 5-9, 1997, pp. 1042-1047, vol 2.
3. Albertsen, A (2012), "Electrolytic Capacitor Lifetime Estimation", *Jianghai Europe Electronic Components GmbH*, Vol 3, 2012, pp. 52-54 p.

4. Levytskyi, S. Protsenko, D. and Bartetskyi, A. (2015), "The Diagnosis System for Capacitors of DC Circuits of Frequency Converter", *Vestnik NTU "KPI"*, Vol. 12, pp. 320-323.

*Надійшла до редколегії 01.12.2015*

*Рецензент: Лежнюк П.Д.*

S. LEVYTSKYI, D. PROTSENKO, A. BARTETSKYI  
Vinnytsia National Technical University

**Microprocessor device for the diagnosis of capacitors DC link bus of frequency converters.** The paper presents a theoretical and applied aspects of implementation diagnosing microprocessor for filtering electrolytic capacitor DC link frequency converters. The synthesis of hardware and software necessary to build a system of diagnostic filter capacitor frequency converters, which allows to identify the critical operating state of the capacitor and to prevent damage of the frequency converter. The proposed model is based on the calculation of the actual values of the lifetime factor, which binds the actual capacitor's lifetime with its nominal value. Calculation of lifetime factor involves the measurement of the voltage on the capacitor plates, ripple current and temperature of the capacitor. The diagnostic conclusion generated by the system taking into account the duration of the lifetime factor overrange due to the input of time delay and compare the results of calculation of the lifetime factor at the beginning and at the end of the delay interval, as well as considering the sign of the derivative of the factor in time to avoid erroneous conclusions with short-term perturbations. Diagnostic device based on microcontroller Atmega8A, as the voltage sensor uses a compensation voltage sensor L25-P, current signal formed at the output capacitor current sensor ACS712. These sensors operate on the Hall effect, which provides galvanic isolation range of information and power circles. Temperature sensor 700-101BAA-B00 is installed directly on the capacitor. Communication capacitors diagnostics microprocessor devise with central controller of inverter control is carried out on a standard protocol TWI. To change the constants and initial values of operating parameters device has a socket for In-System Programming. Proposed algorithm and software implementation microprocessor devise for easily integrated into the overall system diagnostics elements frequency converters.

**Key words:** *electric drive, frequency converter, capacitor, diagnostics, operating ratio, microcontroller, autonomous voltage inverter, rectifier, mathematical model, technical fault.*