



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **65113** (13) **U**
(51) **МПК**
H02H 7/085 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ПРИСТРІЙ ЗАХИСТУ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПРИ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОМУ ЖИВЛЕННІ

1

2

(21) u201105914

(22) 11.05.2011

(24) 25.11.2011

(46) 25.11.2011, Бюл.№ 22, 2011 р.

(72) ДУБОВИК ВОЛОДИМИР ГРИГОРОВИЧ, ЛЕБЕДЄВ ЛЕВ МИКОЛАЙОВИЧ, ГАВАЛЄШКО СЕРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ

(73) ДУБОВИК ВОЛОДИМИР ГРИГОРОВИЧ, ЛЕБЕДЄВ ЛЕВ МИКОЛАЙОВИЧ, ГАВАЛЄШКО СЕРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ

(57) Пристрій захисту асинхронного електродвигуна при несинусоїдальному живленні, що містить блок живлення, блок датчиків струму, три джерела постійної вхідної дії, два порогові елементи, елемент І, блок незалежної витримки часу, три входи асинхронного електродвигуна через блок гальванічної розв'язки підключені до трьох входів блока визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD) напруги, який має послідовно сполучені аналізатор спектра, формувач коефіцієнта несинусоїдальності напруги, який **відрізняється** тим, що додатково містить блок визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD) струму, сполучені блок визначення продуктивності обдуву та датчик швидкості, який має зв'язок з електродвигуном, що живиться від перетворювача частоти, сполучені ключовий елемент та блок вентилятора, а також послідовно сполучені датчик температури, блок визначення

тепловідводу, блок визначення втрат потужності, три входи якого сполучені з виходами блока датчиків струму, а також з входами блока визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD) струму, четвертий, п'ятий, шостий входи сполучені з трьома виходами блока гальванічної розв'язки, сьомий вхід сполучено з виходом блока визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD) напруги, восьмий вхід сполучено з виходом блока визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD) струму, а вихід сполучено через пороговий елемент з входом елемента І, другий вхід якого сполучено з ланцюгом сигналу ПУСК, а вихід - з входом перетворювача частоти, другий вхід якого сполучено з ланцюгом мережі живлення, блоком живлення та з входом ключового елемента, три виходи через блок датчиків струму сполучені з трьома входами асинхронного електродвигуна, вихід блока визначення продуктивності обдуву сполучено з входом другого порогового елемента, другий вхід якого сполучено з виходом блока визначення тепловідводу, а вихід через блок незалежної витримки часу - з другим входом ключового елемента, три джерела постійної вхідної дії сполучені, відповідно, з дев'ятим входом блока визначення втрат потужності, з другим входом першого порогового елемента, з другим входом блока визначення продуктивності обдуву.

Корисна модель належить до електротехніки і може бути використана для захисту асинхронного електродвигуна при зростанні загальних втрат потужності при значеннях частоти обертання вала нижче номінальної, а також при перевищенні величини поточних втрат допустимих значень в будь-яких режимах роботи при несинусоїдальному живленні.

Відомий пристрій для захисту асинхронного електродвигуна від перевантажень і обриву фази, що містить блок живлення, блок датчиків струму з датчиками, сполученими по схемі "зірка", нульова точка якої сполучена з "загальним" провідником пристрою, блок контролю часу пуску і струму, пос-

лідовно сполучені блок контролю наявності напруги і порядку чергування фаз, блок незалежної витримки часу, ключовий елемент в ланцюзі живлення котушки пускача електродвигуна, а також містить три елементи І-НЕ, три джерела постійної вхідної дії і три порогові елементи, перші входи яких сполучені з першим джерелом постійної вхідної дії, другі входи - з відповідними трьома виходами блоку датчиків струму і трьома входами блоку контролю часу пуску і струму, четвертий і п'ятий входи якого сполучені, відповідно з другим і третім джерелами постійної вхідної дії, а вихід сполучений з другими входами першого, другого і третього елементів І-НЕ, перші входи яких сполучені з ви-

(13) **U**
(11) **65113**
(19) **UA**

ходами порогових елементів відповідно, а вихід кожного з елементів І-НЕ сполучений відповідно з першим, другим і третім входом блоку контролю наявності напруги і порядку чергування фаз [1].

Недоліком пристрою є низькі функціональні можливості, пов'язані з відсутністю контролю втрат потужності в електродвигуні з урахуванням дії вищих гармонік напруги та струму при різних значеннях частоти обертання його вала.

Найбільш близьким до пропонованого пристрою є пристрій захисту асинхронного електродвигуна, що містить блок живлення, блок датчиків струму з датчиками, сполученими по схемі "зірка", нульова точка якої сполучена з "загальним" провідником пристрою, причому входи датчиків струму є входними виводами пускача, виходи якого з'єднані з асинхронним електродвигуном, блок контролю часу пуску і струму, послідовно сполучені блок контролю наявності напруги і блок порядку чергування фаз, блок незалежної витримки часу, три елементи І-НЕ, три джерела постійної вхідної дії і три порогові елементи, перші входи яких сполучені з першим джерелом постійної вхідної дії, а другі входи - з відповідними трьома виходами блока датчиків струму і трьома входами блока контролю часу пуску і струму, четвертий, п'ятий входи якого сполучені відповідно з другим і третім джерелами постійної вхідної дії, а вихід сполучений з другими входами першого, другого, третього елементів І-НЕ, виходи яких сполучені з трьома входами блока контролю наявності напруги і порядку чергування фаз, регулятор напруги, перший та другий входи якого мають виходи для підключення до контактів розмикаючого блок-контакту пускача, третій вхід підключений до виходу блока незалежної витримки часу, а четвертий вхід сполучений з входом блока живлення, при цьому вихід регулятора напруги має вивід для підключення до входу пускача, а також містить елемент АБО, блок гальванічної розв'язки, послідовно з'єднані аналізатор спектра, формувач коефіцієнта несинусоїдальності (THD) напруги, четвертий пороговий елемент, другий вхід якого з'єднаний із четвертим джерелом постійної вхідної дії, а вихід - з елементом АБО, другий вхід якого з'єднаний з виходом блока контролю наявності напруги й порядку чергування фаз, вихід елемента АБО з'єднаний з блоком незалежної витримки часу, три входи асинхронного електродвигуна через блок гальванічної розв'язки підключені до трьох входів аналізатора спектра [2].

Недоліком пристрою є низькі функціональні можливості, пов'язані з відсутністю контролю втрат потужності в електродвигуні з урахуванням дії вищих гармонік напруги та струму при різних значеннях частоти обертання його вала.

В основу корисної моделі поставлена задача удосконалення відомого пристрою захисту, шляхом введення додаткових елементів, що забезпечує контроль втрат потужності в електродвигуні з урахуванням дії вищих гармонік напруги та струму при різних значеннях частоти обертання вала та його відключення при перевищенні величини поточних втрат допустимого значення.

Поставлена задача досягається тим, що пристрій захисту асинхронного електродвигуна при

несинусоїдальному живленні, що містить блок живлення, блок датчиків струму, три джерела постійної вхідної дії, два порогові елементи, елемент І, блок незалежної витримки часу, три входи асинхронного електродвигуна через блок гальванічної розв'язки підключені до трьох входів блока визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD) напруги, який має послідовно сполучені аналізатор спектра, формувач коефіцієнта несинусоїдальності напруги, який відрізняється тим, що додатково містить блок визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD) струму, сполучені блок визначення продуктивності обдуву та датчик швидкості, який має зв'язок з електродвигуном, що живиться від перетворювача частоти, сполучені ключовий елемент та блок вентилятора, а також послідовно сполучені датчик температури, блок визначення тепловідводу, блок визначення втрат потужності, три входи якого сполучені з виходами блока датчиків струму, а також з входами блока визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD) струму, четвертий, п'ятий, шостий входи сполучені з трьома виходами блока гальванічної розв'язки, сьомий вхід сполучено з виходом блока визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD) напруги, восьмий вхід сполучено з виходом блока визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD) струму, а вихід сполучено через пороговий елемент з входом елемента І, другий вхід якого сполучено з ланцюгом сигналу ПУСК, а вихід - з входом перетворювача частоти, другий вхід якого сполучено з ланцюгом мережі живлення, блоком живлення та з входом ключового елемента, три входи через блок датчиків струму сполучені з трьома входами асинхронного електродвигуна, вихід блока визначення продуктивності обдуву сполучено з входом другого порогового елемента, другий вхід якого сполучено з виходом блока визначення тепловідводу, а вихід через блок незалежної витримки часу - з другим входом ключового елемента, три джерела постійної вхідної дії сполучені, відповідно, з дев'ятим входом блока визначення втрат потужності, з другим входом першого порогового елемента, з другим входом блока визначення продуктивності обдуву.

На фігурі представлена структурна схема пристрою захисту асинхронного електродвигуна при несинусоїдальному живленні.

Пристрій захисту асинхронного електродвигуна 1 при несинусоїдальному живленні (кресл.) складається із блоку 2 датчиків струму, три входи якого сполучені з трьома виходами перетворювача частоти 3, а три перші входи з фазними ланцюгами асинхронного електродвигуна 1, блок 4 вентилятора сполучено через ключовий елемент 5 з виходом блока 6 незалежної витримки часу, датчик 7 швидкості, який має зв'язок з електродвигуном 1, сполучено через блок 8 визначення продуктивності обдуву з другим входом другого порогового елемента 9, блок 10 гальванічної розв'язки трьома входами підключений до фазних ланцюгів електродвигуна 1, а трьома виходами сполучено з трьома входами блока 11 визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD) напруги та четвертим, п'ятим, шостим входами блока 12 ви-

значення втрат потужності, перші три входи якого сполучені з трьома другими виходами блока 2 датчиків струму та входами блока 13 визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD) струму, вихід якого сполучено з восьмим входом блока 12 визначення втрат потужності, вихід датчика 14 температури сполучено з входом блока 15 визначення тепловідводу, сьомий вхід блока 12 визначення втрат потужності сполучено з виходом блока 11 визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD) напруги, а вихід сполучено з другим входом блока 15 визначення тепловідводу та входом першого порогового елемента 16, вихід якого через елемент 17 сполучено з входом перетворювача частоти 3, другий вхід якого сполучено з ланцюгом мережі живлення, блоком 18 живлення та з входом ключового елемента 5, вихід порогового елемента 9 сполучено з входом блока 6 незалежної витримки часу, а вхід з виходом блока 15 визначення тепловідводу, три джерела E1, E2, E3 постійної вхідної дії сполучені, відповідно, з дев'ятим входом блока 12 визначення втрат потужності, з другим входом першого порогового елемента 16, з другим входом блока 8 визначення продуктивності обдуву.

Блок 2 датчиків струму може бути виконаний з використанням трьох датчиків струму, наприклад, датчиків струму на ефекті Хола і забезпечує формування вихідного сигналу пропорційного миттєвому значенню струму в ланцюгах живлення електродвигуна. Такі датчики виготовляє фірма LEM. Ланцюги живлення датчиків струму на ефекті Хола не показані.

Перетворювач частоти 3, найчастіше, може бути виконаний на основі автономного інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією при використанні одного з методів частотного управління: скалярного або векторного. При скалярному управлінні вихідна частота і амплітуда напруги змінюються згідно із законом $(U/f)n = \text{const}$, де $n \geq 1$, забезпечується постійність перевантажувальної здатності електроприводу незалежно від частоти напруги, проте має місце зниження моменту, що розвивається двигуном, при низьких, $f < 0,1 f_{\text{ном}}$, частотах, діапазон регулювання швидкості обертання ротора при незмінному моменті опору досягає 1:10. При відсутності датчика швидкості на валу двигуна неможливо стабілізувати швидкість обертання, оскільки вона залежить від навантаження, а також не можна регулювати момент на валу двигуна.

При методі векторного управління в систему управління закладається математична модель електродвигуна, яка дозволяє розраховувати момент на валу і швидкість обертання валу з використанням тільки датчиків струму фаз статора, забезпечується незалежне і практично безінерційне регулювання двох основних параметрів - моменту на валу і швидкості обертання. Це також дозволяє плавне, без ривків, обертання двигуна в області малих частот; можливість забезпечення номінального моменту на валу при нульовій швидкості за наявності датчика швидкості, швидку реакція на зміну навантаження без стрибків швидкості, за-

безпечується режим роботи при мінімальних втратах на нагрів і намагнічення електродвигуна.

Перетворювачі частоти можуть забезпечувати максимально-струмовий захист, захист від перегріву двигуна і перетворювача, захист від перевантаження, надмірних відхилень напруги живлення, обриву фази, міжфазного короткого замикання, замикання фази на землю і помилок зв'язку. В них також передбачаються входи для підключення датчика швидкості. Захист від перегріву електродвигуна являється аварійним і він не може забезпечити контроль режимів його охолодження при різних значеннях навантаження, та при зміні частоти обертання вала ротора. Живлення перетворювача частоти 3 може здійснюватися від однофазної чи трифазної мережі, на фігурі показано в вигляді однієї лінії. Ланцюги для задання вихідної частоти та інших налаштувань перетворювача частоти не приведені.

Блок 5 вентилятора може бути виконаний з використанням вентилятора з приводом від окремого електродвигуна і забезпечує подачу повітря для додаткового охолодження електродвигуна 1 при зниженні частоти обертання його вала. Продуктивність блока 5 вентилятора близька до продуктивності колеса вентиляторного електродвигуна 1.

Блок 6 незалежної витримки часу може бути виконаний з використанням елементів затримки і забезпечує затримку формування вихідного сигналу на заданий інтервал часу для запобігання випадкових переключень в пристрої.

Датчик 7 швидкості може бути виконаний з використанням електричної машини або перетворювача імпульсної послідовності частоти обертання, які контактено чи безконтактно зв'язані з валом електродвигуна і забезпечує формування вихідного сигналу, пропорційного частоті обертання валу електродвигуна 1. Якщо пристрій захисту має перетворювач частоти з векторним керуванням, то використання датчика швидкості не обов'язкове, так як, при цьому може бути використаний сигнал, який пропорційний частоті обертання вала електродвигуна 1 з окремого виходу перетворювача частоти, замість вихідного сигналу датчика 7 швидкості.

Блок 8 визначення продуктивності обдуву може бути виконаний з використанням функціонального перетворювача і забезпечує формування вихідного сигналу U_8 при зміні сигналу датчика швидкості U_7 відносно номінального значення U_{7H} , реалізує залежність $U_8 = E3 \cdot U_7 / U_{7H}$.

Блок 10 гальванічної розв'язки може бути виконаний з використанням елементів з електромагнітними або оптичними каналами розв'язки і забезпечує високий імпеданс між його вхідними і вихідними ланцюгами без електричного зв'язку.

Блок 11 визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD) напруги може бути виконаний з використанням аналізатора спектра, формувача коефіцієнта несинусоїдальності напруги і забезпечує формування вихідного сигналу в відповідності з виразом:

$$THD_U = \frac{\sqrt{U^2(2) + U^2(3) + \dots + U^2(n)}}{U_1(1)} = \frac{U_{\Sigma}}{U_1(1)},$$

де $U(1) \dots U(n)$ - ефективні значення напруги першої ... n гармонік,

U_{Σ} - ефективне значення напруги всіх вищих гармонік,

THD_U (Total Harmonic Distortion) - коефіцієнт несинусоїдальності напруги.

Блок 12 визначення втрат потужності ΔP_{δ} в електродвигуні 1 може бути виконаний з використанням функціональних вузлів, перетворювачів сигналів, які забезпечують визначення втрат потужності з урахуванням значення E_1 , а також того, що $U_{12} = \Delta P_{\delta}$. Номінальні значення величин для визначення $U_{12} = \Delta P_{\delta}$ вводяться в блок 12, ланцюги для їх вводу не приведені, крім номінального значення потужності, яка пропорційна амплітуді джерела постійної вхідної дії E_1 .

Вихідні струми і напруга перетворювача частоти на відміну від стандартної мережі мають несинусоїдальну форму, що приводить до збільшення втрат електродвигуна. Індуктивний опір обмоток асинхронного електродвигуна впливає на імпульсну форму напруги так, що обмотками проходить безперервний струм I_1 з формою, близькою до синусоїди:

$$I_1 = \sqrt{\sum_{v=1}^n I_{1v}^2},$$

де I_{1v} - діюче значення струму v -ої гармоніки.

Кожна з складових сумарних втрат, що становлять: електричні, магнітні, механічні, додаткові, втрати від вищих гармонік залежать від режиму роботи електродвигуна. Сумарна потужність втрат енергії в асинхронному двигуні з несинусоїдальною напругою живлення при частотному способі регулювання швидкості визначається по формулі $\Delta P_{\delta} = \Delta P_{1M} + \Delta P_{2M} + \Delta P_{1cr} + \Delta P_{1cb} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб} + \Delta P_v$,

де ΔP_{1M} - втрати в міді обмоток статора, обумовлені першими гармоніками струмів;

ΔP_{2M} - втрати в провідниках обмоток ротора, обумовлені першими гармоніками струмів;

ΔP_{1cr} - втрати в сталі статора від гістерезису;

ΔP_{1cb} - втрати в сталі статора від вихрових струмів;

$\Delta P_{мех}$ - механічні втрати;

$\Delta P_{доб}$ - додаткові втрати;

ΔP_v - втрати від вищих гармонік.

Формули для розрахунку втрат в обмотках електродвигуна наступні:

$$\Delta P_{1M} = \Delta P_{1M \text{ ном}} \cdot I_{11}^2 / I_{11 \text{ ном}}^2,$$

$$\Delta P_{2M} = \Delta P_{2M \text{ ном}} \cdot I_2^2 / I_{2 \text{ ном}}^2,$$

де $\Delta P_{1M \text{ ном}}$ - номінальні втрати в міді обмоток статора, обумовлені першими гармоніками струмів;

ΔP_{2M} - номінальні втрати в провідниках обмоток ротора, обумовлені першими гармоніками струмів;

I_{11} , I_2 - значення модулів результуючих векторів струмів обмоток статора і ротора;

$I_{11 \text{ ном}}$, $I_{2 \text{ ном}}$ - значення модулів результуючих векторів струмів обмоток статора і ротора в номінальному режимі.

Втрати в сталі статора на гістерезис ΔP_{1cr} і вихрові струми ΔP_{1cb} залежать від частоти обертання і потоку двигуна:

$$\Delta P_{1cr} = \Delta P_{1cr \text{ ном}} \cdot \Psi_0^2 \omega_1 \cdot (1 + THD_U) / \Psi_{0 \text{ ном}}^2 \omega_{1 \text{ ном}},$$

де Ψ_0 - значення модуля результуючого вектора головного потокозчеплення;

$\Psi_{0 \text{ ном}}$ - номінальне значення модуля результуючого вектора головного потокозчеплення;

ω_1 - кругова частота напруги статора;

$\omega_{1 \text{ ном}}$ - кругова частота напруги статора в номінальному режимі;

THD_U - коефіцієнт несинусоїдальності по напрузі.

Механічні втрати:

$$\Delta P_{мех. (t)} = \Delta P_{мех \text{ ном}} \cdot (\omega / \omega_{ном})^{3/2},$$

де ω - швидкість обертання вала електродвигуна;

$\omega_{ном}$ - номінальна швидкість обертання вала електродвигуна.

Додаткові втрати $\Delta P_{доб}$, пропорційні квадрату основної гармоніки струму статора:

$$\Delta P_{доб (t)} = \Delta P_{доб \text{ ном}} \cdot I_{11}^2 / I_{1 \text{ ном}}^2,$$

де $\Delta P_{мех \text{ ном}}$ - механічні втрати при номінальній швидкості;

$\Delta P_{доб \text{ ном}}$ - додаткові втрати при номінальній швидкості.

Втрати ΔP_v від вищих гармонік

$$\Delta P_v = 1,5 \sum_{v=2}^n I_{1v} U_{1v},$$

де I_{1v} - амплітуда активної складової фазного струму статора v -ої гармоніки;

U_{1v} - амплітуда фазної напруги двигуна v -ої гармоніки.

Втрати у двигуні від вищих гармонік залежать від співвідношення між несучою частотою та частотою модуляції та можуть бути оцінені через коефіцієнт $K_{сп}$ спотворення по струму або оберненою величиною коефіцієнтом K_n перевантаження:

$$K_{сп1} = I_{11} / I_1,$$

$$K_n = I_1 / I_{11},$$

де I_1 - повний діючий струм фази статора.

Для визначення I_1 можна використати вираз $I_1 = I_{11} THD_1$.

THD_1 (Total Harmonic Distortion) - коефіцієнт несинусоїдальності струму.

Блок 13 визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD) струму може бути виконаний з використанням аналізатора спектру, формувача коефіцієнта несинусоїдальності струму і забезпечує формування вихідного сигналу в відповідності з виразом:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I^2(2) + I^2(3) + \dots + I^2(n)}}{I_1(1)} = \frac{I_{\Sigma}}{I_1(1)},$$

де $I(1) \dots I(n)$ - ефективні значення струму першої ... n гармонік,

I_{Σ} - ефективне значення струму всіх вищих гармонік.

Датчик 14 температури може бути виконаний з використанням термоелементів з додатним температурним коефіцієнтом і забезпечує вимірювання температури повітря для охолодження електродвигуна 1.

Блок 15 визначення тепловідводу може бути виконаний з використанням функціонального перетворювача і забезпечує визначення значення подачі повітря G_n для тепловідводу $U_{15}=U_{12}/k \cdot (U_{t_n}-U_{14})$, з урахуванням виразу

$$G_n = \Delta P_\partial / C_n (t_n - t), \text{ м}^3/\text{год.},$$

де ΔP_∂ - втрати потужності в електродвигуні 1, Вт;

C_n - питома теплоємність повітря, 0,35 Вт·год./м³·град;

t_n - значення температури електродвигуна 1 при номінальному режимі роботи, град;

t - поточне значення температури повітря для охолодження,

k - коефіцієнт, пропорційний C_n .

Номінальне значення величин k та U_{t_n} пропорційної t_n вводяться в блок 15, а ланцюги для їх вводу не приведені.

Прийняті позначення U_n^1 - амплітуда сигналу на i -му виході n -го блоку.

Працює пристрій таким чином.

Після подачі напруги в силові ланцюги подається напруга на блок живлення 18 та на другий вхід перетворювача частоти 3. Натискається кнопка ПУСК (не показана) і сигнал логічної одиниці подається на другий вхід елемента 17, на його виході також встановлюється рівень логічної одиниці, який подається на перетворювач частоти 3 і забезпечується розгін електродвигуна 1. При його роботі сигнали з блоку 2 датчиків струму подаються на блок 13 визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD₁) струму та на блок 12 визначення втрат потужності, на входи якого подаються також сигнали, пропорційні напрузі живлення, від блоку 10 гальванічної розв'язки, трьома входами підключеного до фазних ланцюгів електродвигуна 1. Від блоку 10 гальванічної розв'язки сигнали подаються також на блок 11 визначення коефіцієнта несинусоїдальності (THD_u) напруги, з виходу якого подається сигнал U_{11} , пропорційний значенню THD_u, який залежить від амплітуд вищих гармонік, на сьомий вхід блоку 12, на восьмий вхід якого подається сигнал, який також залежить від амплітуд вищих гармонік, пропорційний значенню THD₁ від блоку 13. На виході блоку 12 появляється сигнал, пропорційний значенню втрат потужності в електродвигуні 1, який подається на блок 15 визначення тепловідводу та на пороговий елемент 16 з характеристикою

$$U_{16}=1, \text{ при } U_{12} < E_2$$

$$U_{16}=0, \text{ при } U_{12} \geq E_2,$$

де E_2 - напруга, пропорційна значенню допустимих втрат потужності в електродвигуні 1.

На вхід блоку 15 подається також сигнал, пропорційний температурі повітря охолодження електродвигуна 1, від датчика 14 температури, а на виході появляється сигнал U_{15} , пропорційний значенню подачі повітря для тепловідводу, який подається на пороговий елемент 9 з характеристикою

$$U_9=1, \text{ при } U_{15} \geq U_8$$

$$U_9=0, \text{ при } U_{15} < U_8.$$

При $U_9=0$ вихідний сигнал блоку 6 незалежної витримки часу також дорівнює нулю і він подається на ключовий елемент 5. При цьому він залиша-

ється розімкнутим і на блок 4 вентилятора напруга живлення не подається. Ключовий елемент 5 замикається при умові подачі на його вхід від блоку 6 сигналу логічної одиниці. Для зупинки електродвигуна 1 сигнал ланцюга ПУСК на вході елемента 17 переводиться в нуль і на його виході встановлюється також нуль, що приводить до відключення перетворювача частоти 3 і зняття напруги з його трьох виходів, електродвигун 1 зупиняється.

Вищі гармоніки зумовлюють збільшення втрат в статорі та роторі електродвигуна. Додаткові втрати потужності підвищують температуру, з'являються локальні місця перегрівання, з'являються додаткові моменти на частотах вищих гармонік, які можуть призвести до відчутних вібрацій електродвигуна.

Температуру обмотки електродвигуна можна представити в наступному виді

$$T_{\text{обм}} = T_{\text{окр}} + \theta^\circ \text{K},$$

де $T_{\text{окр}}$ - температура навколишнього середовища, що прохолоджує обмотку двигуна, град;

θ - перевищення температури обмотки над температурою середовища, град.

Закон зміни $T_{\text{обм}}(t)$ залежить від зміни $T_{\text{окр}}(t)$ і $\theta(t)$. На практиці функція $T_{\text{окр}}(t)$ визначається за даними датчика 14 температури повітря, що встановлюється поблизу блока вентилятора 4. Аналітичний вираз функції $\theta(t)$ визначається з рівняння теплового стану обмоток

$$\Delta P_\partial dt = C d\theta + A \theta dt,$$

де ΔP_∂ - потужність втрат в електродвигуні, що викликає нагрівання його обмоток, Вт;

C - теплопровідність обмоток, Дж/град;

A - тепловіддача обмоток, Дж/(град·сек); t - час, сек; θ - перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища, град.

При роботі двигуна з постійним навантаженням, вимірюваним потужністю P розв'язок рівняння має вид:

$$\theta = \theta_0 + (\theta_y - \theta_0)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \text{ град},$$

де θ_0 - початкове перевищення температури;

$\theta_y = P/A$ - стале перевищення температури;

$\tau = C/A$ - постійна часу нагрівання.

Значення величини початкового перевищення температури θ_0 на даному інтервалі часу роботи двигуна з заданим навантаженням визначається як кінцеве значення $\theta(t)$ попереднього інтервалу. Розрахунок сталої величини перевищення температури обмоток електродвигуна при навантаженні, вимірюваним струмом I визначається за виразом:

$$\theta_y = \theta_n \frac{k + \left(\frac{I}{I_n}\right)^2}{k + 1}.$$

Значення θ_n визначається при теплових іспитах двигуна. Величина сталої постійної часу τ_y теплових процесів при роботі електродвигуна 1 приймається рівною його постійній часу нагрівання. Величина τ_0 визначається з виразу для постійної часу нагрівання циліндричного тіла.

$$\tau = \frac{C}{A} = \frac{V\gamma C}{k_A \rho} = \frac{\pi r^2 l \gamma C}{k_A 2\pi l} = \frac{\gamma C}{2k} r,$$

де V - об'єм циліндра;

γ - питома теплоємність; k - коефіцієнт тепло-віддачі; l - довжина циліндра; r - радіус циліндра.

Циліндричним тілом, що нагрівається, варто вважати в сталому режимі пакет статора. Тому що добуток γC для сталі і для міді приблизно один і той же, то вважаючи постійним коефіцієнт тепло-віддачі може бути визначене τ_0 для електродвигуна заданої потужності $\tau_0 = k \cdot r_1$; $\tau_y = k \cdot r_2$. Тоді

$$\tau_0 = \tau_y r_1 / r_2,$$

де r_1 і r_2 - значення зовнішнього і внутрішнього радіусів пакета сталі статора. Ці величини беруться в каталогах двигуна.

При перевантаженні електродвигуна 1 або коли по технології робочого процесу, при керуванні перетворювачем частоти 3, задається частота обертання вала нижче номінальної, то втрати потужності зростають, а продуктивність колеса обдуву знижується. При цьому вихідний сигнал блоку 12 зростає, що приводить до зростання сигналу на виході блоку 15, крім того сигнал на виході блоку 8 зменшується, і це призводить до переключення порогового елемента 9, на виході якого встановлюється рівень логічної одиниці. З затримкою, встановленою для блоку 6, на його виході встановлюється рівень логічної одиниці, що призводить до замикання ключового елемента 5, який забезпечує подачу живлення на блок 4 вентилятора, який запускається і складає додатковий обдув електродвигуна 1 завчасно, що не допускає його перегрівання. При зменшенні втрат потужності або підвищенні частоти обертання вала електродвигуна пороговий елемент 9 переключається до зворотного стану, що приводить до розмикання ключового елемента 5 і відключенню блока 4 вентилятора від мережі. Такий режим додаткового обдуву електродвигуна 1 попереджує його перегрів, а режим робота блока 4 вентилятора забез-

печує енергоефективний режим його використання.

В випадку значного зростання втрат потужності електродвигуна 1, вихідний сигнал U_{12} блоку 12 перевищує рівень амплітуди E_2 на другому вході порогового елемента 16 і його вихідний сигнал переходить в нульовий рівень, що приводить через елемент 17 до нульового рівня на вході перетворювача частоти 3, який забезпечує відключення вихідної напруги, що веде до зупинки електродвигуна 1.

Застосування введених елементів 4, 5, 7, 8, 12-15, 17 до складу пристрою захисту асинхронного електродвигуна при несинусоїдальному живленні дозволяє підвищити надійність підтримання необхідного теплового режиму електродвигуна, уникнути порушень електромеханічного і температурного режиму при збільшенні втрат потужності електродвигуна 1 в широкому діапазоні змін швидкості обертання вала і дозволяє запобігти старінню ізоляції, порушенням протікання технологічного процесу, пов'язаного з роботою електродвигуна 1, а також підвищити ефективність і надійність його функціонування.

Для використання пристрою в широкому діапазоні потужностей підключення електродвигуна використовуються джерела постійної вхідної дії, які дозволяють просто робити налаштування на конкретну потужність електродвигуна за значеннями його потужності за допомогою джерела E_1 , за значенням допустимих втрат в електродвигуні 1 за допомогою джерела E_2 , за номінальним значенням продуктивності вентиляторного колеса обдуву електродвигуна 1 за допомогою джерела E_3 .

Використані джерела:

1. Патент України №7650. Дубовик В.Г., Агліулін В.Ф., Калінчик В.П. Пристрій захисту асинхронного електродвигуна від перевантаження та обриву фази. Н02Н 7/09. Бюл. №4. 26.12.95.

2. Патент України на корисну модель №46121. Дубовик В.Г., Лебедев Л.М., Перевозник Є.П. Пристрій захисту асинхронного електродвигуна. Н02Н 7/085. Бюл. №23. 10.12.2009.

