

УДК 621.314

С. М. Левицький, канд. техн. наук, доц.; М. П. Розводюк, канд. техн. наук, доц.;
К. І. Колмачов, студ.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВИХ МОДУЛІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ

Запропоновано математичну модель системи для технічного діагностування силових модулів перетворювачів частоти (ПЧ) з автономним інвертором напруги (АІН), в якій діагностична функція є композицією станів транзисторних модулів та саппресорів.

Постановка проблеми

Сучасний регульований електропривод з ПЧ є складною мехатронною системою, яка обслуговує більшість відповідальних механізмів в усіх галузях промисловості. Тому для забезпечення його надійного функціонування необхідна неперервна діагностика технічного стану та прогнозування аварійних режимів. Існуючі методики діагностування, побудовані на апаратних засобах та програмних можливостях мікропроцесорних систем, дозволяють технічно реалізувати задачі діагностики та прогнозування несправностей всіх елементів електропривода за наявності адекватної методики синтезу алгоритмів діагностування [1]. Однак, існує *проблема* вдосконалення систем технічної діагностики силових модулів електропривода з урахуванням стану їх захисних кіл та локалізації несправностей.

Аналіз останніх досліджень

Типові системи діагностики сучасних ПЧ передбачають контроль стану як кіл керування (в тому числі польових інформаційних шин), так і силових кіл [2]. Виявлення несправностей силової частини провадиться постійно, але інформація про фактичний стан (для транзисторів) видається лише в трьох показниках: закритий, відкритий, коротке замикання. Таке діагностування не дозволяє прогнозувати стан обладнання. В роботах [3, 4] висвітлено методики діагностування силових інверторних модулів ПЧ з векторним керуванням. Для діагностики приймаються ті ж змінні, які використовуються і для обчислення магнітного потоку електродвигуна, а саме поздовжня та поперечна складові струму статора. Однак, в запропонованих алгоритмах діагностування не враховується стан захисних кіл транзисторних ключів. В роботі [5] обґрунтовано необхідність діагностування кіл захисту імпульсних перетворювачів та запропоновано структуру математичної моделі вентиляного перетворювача з урахуванням наявності елементів захисту та їх стану. Однак, необхідною умовою для діагностування снаберних кіл згідно із запропонованою структурою є відключення ємності фільтра та забезпечення режиму роботи перетворювача, близького до холостого ходу.

Постановка завдання

Метою дослідження є вдосконалення систем технічного діагностування силових модулів перетворювачів частоти з АІН, об'єднання їх з системами векторного керування частотно регульованих електроприводів. Для досягнення мети *потрібно* розробити математичну модель системи діагностування силових модулів АІН, апаратний та програмний комплекс для її реалізації, що дозволить здійснювати діагностування транзисторів інвертора та їх кіл захисту.

Матеріали дослідження

В роботі [1] для створення математичної моделі системи діагностування (СД) частотного електропривода використовується абстрактна динамічна модель, яка описується функціоналом

$$y = F(T, X, Z, S, S_0, C^*, C, L^*, L), \quad (1)$$

де T – множина (вектор значень) моментів часу; X та Z – множина відповідно вхідних та ви-

хідних сигналів системи; S – вектор станів системи; S_0 – замкнута область граничних станів СД, яка обмежує переходи всередині вектора S ; C та C^* – оператори переходів, які відображують зміну стану СД під дією, відповідно, внутрішніх та зовнішніх збурень; L та L^* – оператори виходів, які описують послідовність формування вихідного сигналу СД під дією, відповідно, внутрішніх та зовнішніх збурень.

За такого підходу для ідентифікації стану СД потрібно використовувати набір класів технічних станів системи, а для виділення діагностичної ознаки слід використовувати апарат орієнтованих графів та кінцевих автоматів – структура СД та алгоритми обчислень при цьому виявляються досить громіздкими, а процедура локалізації несправності та можливість її прогнозування при такому абстрактному підході ускладненою.

Суттєво зручнішою з практичної точки зору реалізації СД для перетворювачів частоти з векторним керуванням виявляється математична модель, запропонована в роботах [3, 4]. Цю модель вважають базовою для виділення несправного стану силових модулів АІН за рахунок можливості її реалізації на програмному рівні мікропроцесора ПЧ без втручання в апаратний склад, тому саме на неї слід звернути увагу для вдосконалення. Розглянемо послідовність її створення. За основну функціональну ознаку стану силового модуля береться відхилення фактичного струму через кристал IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) від заданого значення на проміжку часу, протягом якого здійснюється комутація модуля. Фактичне значення струму визначається за допомогою датчиків струму на ефекті Холла, які вбудовані в ПЧ і забезпечують формування векторного алгоритму керування асинхронним електроприводом. Миттєве відхилення визначається за виразом

$$i_{vs} = i_{vs.зад} - i_{vs.факт} = \sqrt{\left(I_{d.зад}^2 - I_{d.факт}^2\right)^2 + \left(I_{q.зад}^2 - I_{q.факт}^2\right)^2}, \quad (2)$$

де $i_{vs.зад}$ та $i_{vs.факт}$ – відповідно, задане та фактичне для встановленої частоти та моменту електропривода значення струму через силовий модуль; I_d та I_q – відповідно, поздовжня та поперечна складові струму статора двигуна, які отримуються після подвійного зведення миттєвих значень трифазної системи струмів спочатку до ортогональної системи координат, а потім до системи координат d–q відносно магнітного потоку ротора електричної машини згідно з перетворенням Парка-Горєва [6].

Середнє значення відхилення за повний період (а він є змінною величиною для ПЧ) не може бути визначеним через функцію часу в явному вигляді – цьому перешкоджає алгоритм широтно-імпульсного управління силовими модулями. Тому введемо у відповідність до одиниць вимірювання часу порядковий номер імпульсів модуля на періоді $N \leftrightarrow t$. Тоді середнє значення відхилення струму визначатиметься за виразом

$$C^m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |\Delta i_{vs.k}| e^{j \frac{2\pi m \cdot k}{N}}, \quad (3)$$

де m – порядковий номер переднього фронту вмикання відповідного силового модуля мостової схеми АІН на періоді; k – порядковий номер імпульсу в періоді, $k = 0, 1, 2 \dots N-1$.

За несправного силового модуля матиме місце відхилення струму (зведеного до ортогональної системи координат) протягом часу, необхідного для комутації модуля. Відношення середнього значення відхилення струму для поточного модуля в даний момент часу до відхилення струму при нульових початкових умовах [3] характеризує технічний стан силового модуля і визначає алгоритм роботи системи діагностування по відношенню до об'єкта:

$$f_{vs} = \frac{C^m}{C^0}, \begin{cases} \text{якщо } |f_{vs}| > 0,5 \rightarrow \text{несправність;} \\ \text{якщо } \|f_{vs}\| < 0,5 \rightarrow \text{нормальна робота.} \end{cases} \quad (4)$$

Важливим фактором для прогнозування несправності є виділення такого значення виразу (4), яке відповідає критичному статусу модуля. Згідно з (2)–(4) отримано залежність змінної стану f_{vs} від відхилення струму в зворотному вигляді $\Delta i_{vs.k} = f(f_{vs})$, що показана на рис. 1.

Різке зростання відхилення струму розпочинається від такого значення діагностичної змінної, яке близьке до $2/\pi$. Значення приросту в діапазоні $[1/\pi; 2/\pi]$ має тенденцію до зростання та містить високочастотну складову — така поведінка $\Delta i_{vs.k}$ свідчить про роботу ключів інвертора в критичному режимі. З подальшим неконтрольованим збільшенням $\Delta i_{vs.k}$ один (або декілька) з ключів будуть пошкодженими.

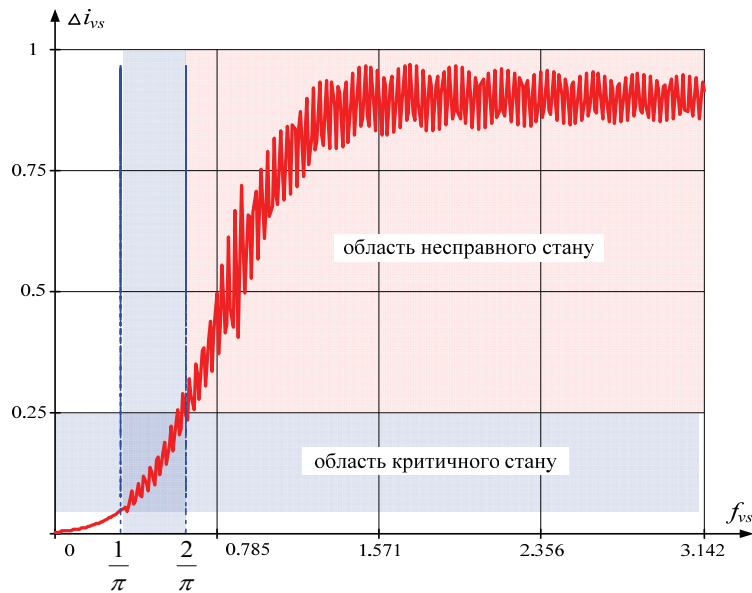


Рис. 1. Результати моделювання залежності діагностичної змінної від відхилення струму перетворювача

З урахуванням зауважень на підставі запропонований алгоритм роботи системи діагностування по відношенню до об'єкта матиме вигляд

$$f_{VS} = \frac{C^m}{C^0}, \begin{cases} \text{якщо } |f_{VS}| > \frac{2}{\pi} \rightarrow \text{несправність;} \\ \text{якщо } |f_{VS}| \in \left[\frac{1}{\pi}; \frac{2}{\pi} \right] \rightarrow \text{критичний стан;} \\ \text{якщо } |f_{VS}| < \frac{1}{\pi} \rightarrow \text{нормальна робота.} \end{cases} \quad (5)$$

Місце локалізації несправності силового модуля в мостовій схемі може бути визначене, використовуючи часову діаграму роботи ключів, показану на рис. 2.

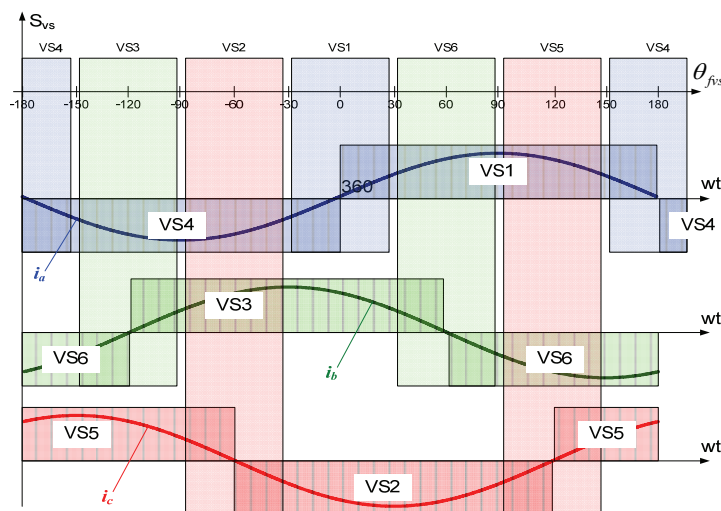


Рис. 2. Часова діаграма комутації ключів АІН для локалізації несправності

Аналітично методику локалізації несправності можна записати у вигляді таблиці значень аргументу діагностичної функції

$$\theta_{f_{VS}} = \arctg \left[\frac{\operatorname{Re}\{f_{VS}\}}{\operatorname{Im}\{f_{VS}\}} \right]. \tag{6}$$

Таблиця 1

Визначення несправності за номером силового модуля

Номер ключа IGBT	Значення діагностичної змінної	Умови
VS1	$f_{VS} > 2/\pi$	$ \theta_{f_{VS}} < 30^\circ$
VS2		$-30^\circ > \theta_{f_{VS}} > -90^\circ$
VS3		$-150^\circ < \theta_{f_{VS}} < -90^\circ$
VS4		$ \theta_{f_{VS}} > 150^\circ$
VS5		$90^\circ < \theta_{f_{VS}} < 150^\circ$
VS6		$30^\circ < \theta_{f_{VS}} < 90^\circ$

Для діагностування саппресорів (обмежувачів перенапруги) силових модулів за основну величину беремо відхилення поздовжньої складової струму статора від заданого для потрібної координати електропривода значення.

Поздовжня складова струму статора електродвигуна близька за значенням та фазою до реактивної складової фазного струму. Саме реактивна складова визначає струм, що протікає через саппресори силових модулів. Під час роботи двигуна на низькій частоті для формування належного моменту поздовжня складова струму I_d може досягати за модулем значень, близьких до поперечної (активної складової) струму I_q , а це приводить до струмового перевантаження саппресорів, їх перегріву і прискореного виходу з ладу (рис. 3).

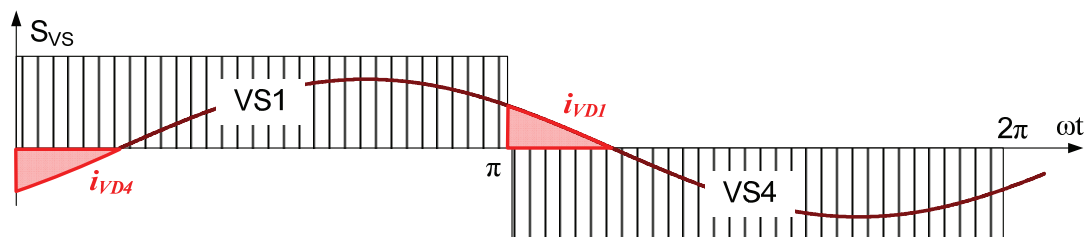


Рис. 3. Формування струму саппресорів силових модулів

Особливо важкі умови роботи саппресорів в режимі роботи електропривода S5. У разі виходу з ладу саппресора сам силовий модуль залишається працездатним, але тривалість його роботи з пошкодженим саппресором невисока. Методика визначення несправності кіл саппресорів близька до методики діагностування силових модулів і може бути записана аналітично

$$\begin{cases} \Delta i_{VD} = K_{\omega} (I_{d,зад} - I_{d,факт}) ; \\ f_{VD} = \frac{1}{\pi \Delta i_{VD}(\pi)} \int_{\pi}^{2\pi} \Delta i_{VD}(t) dt, \end{cases} \begin{cases} \text{якщо } |f_{VD}| > 0,5 \rightarrow \text{несправність;} \\ \text{якщо } |f_{VD}| < 0,5 \rightarrow \text{нормальна робота.} \end{cases} \tag{7}$$

де Δi_{VD} – відхилення струму саппресора від заданого значення, що визначається балансом між фактичним і заданим значенням поздовжньої складової струму статора двигуна; K_{ω} – ваговий коефіцієнт приведення поздовжньої складової струму статора до реактивної складової, який враховує зниження індуктивного опору електричної машини під час роботи на низьких частотах; f_{VD} – діагностична функція визначення несправності саппресорів (визначається відношенням середнього значення відхилення струму за півперіод вимкненого

стану силового модуля від π до 2π до початкового значення відхилення на момент переходу фази струму з модуля на саппресор).

Локалізація несправності саппресорів може бути проведена згідно з табл. 2.

Таблиця 2

Визначення несправності за номером силового модуля

Номер саппресора	Номер ключа IGBT	Значення діагностичної змінної	Умови
VD1	VS4	$f_{VD} > 0,5$	$ \theta_{fvs} > 150^\circ$
VD2	VS5		$90^\circ < \theta_{fvs} < 150^\circ$
VD3	VS6		$30^\circ < \theta_{fvs} < 90^\circ$
VD4	VS1		$ \theta_{fvs} < 30^\circ$
VD5	VS2		$-30^\circ > \theta_{fvs} > -90^\circ$
VD6	VS3		$-150^\circ < \theta_{fvs} < -90^\circ$

Поєднання математичних моделей ланок діагностування силових модулів та саппресорів можливе за рахунок застосування тих самих вихідних даних і використання одного аргументу діагностичної функції θ_{fvs} для локалізації несправностей.

Висновки

Запропоновано математичну модель, яка дозволяє синтезувати структуру блоку діагностування силових модулів ПЧ з АІН та векторним алгоритмом керування з можливістю виділення критичного стану модуля та запобігання несправності, а також врахування стану кіл захисту силових модулів зі збереженням апаратного складу перетворювального агрегату електропривода.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Крюков О. В. Алгоритмы технической диагностики регулируемых асинхронных электроприводов [Электронный ресурс] / О. В. Крюков, В. В. Марков // НГТУ, Россия. — Режим доступа : http://aep.at.ua/_ld/0/1_Algor_Texn_diag.pdf.
2. Altivar 71. Преобразователи частоты для асинхронных двигателей. Руководство по программированию. — Schneider Electric, Telemecanique. — 12 / 2005. — 262 с.
3. Kral C. Power Electronics Monitoring for a Controlled Voltage Source Inverter Drive with Induction Machine / C. Kral, K. Kafka // IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2000. — Piscataway, NJ, USA. — Vol 1.1. — P. 213—217.
4. Abramik S. A Diagnostic Method for On-line Fault Detection and Localization in VSI-Fed AC Drive / S. Abramik, W. Sleszynski, J. Nieznanski, H. Piquet // 10th European Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse, France. — 2003. — P. 1—8.
5. Шимук Р. Д. Определение диагностических признаков отказов снабберных цепей / Р. Д. Шимук, Д. С. Шимук // Світлотехніка та електроенергетика, 2011. — № 2. — С. 61—66.
6. Boldea I. Electric Drives / I. Boldea, S. A. Nasar. — 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 10.04.12
Рекомендована до друку 16.05.12

Левицький Сергій Михайлович — доцент, **Розводюк Михайло Петрович** — доцент.

Кафедра електромеханічних систем автоматизації промисловості і на транспорті;

Колмачев Костянтин Ігорович — студент інституту електроенергетики та електромеханіки.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця