

УДК 621.314

С. М. Левицький, канд. тех. наук, доц.;

А. А. Бартецький, студ.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ГАЛЬМІВНИХ КІЛ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Запропоновано математичну модель системи діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотних електроприводів, яка враховує похідну напруги на конденсаторі фільтра і дозволяє проводити діагностування гальмівного кола під час роботи електропривода.

### Постановка проблеми

Гальмівні кола перетворювачів частоти в сучасному електроприводі необхідні для розсіювання енергії, яка виникає в ланці постійного струму під час гальмування електродвигуна з механізмом, що має великий момент інерції. В першу чергу вони використовуються для механізмів з коротким робочим циклом (пакування), механізмів вертикального переміщення (ліфти), механізмів з регульованим моментом гальмування (ниткоукладчики). За рахунок гальмівних кіл забезпечується повна зупинка агрегату за заданого уповільнення або тривала робота в режимі генераторного гальмування [1]. В сучасному електроприводі поряд з розвитком алгоритмів управління колами скиду та рекуперації енергії в гальмівних режимах існує *проблема* вдосконалення систем діагностування таких гальмівних кіл з урахуванням стану їх ключових елементів, використанням перехресних способів локалізації несправностей.

### Аналіз останніх досліджень

Метод діагностування силових модулів частотного електропривода, що розглядається в роботі [2], базується на оцінюванні відповідності струму силового кола зусиллю в електромеханічній системі під час гальмування, однак взято до уваги варіант, коли розсіювання енергії гальмування здійснюється на самих модулях та електродвигуні, що доцільно лише для приводів з малими значеннями потужності, часу гальмування та невеликим моментом інерції. Відомий спосіб визначення роботоздатності силового транзисторного модуля, в тому числі і кола гальмування, що враховує значення абсолютної температури кристалу транзистора та перепаду температури на його радіаторі [3]. Цей спосіб не дозволяє оцінити поточний стан всього гальмівного кола, а також є малоефективним під час визначення роботоздатності модуля на коротких циклах гальмування.

### Постановка завдання

В роботі [4] запропоновано математичну модель системи діагностування силових модулів перетворювачів частоти, однак для комплексного діагностування усіх ділянок перетворювального агрегату частотного електропривода *потрібно* розробити математичну модель системи діагностування гальмівного кола перетворювача, що дозволить проводити оцінку роботоздатності як за коротких, так і за тривалих циклів гальмування електропривода.

### Матеріали дослідження

В роботі [5] розглядаються електромеханічні процеси в перетворювальному агрегаті з ланкою скиду енергії гальмування для транзисторного електропривода постійного струму. Розглянемо детальніше електромеханічні процеси гальмування асинхронного привода з перетворювачем частоти (ПЧ) з автономним інвертором напруги (АІН) з допомогою зазначеної методики для визначення необхідних складових діагностичної змінної гальмівного кола ПЧ.

Робота асинхронного двигуна (АД) в режимі генераторного гальмування, що сприймається з боку навантаження, може бути визначена таким чином:

$$A = M\Delta\omega t_r = W_A + W_L + W_C, \quad (1)$$

де  $t_r$  — час гальмування;  $M$  — статичний момент, який діє на електромеханічну систему з боку навантаження протягом часу гальмування  $t_r$ ;  $\Delta\omega$  — зміна швидкості від початкового усталеного значення  $\omega_1$  на початку гальмування до усталеного значення  $\omega_2$  по завершенню гальмування (в кінці  $t_r$ );  $W_A$ ,  $W_L$ ,  $W_C$  — складові енергій, що накопичуються при виконаній роботі на активному, індуктивному елементах схеми заміщення асинхронного двигуна та ємності фільтра С ПЧ (рис. 1).

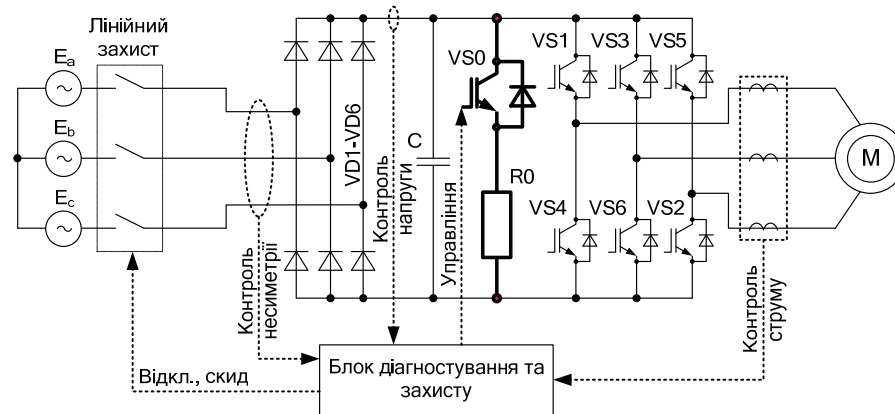


Рис. 1. Типова структура управління гальмівним колом частотних електроприводів

Енергія гальмування, яка розсіюється на активному опорі схеми заміщення АД

$$W_A = m I_p^2 (R_1 + R'_2) t_r, \quad (2)$$

де  $m$  — кількість фаз двигуна;  $I_p$  — струм робочої вітки Г-подібної схеми заміщення АД;  $R_1$  — активний опір обмотки статора АД;  $R'_2$  — приведений опір обмотки ротора АД до обмотки статора.

Енергія гальмування, яка розсіюється в індуктивностях схеми заміщення

$$W_L = m \frac{L_e I_p^2}{2}, \quad (2)$$

де  $L_e = \frac{(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}) M_{12}}{L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2} + M_{12}}$  — еквівалентна індуктивність схеми заміщення АД;  $L_{\sigma 1}$ ,  $L_{\sigma 2}$  — індуктивності розсіювання обмоток статора та ротора АД, відповідно;  $M_{12}$  — взаємна індуктивність обмоток статора та ротора, зумовлена потокозчепленням обмоток.

Енергія гальмування, яка розсіюється на конденсаторі фільтра:

$$W_C = \frac{C \Delta U_c^2}{2}, \quad (3)$$

де  $C$  — значення ємності фільтра ПЧ;  $\Delta U_c$  — перенапруга на конденсаторі фільтра під час гальмування привода.

Струм робочої вітки АД після приведення трифазної системи до ортогональної визначатиметься двома складовими — поздовжньою (реактивною, що відповідає струму намагнічування АД) та поперечною (активною, що відповідає за формування моменту АД і виконання ним механічної роботи). Після приведення струму робочої вітки до ланки постійного струму ПЧ він визначатиметься лише активною складовою і може бути визначений, виходячи з відомого значення моменту на валу АД [6]:

$$I_p = M/k_m, \quad (4)$$

де  $k_m$  — електромеханічний коефіцієнт АД, що враховує поздовжню складову струму робочої вітки та коефіцієнт приведення струму з трифазної системи до ортогональної.

Складові енергії гальмування, які вивільняються в контурі двигуна з урахуванням (4):

$$W_L = m \cdot \frac{L_e I_p^2}{2} = \frac{L_e}{2} \cdot \frac{M^2}{k_m^2}, \quad (5)$$

$$W_A = m \cdot I_p^2 (R_1 + R_2') \cdot t_r = \frac{M^2}{k_m^2} \cdot R_p \cdot t_r. \quad (6)$$

Якщо під час гальмування виділяється більша кількість енергії, ніж та, що може накопичитися в активних та індуктивних елементах кола АД, то її надлишок розсіюватиметься на ємності конденсатора фільтра С. Таким чином, рівняння (3) можна визначити за виразом

$$W_C = A - (W_A + W_L) \quad (7)$$

або з урахуванням (1)—(6)

$$\frac{C \cdot \Delta U_c^2}{2} = M \cdot \Delta \omega \cdot t_r - \frac{M^2}{k_m^2} \left( \frac{L_e}{2} + R_p \cdot t_r \right). \quad (8)$$

Приймемо відношення  $L_e/R_p$  за сталу часу схеми заміщення АД  $T_p$ . Тоді еквівалентна індуктивність схеми заміщення АД

$$L_e = T_p \cdot R_p. \quad (9)$$

Проведемо перетворення, винісши  $L_e$  як спільний множник,

$$\frac{C \cdot \Delta U_c^2}{2} = L_e \left( \frac{M \cdot \Delta \omega \cdot t_r}{T_p \cdot R_p} - \frac{M^2}{k_m^2} \left( \frac{1}{2} + \frac{t_r}{T_p} \right) \right) \quad (10)$$

і знайдемо перенапругу на конденсаторі фільтра, що зумовлена надлишком енергії гальмування в контурі АД

$$\Delta U_c = \sqrt{\frac{L_e}{C}} \sqrt{\left( \frac{M \Delta \omega}{R_p} \cdot \frac{2t_r}{T_p} - \frac{M^2}{k_m^2} \left( 1 + \frac{2t_r}{T_p} \right) \right)}. \quad (11)$$

З отриманого виразу видно, що перенапруга на конденсаторі фільтра є параметром, який свідчить про ефективність поглинання енергії гальмування елементами електропривода. В той же час, в електроприводі, який не має ланки скиду цієї перенапруги (гальмівним колом), вона може сягати небезпечних значень, що призводитимуть до пошкоджень силових транзисторних модулів та самого конденсатора. Виробники перетворювальної техніки в приводах малої потужності без гальмівних кіл для збільшення надійності змушені використовувати елементи з потрійним запасом за напругою, що відбивається на вартості обладнання.

В результаті дослідження об'єктної моделі АД в сукупності з ПЧ на основі АІН в середовищі Matlab побудовано діаграми зміни напруги на конденсаторі фільтра ПЧ з гальмівним колом (а) та без нього (б) (рис. 2).

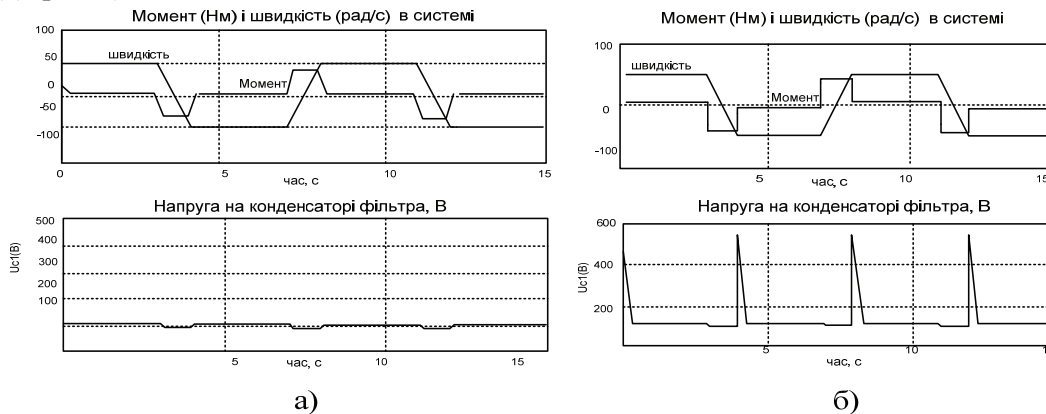


Рис. 2. Діаграми напруги на конденсаторі фільтра ПЧ з колом скиду енергії (а) та без нього (б)

На механічних характеристиках (рис. 3) позначені області генераторного режиму (1–1'), двигунного режиму (2–2') і режиму противмикання (3–3').

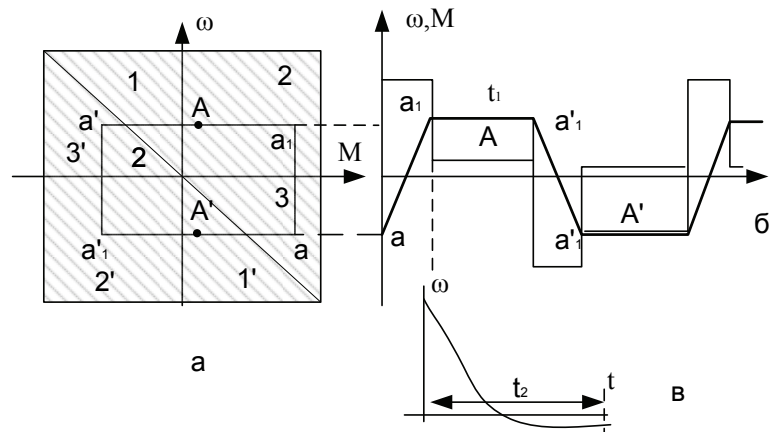


Рис. 3. Електромагнітні і електромеханічні процеси в електроприводі

Проведений розрахунок для ПЧ без гальмівного кола фактично відповідає роботі ПЧ з пошкодженим таким колом. Тому основним параметром, який повинен бути врахований діагностичною змінною є напруга на конденсаторі фільтра під час гальмування.

Частинним випадком зниження ефективності вивільнення енергії гальмування через розрядний резистор R0 (див. рис. 1) є збільшення спаду напруги на гальмівному ключі VS0, що може бути викликаний причинами заводського браку елементної бази, недоброякісним монтажем такої бази, а також монтажем ПЧ з порушенням умов охолодження. До іншого частинного випадку слід віднести можливе зниження струму через гальмівне коло за відкритого гальмівного ключа VS0, що викликане появою додаткового опору на клеммах підключення зовнішнього гальмівного резистора внаслідок неякісного монтажу, вібрації тощо.

З урахуванням вказаних випадків діагностична змінна гальмівного кола ПЧ являтиме собою функціонал

$$f_b(t) = \int_{\omega_2}^{\omega_1} (\Delta u_c(t) + k_u \cdot u_{vs}(t) - k_i \cdot i_b(t)) dt, \quad (12)$$

$$\begin{cases} \text{якщо } f_b(t) > 0,5; \quad \frac{du_c(t)}{dt} \geq 0 \rightarrow \text{несправність;} \\ \text{якщо } f_b(t) \leq 0,5; \quad \frac{du_c(t)}{dt} < 0 \rightarrow \text{нормальна робота.} \end{cases}$$

де  $\Delta u_c(t)$  — миттєве значення перенапруги на конденсаторі фільтра ПЧ;  $u_{vs}(t)$  — спад напруги на гальмівному ключі;  $i_b(t)$  — струм через розрядний резистор за відкритого гальмівного ключа;  $k_i$  — коефіцієнт, що враховує спад напруги на номінальному опорі гальмівного кола R0;  $k_u$  — коефіцієнт, що враховує тепловіддачу гальмівного кола.

Додатково в моделі прийняття рішення системи діагностування згідно з обчисленим значенням діагностичної змінної пропонується використати такий критерій, як знак похідної напруги на конденсаторі фільтра. Такий критерій необхідно використовувати у випадках експлуатації ПЧ з тривалим циклом гальмування. Якщо перенапруга на конденсаторі фільтра незначна, але за відкритого гальмівного ключа протягом часу гальмування вона не зменшується ( $du_c(t)/dt \geq 0$ ), то це також є ознакою несправності гальмівного кола.

Графічна модель прийняття рішення системи діагностування наведена на рис. 4.

Схема вимірювального тракту системи діагностування гальмівного кола ПЧ, модель якої наведена в (12), матиме показаний на рис. 5 вигляд.

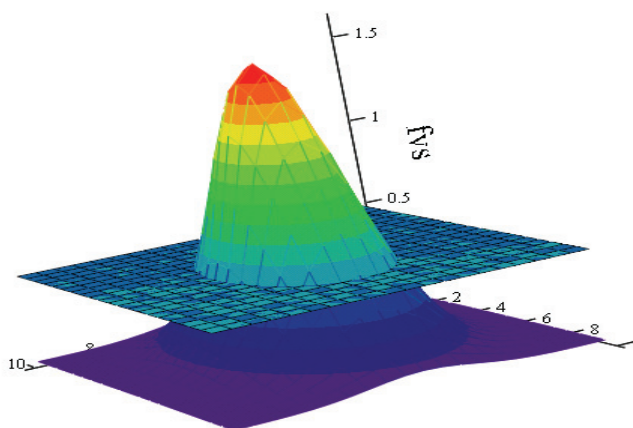


Рис. 4. Графічна модель блока прийняття рішення системи діагностування

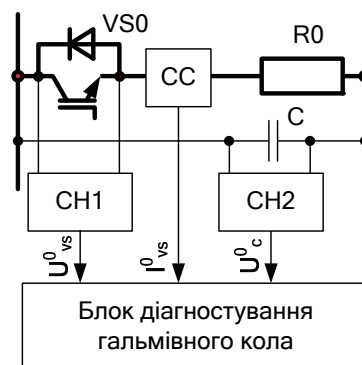


Рис. 5. Схема вимірювального тракту системи діагностування гальмівного кола:  
CC — сенсор струму гальмівного кола;  
CH1, CH2 — сенсори напруги

### Висновки

Запропоновано математичну модель системи діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотних електроприводів, яка враховує похідну напруги на конденсаторі фільтра і дозволяє проводити діагностування гальмівного кола під час роботи електропривода в коротких та тривалих циклах гальмування.

Розроблено модель прийняття рішення та схему вимірювального тракту системи діагностування гальмівного кола ПЧ.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лимонов Л. Г. Особенности тормозных режимов электроприводов по системе преобразователь частоты — асинхронный двигатель / Л. Г. Лимонов, А. Н. Нетеса, Л. В. Некрасова // Вестник ХПИ. — 2004. — № 3. — С. 25—27.
2. Pat. EP 1752351 A1 EU, B 60 T 13/74 Electric brake and electric brake control apparatus / Hitachi ltd (Japan). — № 20070035178; application 09.08.2006; publ. 14.02.2007.
3. Колпаков А. И. Методы оценки надежности силовых модулей IGBT SEMIKRON в предельных режимах / А. И. Колпаков // Силовая электроника. — 2004. — № 1. — С. 40—45.
4. Левицький С. М. Математична модель системи діагностування силових модулів перетворювачів частоти / С. М. Левицький, М. П. Розводюк, К. І. Колмачов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2012. — № 4. — С. 139—143. — ISSN 1997-9266.
5. Герман-Галкин С. Школа Matlab. Моделирование устройств силовой электроники / С. Герман-Галкин. — М. : Силовая электроника. — 2008. — № 4. — С. 23—28.
6. Boldea I. Electric Drives. / Boldea I, Nasar S. A. // CRC Press, Boca Raton. — London : New York, Washington D. C. 1999. — 350 p.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті

Стаття надійшла до редакції 26.03.2013

Рекомендована до друку 23.04.2013

**Левицький Сергій Михайлович** — доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті;

**Бартецький Андрій Анатолійович** — студент Інституту електроенергетики та електромеханіки.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця