



Бунько В. Я.,
Білик С. Г.,
Калиній І. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ЕЛЕКТРОДВИГУННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ПРИ ЗОВНІШНІХ ВПЛИВАХ

Проведено дослідження підвищення надійності системи електропостачання з електродвигунним навантаженням напругою 0,4 кВ шляхом нормування неодночасності розмикання контактів комутаційної апаратури, а також використання пристроїв комплексного захисту електродвигунів з елементами адаптивності. Проведено дослідження умови виникнення максимальних комутаційних перенапруг з врахуванням неодночасного розмикання контактів комутаційних апаратів і нормування зазначеної неодночасності.

Ключові слова: електропостачання, надійність, навантаження, напруга, електродвигун, комутаційна перенапруга.

1. Вступ

Розвиток електроенергетики за останні роки характеризується активним впровадженням електронної апаратури в системах релейного захисту, режимної та протиаварійної автоматики. Однак електронна апаратура, як правило, досить чутлива до перешкод, що з'являються у вторинних колах, джерелами яких є комутаційні апарати, удари блискавок, струми короткого замикання, тощо. З іншого боку, впровадження нової техніки та технологій сприяє погіршенню показників якості електроенергії (ПЯЕ), що приводить до зниження надійності електронної апаратури і різкому зростанню відмов у роботі або помилкових спрацьовувань [1].

Одним з видів електронних засобів релейного захисту є пристрій комплексного захисту електродвигунів (ПКЗЕ). Даний пристрій виконує комплексний захист як асинхронного двигуна (АД), так і частини системи електропостачання з електродвигунним навантаженням (СЕЕДН) від ненормальних режимів. ПКЗЕ на електромеханічній базі прості в пристрої та досить зручні при експлуатації і ремонті, однак мають низькі функціональні можливості. ПКЗЕ, які виконані на мікропроцесорній (МП) елементній базі, здатні підвищити працездатність і якість функціонування СЕЕДН в різних режимах, при різноманітних зовнішніх впливах, однак мають високу сприйнятливості до перешкод [2–5].

Відомо, що для порушення роботи електромеханічного реле потрібна енергія 10^{-3} Дж, а для порушення роботи інтегральної мікросхеми потрібно 10^{-7} Дж. Перешкоди з такою енергією можуть виникнути як у СЕЕДН, так і можуть подаватись із зовнішньої мережі.

Причинами зниження надійності СЕЕДН є не тільки помилкові спрацьовування або відмови, але й технічна недосконалість релейного захисту (РЗ). Остання обставина тісно пов'язана зі структурною схемою ПКЗЕ. Як правило, системи захистів АД виконані на базі твердих зв'язків уставок і вхідних сигналів. Застосування гнучкого адаптивного захисту електродвигуна дозволяє уникнути впливу зовнішніх параметрів і дає можли-

вість відлаштуватися від ненормальних режимів автоматично.

У зв'язку із зазначеними обставинами, з'явилась необхідність вирішення складного комплексного завдання підвищення надійності в СЕЕДН напругою 0,4 кВ при зовнішніх впливах.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

При проведенні роботи використані фундаментальні положення теорії релейного захисту, теоретичних основ електротехніки, прикладної математики та електричних машин, а також методи фізичного, математичного моделювання та методи натурального випробування, теорії ймовірностей і статистичної обробки інформації [5, 6].

Великий внесок у вивченні режимів роботи, створення узагальнених математичних моделей, розрахунку електромагнітних полів і параметрів електродвигунів внесли відомі вчені та дослідники А. И. Вольдек, А. И. Важнов, С. И. Гамазин, А. А. Горев, Д. А. Городский, Я. Б. Данилевич, А. В. Иванов-Смоленский, Е. Я. Казовский, И. П. Копылов, М. П. Костенко, В. Лайон, Г. А. Сипайлов та ін.

Значний внесок у розвиток і вдосконалення захистів електродвигунів внесли вчені А. В. Бульчев, В. К. Ваннин, В. И. Ветров, А. О. Грундулис, В. П. Ерушин, В. И. Когородский, С. Л. Кужеков, В. Ф. Минаков, Л. Б. Паперно, И. П. Тимофеев і ін.

Існує ряд ПКЗЕ, які мають деякі властивості адаптивності, такі як визначення параметрів електродвигуна при першому пуску або наявність теплової моделі електродвигуна безпосередньо в ПКЗЕ [7]. Однак, недостатня гнучкість таких захистів у частині реагування на показники якості електроенергії впливає на зниження надійності захисту електродвигуна [8].

Необхідним для даного дослідження являється визначення рівнів несиметрії, несинусоїдальності напруги, а також комутаційних перенапруг у СЕЕДН напругою 0,4 кВ при комутації вакуумними контакторами.

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Метою даного дослідження є підвищення надійності СЕЕДН напругою 0,4 кВ шляхом нормування неодночасного розмикання контактів комутаційної апаратури, а також використання ПКЗЕ з елементами адаптивності.

Об'єктом дослідження є режими роботи АД, електрична мережа, ПКЗЕ та комутаційний апарат, за допомогою якого АД вмикається в мережу.

Виходячи з поставленої мети, у роботі вирішуються наступні наукові й практичні завдання:

- дослідження і аналіз зовнішніх впливів в СЕЕДН напругою 0,4 кВ таких як комутаційні перенапруги, несинусоїдальність і несиметрія напруги;
- розробка й дослідження математичної моделі системи «електрична мережа-ПКЗЕ-АД», що дозволить аналізувати електромеханічні процеси в зазначеній системі;
- дослідження умови виникнення максимальних комутаційних перенапруг з врахуванням неодночасності розмикання контактів комутаційних апаратів і нормування зазначеної неодночасності;
- дослідження впливів несиметрії напруги на максимальний момент АД;
- розробка та дослідження гнучкого мікропроцесорного захисту електродвигунів з елементами адаптивності.

4. Матеріали та методи досліджень підвищення надійності системи електропостачання з електродвигунним навантаженням

Ненормальні режими роботи АД повинні бути ліквідовані дією пристроїв релейного захисту (РЗ).

ПКЗЕ повинні містити в собі всі види захистів (або основні з них), в іншому випадку універсальність їхнього використання буде знижена. Аналіз сучасних ПКЗЕ показав:

1) мікропроцесорні пристрої релейного захисту мають ряд переваг перед пристроями, побудованими на електромеханічних реле і на операційних підсилювачах: можливість роботи в складі АСУ; гнучкість — можливість зміни алгоритмів захисту, режимів роботи та уставок з незначними тимчасовими й матеріальними витратами (повністю або частково автоматично); універсальність;

2) розглянуті ПКЗЕ, як правило, не забезпечені захистом від перекидання електродвигуна;

3) системи захисту АД не мають достатньої гнучкості (адаптивності) до змін зовнішніх факторів (заміна двигуна, який захищається, зміни ПЯЕ).

Запропоновано математичну модель для дослідження електромеханічних процесів у системі «електрична мережа-ПКЗЕ-АД» і описані експериментальні принципи проведення дослідження.

5. Результати досліджень підвищення надійності системи електропостачання з електродвигунним навантаженням напругою 0,4 кВ

Математична модель системи «електрична мережа-ПКЗЕ-АД» реалізована в модулі Simulink програмного

середовища Matlab. Для цього кожний елемент системи розглядався окремо, а потім в сукупності з іншими. Основними елементами системи є асинхронний двигун (АД), трансформатори струму (ТС), ПКЗЕ, електрична мережа. АД представлявся в трифазній загальмованій системі координат з еліптичним електромагнітним полем (рис. 1). Така модель дозволяє досліджувати АД при несиметричній, несинусоїдальній напрузі живильної мережі. При вирішенні диференціальних рівнянь в Simulink вони представлялися в неявній формі Коші [6].

У математичній моделі ТС не враховувалися гістерезисні явища, але враховувалося явище насичення феромагнітного сердечника. Залежність $B = f(H)$ задавалася у вирішальні блоки з використанням блоку «Look-up Table». Даний блок дозволяє визначати функцію від аргументу за допомогою заданої кривої.

Рівняння, що описують модель на рис. 1, мають такий вигляд:

$$\begin{cases}
 u_{sa} = r_{sa}i_{sa} + \frac{d\psi_{sa}}{dt}; \\
 u_{sb} = r_{sb}i_{sb} + \frac{d\psi_{sb}}{dt}; \\
 u_{sc} = r_{sc}i_{sc} + \frac{d\psi_{sc}}{dt}; \\
 -u_{ra} = r_{ra}i_{ra} + \frac{d\psi_{ra}}{dt} + \frac{(\psi_{rb} - \psi_{rc})\omega_r}{\sqrt{3}}; \\
 -u_{rb} = r_{rb}i_{rb} + \frac{d\psi_{rb}}{dt} + \frac{(\psi_{rc} - \psi_{ra})\omega_r}{\sqrt{3}}; \\
 -u_{rc} = r_{rc}i_{rc} + \frac{d\psi_{rc}}{dt} + \frac{(\psi_{ra} - \psi_{rb})\omega_r}{\sqrt{3}}; \\
 \psi_{sa} = L_{sa}i_{sa} - \frac{1}{2}Mi_{sb} - \frac{1}{2}Mi_{sc} + M\left(i_{ra} - \frac{1}{2}i_{rb} - \frac{1}{2}i_{rc}\right); \\
 \psi_{sb} = L_{sb}i_{sb} - \frac{1}{2}Mi_{sc} - \frac{1}{2}Mi_{sa} + M\left(i_{rb} - \frac{1}{2}i_{ra} - \frac{1}{2}i_{rc}\right); \\
 \psi_{sc} = L_{sc}i_{sc} - \frac{1}{2}Mi_{sa} - \frac{1}{2}Mi_{sb} + M\left(i_{rc} - \frac{1}{2}i_{ra} - \frac{1}{2}i_{rb}\right); \\
 \psi_{ra} = L_{ra}i_{ra} + M\left(i_{sa} - \frac{1}{2}i_{sc} - \frac{1}{2}i_{sb}\right) - \frac{1}{2}Mi_{rb} - \frac{1}{2}Mi_{rc}; \\
 \psi_{rb} = L_{rb}i_{rb} + M\left(-\frac{1}{2}i_{sa} + i_{sb} - \frac{1}{2}i_{sc}\right) - \frac{1}{2}Mi_{rc} - \frac{1}{2}Mi_{ra}; \\
 \psi_{rc} = L_{rc}i_{rc} + M\left(-\frac{1}{2}i_{sa} - \frac{1}{2}i_{sb} + i_{sc}\right) - \frac{1}{2}Mi_{ra} - \frac{1}{2}Mi_{rb}; \\
 M_\omega = p \frac{\sqrt{3}}{2} M [(i_{sa}i_{rc} + i_{sb}i_{ra} + i_{sc}i_{rb}) - (i_{sa}i_{rb} + i_{sb}i_{rc} + i_{sc}i_{ra})]; \\
 J \frac{d\omega_r}{dt} \pm M_c = M_\omega.
 \end{cases} \quad (1)$$

Електронний блок ПКЗЕ і фільтр струму зворотної послідовності моделювалися блоками з бібліотеки «SimPowerSystems». Функціональні зв'язки моделі загальної системи показані на рис. 2.

Результати експериментів показали, що похибка моделювання на математичній моделі для пускового струму не перевищує 12 %, часу пуску — 15 %.

Дослідження комутаційних перенапруг проводилися як на експериментальному стенді, так і в реальних умовах експлуатації низьковольтних двигунів у СЕЕДН.

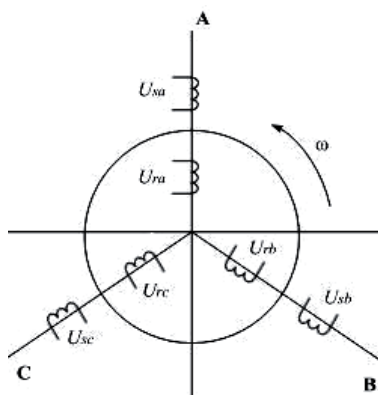


Рис. 1. Модель АД в загальмованій трифазній системі координат

Параметри якості електроенергії визначалися за допомогою приладу «AFLEX-6300». Точками вимірювання були місця з передбачуваною низькою якістю напруги, які характеризувалися близькістю підключення таких пристроїв як магнітні шайби, електролізерні установки, випрямні шафи і т. д.

Вимірювання показників якості електричної енергії (ПЯЕ) проводилися на промислових підприємствах і електростанціях. Вони показали, що в СЕЕДН можуть виникати режими, при яких несиметрія і несинусоїдальність напруги перевищують нормально і гранично допустимі значення відповідно до ДСТУ 13109-97.

Дослідження комутаційних перенапруг у СЕЕДН проводилися як на лабораторному стенді, так і в умовах промислової експлуатації АД в мережі власних потреб Бережанського РЕМУ ВАТ «Тернопільобленерго». Вимірювання проводилися на різних АД серії 4А потужністю 4,5...30 кВт. Середня кратність перенапруг показана на рис. 3.

Вплив неодновременного розмикання контактів на рівні комутаційних перенапруг досліджувалося на математичній моделі. При моделюванні не враховувалася можливість появи повторних запалювань дуги і зрізу струму, а також ферорезонансних перенапруг. Було встановлено, що максимальні перенапруги виникають при комбінації розмикання контактів, коли перші два розмикаються одночасно, а третій запізнюється.

Дослідження показали, що кратність перенапруг залежить від інтервалу часу з моменту розмикання контактів перших двох фаз до проходження струму через нуль останніх двох фаз (рис. 4). Даний інтервал визначили як норматив розмикання контактів і позначили як Δ.

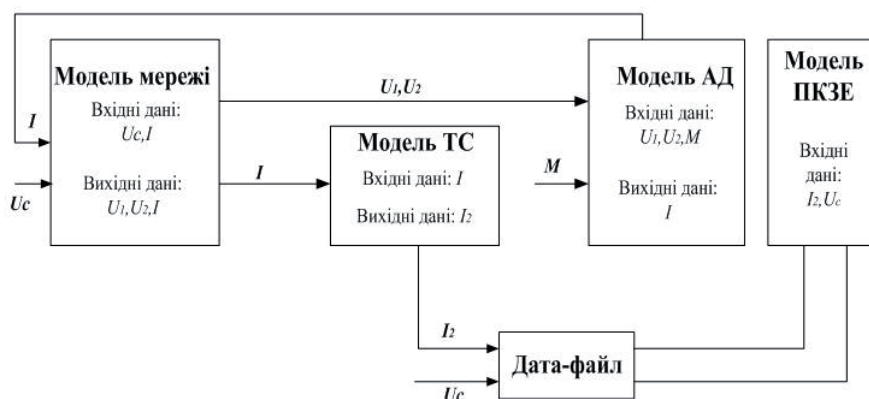
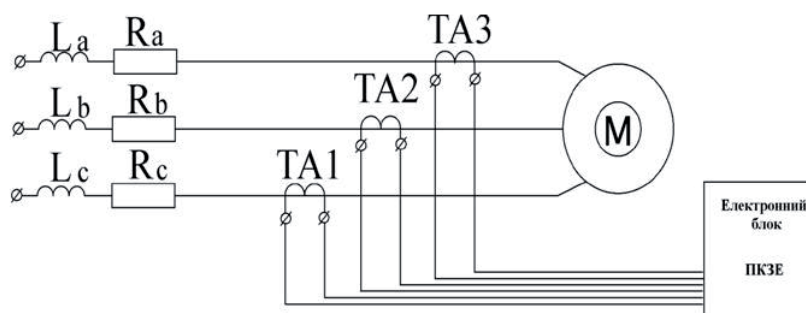


Рис. 2. Функціональні зв'язки моделі системи «електрична мережа-ПКЗЕ-АД»

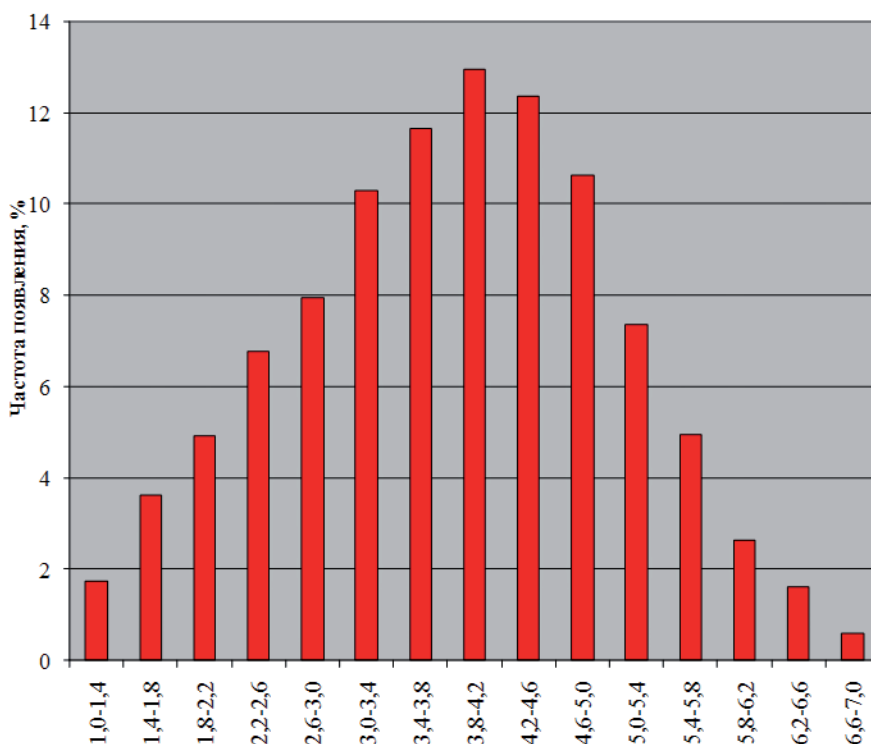


Рис. 3. Середня частота появи перенапруг у СЕЕДН напругою 0,4 кВ в умовах експлуатації

При цьому кратність перенапруг змінюється стрибкоподібно залежно від того, як розімкнувся третій контакт у межах нормативу або за його межами [9–12].

Режими відключення моделювалися при пуску АД й при сталому режимі на холостому ході, тобто при ковзанні близькому до нуля і одиниці. Для встановлення впливу довжини живильного кабелю на рівні перенапруг варіювалася ємність кабелю фаза-земля.

Дослідження показали, що кратності перенапруг при зменшенні довжини живильного кабелю й потужності електродвигуна збільшуються, а максимальні кратності виникають при вимиканні пускового струму і при різному часі розмикання контактів за межами нормативу.

Осцилограми струмів і напруг ділянки мережі з боку електродвигуна в момент відключення показані на рис. 5, де видно, що норматив складається із двох частин $\Delta 1$ і $\Delta 2$. $\Delta 1$ — це інтервал часу від моменту розмикання перших контактів ($t_1 = t_2$) до проходження першого струму (будь-якої фази) через нуль ($t_{1\phi}$), а $\Delta 2$ — це інтервал часу від моменту проходження першого струму через нуль до проходження другого і третього струму через нуль ($t_{2\phi} = t_{3\phi}$).

На рис. 5: u_d — напруга на затискачах АД; u_c — напруга на шинах системи; i — фазний струм;

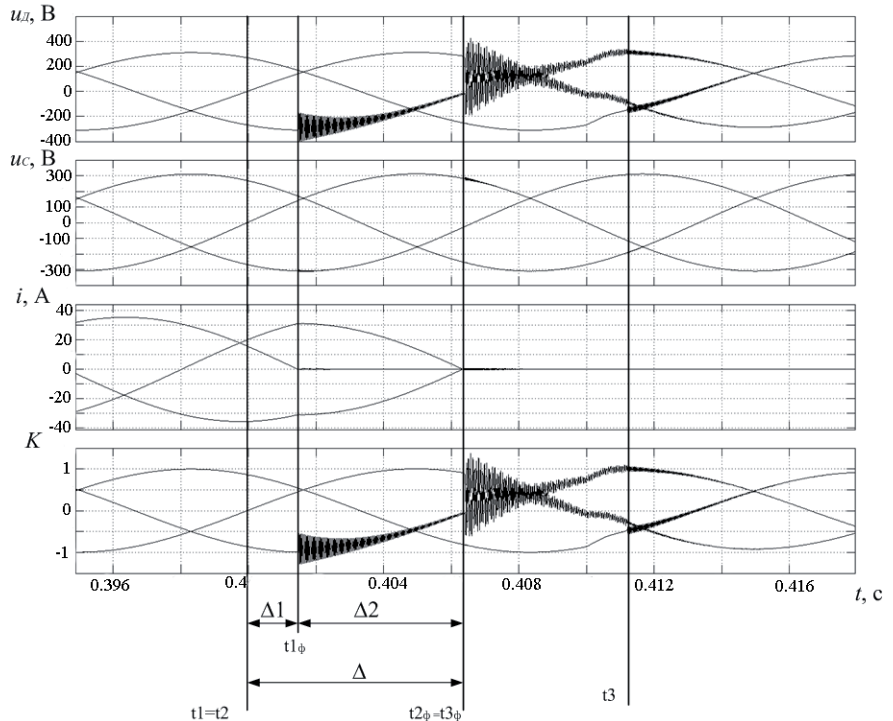


Рис. 5. Осцилограми струмів, напруг і кратностей перенапруг у момент відключення АД потужністю 37 кВт на х. х. при довжині живильного кабелю 100 м

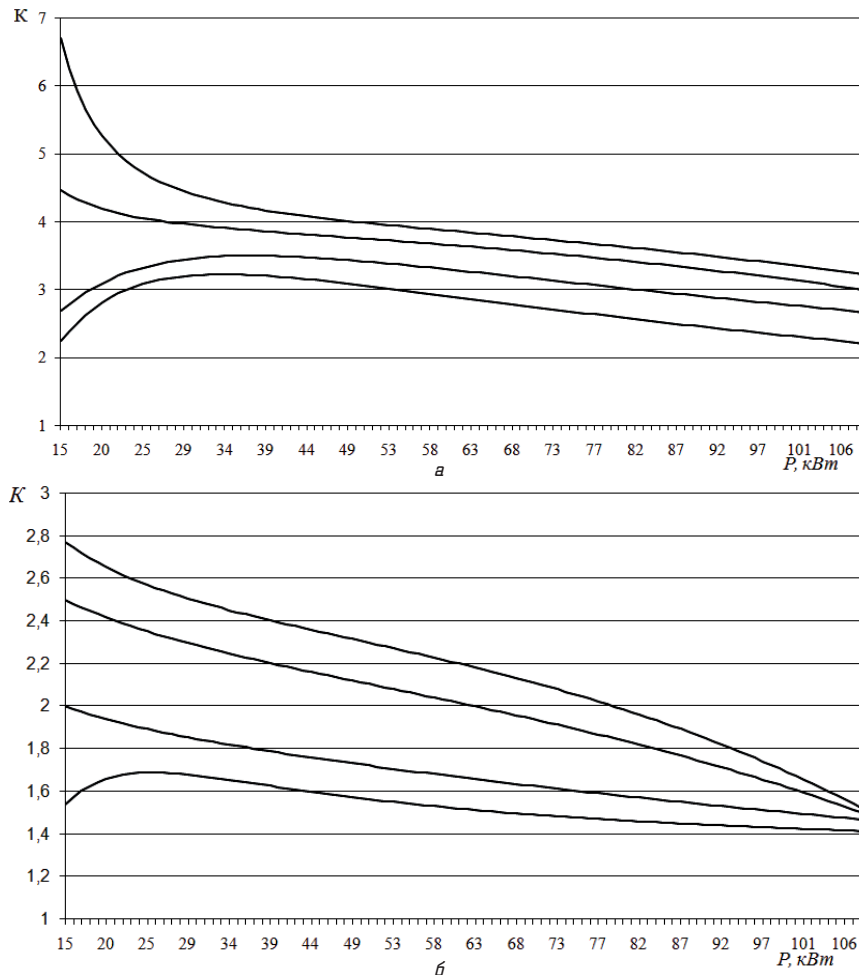


Рис. 4. Залежність кратностей перенапруг від потужності АД при вимкненні пускового струму і різній довжині кабелю: а — при розмиканні контактів у межах Δ ; б — при розмиканні контактів за межами Δ

K — кратність перенапруг; t_1, t_2, t_3 — момент часу розмикання контактів першої, другої і третьої фаз відповідно; $t_{1\phi}, t_{2\phi}, t_{3\phi}$ — момент часу проходження через нуль першої, другої і третьої фаз відповідно.

Визначено, що Δ може мати різні значення:

- а) мінімальне — $\Delta_{\min} = \Delta 1_{\min} + \Delta 2 = 0 + \pi/2 = 1/2 \cdot 0,01 \text{ с} = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ с}$;
- б) максимальне — $\Delta_{\max} = \Delta 1_{\max} + \Delta 2 = 2\pi/6 + \pi/2 = 5/6\pi = 5/6 \cdot 0,01 \text{ с} = 8,333 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

6. Результати обговорення підвищення надійності системи електропостачання з електродвигунним навантаженням напругою 0,4 кВ

Виходячи із проведених досліджень, зроблено висновок, що для зменшення кратностей комутаційних перенапруг у мережі із глухозаземленою нейтраллю 0,4 кВ необхідно, щоб час розмикання контактів не перевищував величину $\Delta = \Delta_{\min} = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Дослідження впливу первинного струму й навантаження у вторинній обмотці на роботу ТС проводилося на математичній моделі ТС [5]. Досліджувалися різні

режими роботи АД і відповідні їм впливи первинних струмів на роботу ТС.

Проводилися дослідження впливу несиметрії напруги на електромагнітний момент АД. Для цього використовувався модель системи «електрична мережа-ПКЗЕ-АД». Моделювання проводилося при різних значеннях напруги прямої і зворотної послідовностей для кожного типорозміру АД серії 4А [7, 8].

Напруга зворотної послідовності змінювалася від 0 до 10 В з кроком 2 В, а напруга прямої послідовності від 180 до 240 В з кроком 5 В. При моделюванні враховувалася тільки перша гармоніка напруги, оскільки встановлено, що вплив несинусоїдальності на максимальний момент незначний. Характерна картина впливу напруг прямої і зворотної послідовностей на максимальний електромагнітний момент АД марки 4А180М4 потужністю 30 кВт показана на рис. 6.

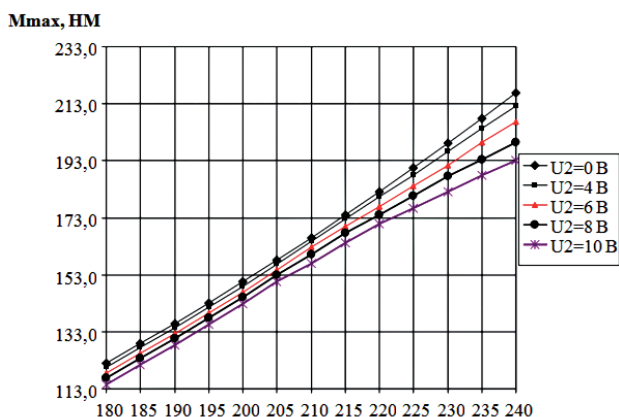


Рис. 6. Залежність $M_{\max} = f(U1, U2)$ для АД 4А180М4

В даній роботі розглянуті загальні принципи побудови захисту з елементами адаптивності; проведений аналіз сучасних мікропроцесорних систем захисту; описаний принцип адаптивного захисту АД, заснований на зміні уставок спрацьовування від несиметрії напруги; наведена методика визначення неодночасності розмикання комутаційної апаратури; наведені практичні результати теоретичних положень роботи.

Аналіз тенденції розвитку пристроїв РЗ показує широке і всезростаюче застосування мікропроцесорних реле захисту. Практично всі МП-пристрої РЗ виконані на основі інтегральних мікросхем. З основних класів мікропроцесорів можна виділити мікроконтролери, які, інтегруючи на одному кристалі високопродуктивний процесор, пам'ять і набір периферійних пристроїв, дозволяють із мінімальними витратами реалізувати широку номенклатуру систем керування різними об'єктами і процесами.

Побудова адаптивного захисту АД можлива тільки на базі мікропроцесорної техніки. Пропонований спосіб адаптивного захисту заснований на зміні максимального електромагнітного моменту залежно від напруги прямої і зворотної послідовностей [9–12]. При реалізації цього способу використовується матриця даних, яка складається з $U1, U2$ і M_{\max} . Для оптимального використання пам'яті мікроконтролера залежність $M_{\max} = f(U1, U2)$ записується в матриці даних не значеннями M_{\max} , а коефіцієнтами кубічної функції $M_{\max} = a + b \cdot U1 + c \cdot U1^3$. Коефіцієнти a, b, c визначаються для кожного $U2$,

а потім зазначена залежність визначається для типорозміру електродвигуна серії 4А. Отримане розрахункове значення M_{\max} рівняється з поточним електромагнітним моментом (M), що визначається за формулою:

$$M = \frac{i_a u_a + i_b u_b + i_c u_c - r(i_a^2 + i_b^2 + i_c^2) - \frac{1}{3} x' \frac{d}{dt}(i_a^2 + i_b^2 + i_c^2)}{\omega_c}, \quad (2)$$

де $x' = x_s - \frac{x_m}{x_r}$ — перехідна індуктивність контуру статора.

Похибка вимірювання M за формулою (2) становить 7...8 % при ковзанні в межах від номінального до критичного [5, 10].

Захист електродвигуна від несиметричних навантажень здійснюється на основі контролю струму зворотної послідовності і порівняння його за критерієм термічної стійкості до струмів зворотної послідовності:

$$A = I_2^* \cdot t = \text{const}, \quad (3)$$

де $I_2^* = \frac{I_2}{I_n}$ — відносна величина струму зворотної послідовності.

При цьому I_2 — середньоквадратичне значення струму зворотної послідовності. Постійна A визначається дослідним шляхом і задається заводом-виробником.

Захист ЕД від перевантаження здійснюється на основі непрямого контролю температури поверхні ЕД:

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\text{уст}}(1 - e^{-t/T}) + \Delta\vartheta_{\text{поч}}e^{-t/T}, \quad (4)$$

де $T = \frac{c}{\alpha F}$ — постійна часу нагрівання; $\Delta\vartheta_{\text{уст}} = \frac{\Delta P}{\alpha F}$ — стале перевищення температури у випадку нескінченно тривалого протікання по ньому струму I ; $\Delta\vartheta_{\text{поч}}$ — вихідне перевищення температури провідника в початковий момент часу [10].

Методика визначення неодночасності розмикання контактів заснована на вимірюванні неодночасності розмикання контактів при номінальній напрузі живлення котушки електромагніту комутаційного апарата, також на 10 % нижче номінального. Надалі, при порівнянні отриманих результатів з величиною 0,005 с, приймається рішення про необхідність регулювання контактів.

В даному дослідженні встановлено залежності впливу неодночасності замикання контактів низьковольтного комутаційного апарата, яким керується асинхронний двигун, на рівні комутаційних перенапруг. Встановлено, що максимальні перенапруги виникають при наступних умовах: третій контакт комутаційного апарата розмикається з затримкою щодо першого, які розмикаються одночасно; розмикання третього контакту відбувається після згасання струмів, що протікають через другий і третій контакти.

Для цього запропоновано методику визначення неодночасності розмикання контактів комутаційних електричних апаратів, що, в свою чергу, дасть змогу визначати рівні несиметрії, несинусоїдальності напруги, а також

комутаційних перенапруг в системі електропостачання 0,4 кВ при комутації вакуумними контакторами.

7. Висновки

У даній статті розглянуто та запропоновано рішення актуального наукового завдання підвищення надійності системи електропостачання з електродвигунним навантаженням 0,4 кВ шляхом нормування неодноразності розмикання контактів силової комутаційної апаратури і використання ПКЗЕ, здатного змінювати рівні спрацьовування виконавчих органів залежно від напруги прямої і зворотної послідовностей.

Проведено дослідження зовнішніх впливів у СЕЕДН. Встановлено, що середнє значення найбільш ймовірних кратностей перенапруги знаходиться в діапазоні 3,8...4,2; коефіцієнт несиметрії по зворотній послідовності — в діапазоні 1,9...3,9; а коефіцієнт несинусоїдальності — в діапазоні 9,27...15,28.

Розроблено математичну модель системи «електрична мережа-ПКЗЕ-АД», що дозволяє досліджувати різні електромеханічні процеси, з врахуванням несиметрії живильної напруги, наявності гармонійних складових, зміни моменту на валу ЕД, насичення ТС, обриву фаз, симетричних і несиметричних КЗ, виткових замиканнях обмотки статора.

Отримано залежності впливу неодноразності розмикання контакту однієї з фаз щодо двох інших низьковольтної комутаційної апаратури на рівні перенапруг при вимкненні пускового струму АД й при сталому режимі роботи АД різної номінальної потужності та різних довжин живильного кабелю. Норматив часу, що рекомендується, при розмиканні контактів становить не більше 0,005 с.

Література

1. Козирський, В. В. Електропостачання агропромислового комплексу [Текст]: підруч. / В. В. Козирський, В. В. Каплун, С. М. Волошин. — К.: Аграрна освіта, 2011. — 448 с.
2. Солдаткина, Л. А. Электрические сети и системы [Текст] / Л. А. Солдаткина. — М.: Энергия, 1998. — 216 с.
3. Захаров, О. Г. Надежность цифровых устройств релейной защиты. Показатели. Требования. Оценки [Текст] / О. Г. Захаров. — М.: Инфра-инженерия, 2014. — 128 с.
4. Akagi, H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning [Text] / H. Akagi, E. Watanabe, M. Aredes. — Wiley-IEEE Press, 2007. — 379 p. doi:10.1002/0470118938
5. Веприк, Ю. Н. Методы моделирования режимов работы электрических систем с несимметрией и тенденции их развития [Текст] / Ю. Н. Веприк // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». — 2010. — № 1. — С. 48–61.
6. Наумов, В. А. Математические модели трансформаторов тока в исследованиях алгоритмов дифференциальных защит [Текст] / В. А. Наумов, В. М. Швецов // Электрические станции. — 2003. — № 3. — С. 51–56.
7. Вольдек, А. И. Электрические машины [Текст] / А. И. Вольдек. — Л.: Энергия, 1974. — 840 с.
8. Півняк, Г. Г. Электричні машини [Текст] / Г. Г. Півняк. — Д.: НГУ, 2003. — 327 с.
9. Грицай, М. А. Мероприятия по повышению эффективности работы электрической сети [Текст] / М. А. Грицай // Региональные проблемы энергетики. — 2011. — № 3(17). — С. 23–26
10. Соркин, М. Д. Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Аварийные режимы работы [Текст] / М. Д. Соркин // Новости электротехники. — 2005. — № 2(32). — С. 102–106.
11. Zocholl, S. E. Motor analysis and thermal protection [Text] / S. E. Zocholl // IEEE Transactions on Power Delivery. — 1990. — Vol. 5, № 3. — P. 1275–1280. doi:10.1109/61.57966
12. Woodruff, N. Economical Motor Protection Using Microcomputer Technology [Text] / N. Woodruff // IEEE Transactions on Industry Applications. — 1984. — Vol. IA-20, № 5. — P. 1344–1351. doi:10.1109/tia.1984.4504604

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Проведено исследование повышения надежности системы электроснабжения с электродвигательной нагрузкой напряжением 0,4 кВ путем нормирования разновременности размыкания контактов коммутационной аппаратуры, а также использования устройств комплексной защиты электродвигателей с элементами адаптивности. Проведено исследование условия возникновения максимальных коммутационных перенапряжений с учетом разновременного размыкания контактов коммутационных аппаратов и нормирования указанной разновременности.

Ключевые слова: электроснабжения, надежность, нагрузка, напряжение, электродвигатель, коммутационное перенапряжение.

Бунько Василь Ярославович, кандидат технических наук, доцент, кафедра энергетики и автоматики, Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут», Україна, e-mail: VBuncko@gmail.com.

Білик Стефанія Григорівна, кандидат технических наук, доцент, кафедра машиновикористання та технологій в сільському господарстві, Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут», Україна.

Калиній Ірина Василівна, кандидат технических наук, доцент, кафедра інформаційних технологій та вищої математики, Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут», Україна.

Бунько Василий Ярославович, кандидат технических наук, доцент, кафедра энергетики и автоматики, Обособленное подразделение Национального университета биоресурсов и природопользования Украины «Бережанский агротехнический институт», Украина.

Билик Стефанія Григорьевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра машиноиспользования и технологий в сельском хозяйстве, Обособленное подразделение Национального университета биоресурсов и природопользования Украины «Бережанский агротехнический институт», Украина.

Кальний Ирина Васильевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра информационных технологий и высшей математики, Обособленное подразделение Национального университета биоресурсов и природопользования Украины «Бережанский агротехнический институт», Украина.

Buncko Vasyly, Branch of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine «Berezhany Agrotechnical Institute», Ukraine, e-mail: VBuncko@gmail.com.

Bilyk Stefania, Branch of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine «Berezhany Agrotechnical Institute», Ukraine.

Kalynii Iryna, Branch of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine «Berezhany Agrotechnical Institute», Ukraine.