

УДК 004.45:621.31.03

Кривонос В. Є., Василенко В. В., Бухлал Н. А.

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИЯВЛЕННЯ МЕЖВИТКОВОГО ЗАМИКАННЯ В СТАТОРНИХ ОБМОТКАХ ЕЛЕКТРОДВИГУНА В УМОВАХ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ

Асинхронні двигуни (АД) отримали широке застосування в електротехнічних комплексах промислових підприємств, портів і суден завдяки простоті експлуатації. Актуальність дослідження полягає в тому, що на сьогоднішній день розробка електричних методів діагностики початкового моменту появи виткових замикань в обмотці статора, заснована на порівнянні вимірних фазних струмів АД з їх розрахунковими значеннями.

У статті розглядається порівняння вимірних векторів фазних струмів АД з їх розрахунковими значеннями. Що в свою чергу підвищує вірогідність і чутливість виявлення початкового моменту виткових замикань в статорних обмотках АД.

Встановлено, що одночасне зниження рівнів напруги і фазних струмів до величин нижче (0,8-0,6) номінального значення і тривалістю більше трьох постійних нагріву АД є критерієм діагностики провалу напруги, при якому артеріальний тиск відключають від мережі живлення. Відсутність одного з фазних струмів $I_{aизм}$, $I_{bизм}$, $I_{сизм}$ або лінійного напруження є критерієм неповнофазного режиму мережі живлення або обриву, недовключення кола струму.

Встановлені критеріальні залежності між контрольованими параметрами мережі і АД, що надало можливість розробити комп'ютерну програму «Пристрій діагностики неповнофазних режимів мережі, струмових ланцюгів, початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках і захисту електродвигуна (ЕД)». У статті наведена логічна схема пристрою діагностики неповнофазних режимів мережі, струмових ланцюгів, початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках і захисту електродвигуна. Розроблене програмне забезпечення використовується для безаварійної експлуатації електродвигунів, які отримують живлення від мереж напругою до 1000 В., а також реалізується спосіб діагностики і захисту АД від неповнофазних режимів напруг мережі, обривів струмових ланцюгів та виявлення початкового моменту утворення виткового замикання в обмотках статора АД.

Ключові слова: електродвигун, міжвиткові замикання, функціональна діагностика, критеріальні залежності, пристрій захисту електродвигун, алгоритм, комп'ютерна програма.

Постановка проблеми. Асинхронні двигуни (АД) отримали широке застосування в електротехнічних комплексах промислових підприємств, портів, суден і сільському господарстві завдяки простоті експлуатації. АД працюють в умовах, що відрізняються від нормальних, до них відносяться технологічні переважанні, локальні перегріву ізоляції, підвищена запиленість і вологість навколишнього середовища та ін. Термін експлуатації АД, які працюють в умовах відмінних від нормальних, у 2,5-5 разів нижче нормативного. Згідно [1], в 75 % випадків аварійного виходу АД з ладу пов'язані з пошкодженням ізоляції обмоток статора, з них 40 % становлять виткові замикання в лобових частинах обмотки.

Виткові замикання, в разі несвоєчасного виявлення, призводять до дво- і трифазним замикань. Вихід АД з ладу пов'язаний з тепловою перевантаженням, коли АД працює при неповнофазному режимі напружень мережі живлення і обриву однієї з струмових ланцюгів. Розробка пристроїв і програмного забезпечення діагностики та захисту АД від аномальних режимів є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує ряд методів визначення і виявлення виткових замикань, як в моменти технологічних пауз [2], так і в процесі експлуатації [3]. Численними і найбільш вивченими є методи тестової діагностики, коли виявлення виткових замикань відбувається після відключення АД від мережі живлення. Безперервні методи функціональної діагностики з появою мікропроцесорної техніки активно розвиваються [4]. Останнім часом широко розвиваються методи безперервної діагностики, засновані на контролі споживаного струму [5].

Перспективним є розробка електричних методів діагностики початкового моменту появи виткових замикань в обмотці статора, що засновані на порівнянні вимірних фазних струмів АД з їх розрахунковими значеннями.

Мета дослідження. Визначення критеріальних залежностей контрольованих і розрахункових параметрів мережі та АД. Розробка пристрою і програмного забезпечення для діагностики і захисту АД в умовах несиметрії напруг мережі живлення.

Виклад основного матеріалу. Для аналізу режимів роботи АД, розрахунку фазних струмів АД, які отримують живлення при несиметрії напруг і встановлення критеріальних залежностей між розрахунковими і вимірюваними параметрами, потрібне знання параметрів схеми заміщення (ПСЗ) АД [6]. Як правило, застосовують Т-образну схему. Відповідно до Т-образної схемою заміщення АД рис. 1 величини і несиметрія фазних струмів залежать від зміни технологічного навантаження (зміни ковзання s), зміни комплексних фазних опорів (міжвиткові замикання), рівнів фазних напруг (несиметрія напруг мережі живлення).

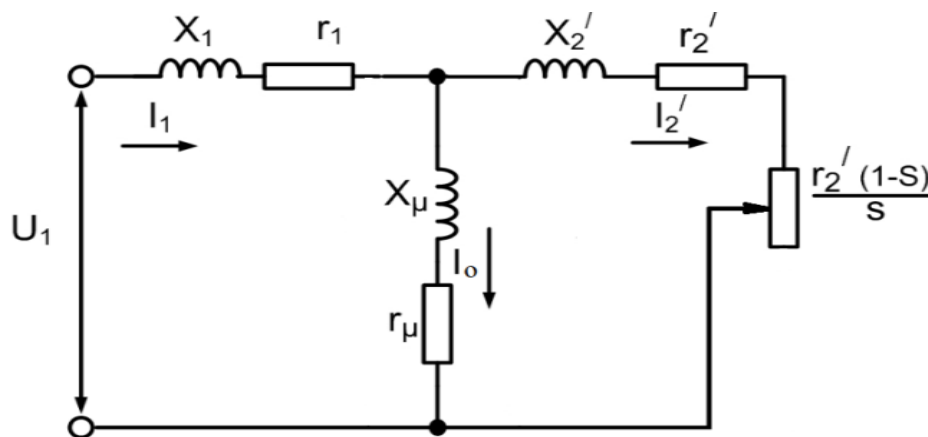


Рисунок 1 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

На рис. 1 позначені: r_1, x_1 – активний опір і індуктивне опір розсіювання обмотки статора; r_2', x_2' – приведені до обмотці статора активний опір і індуктивне опір розсіювання роторної обмотки; r_μ, x_μ – активне і індуктивний опори що намагнічує контуру, s – ковзання.

Вводячи коефіцієнт, що визначає зміну числа витків в обмотці статора при виткових замикань рівний:

$$k_w = 1 - \frac{w_k}{w_1}, \quad (1)$$

де w_k – число короткозамкнених витків обмотки статора; w_1 – загальне число витків обмотки статора;

Коефіцієнт k_w застосуємо для АД з петльовими одношаровими катушковими або секційними обмотками. Коефіцієнт k_m застосуємо для АД з петльовими одно-двошаровими катушковими або секційними обмотками.

З урахуванням виразу (1) активне r_{1w} і індуктивне x_{1w} опори статора, індуктивний опір магнітного кола $x_{\mu w}$ при виткових замикань визначаються за виразами:

$$r_{1w} = k_w \cdot r_1 \quad (2)$$

$$x_{1w} = k_w^2 \cdot x_1 \quad (3)$$

$$x_{\mu w} = k_w^2 \cdot x_\mu \quad (4)$$

При виткових замиканнях в обмотці статора величина активного і індуктивного опорів ротора, а також активна складова ланцюга намагнічування залишаються незмінними.

Повні опори статора і магнітного ланцюга з урахуванням (2)–(4):

$$\underline{Z}_{1w} = k_w \cdot r_1 + jk_w^2 \cdot x_1 \quad (5)$$

$$\underline{Z}_{\mu w} = r_\mu + jk_w^2 \cdot x_\mu \quad (6)$$

Відповідно повний опір АД для аналізу впливу зміни навантаження і опорів в гілках схеми має вигляд:

$$\underline{Z}_{wi} = \left(1 - \frac{w_k}{w_1}\right)^2 \cdot \left[\left(\frac{r_1}{1 - \frac{w_k}{w_1}} + jx_1 \right) + \frac{\left(\frac{r_2'}{s} + jx_2' \right) \cdot \left(\frac{r_\mu}{\left(1 - \frac{w_k}{w_1}\right)^2} + jx_\mu \right)}{\left(\frac{r_2'}{s} + jx_2' \right) + \left(r_\mu + j \left(1 - \frac{w_k}{w_1}\right)^2 x_\mu \right)} \right], \quad (7)$$

де \underline{Z}_{wi} – повний комплексний опір АД в i -й фазі.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Відповідно до ДСТУ 13109-97 напруга в фазі при наявності відхилення визначається виразом:

$$U_{\phi i} = (1 + \Delta U_{\phi i}) \cdot U_n \quad (8)$$

де $U_{\phi i}$ – напруга, що вимірюється в i -й фазі, $\Delta U_{\phi i}$ – відхилення напруги в i -й фазі.

Фазна напруга, яка виражена через номінальне значення і відхилення напруги, визначається виразом:

$$\underline{U}_{\phi i} = (1 + \Delta U_{\phi i}) \cdot e^{j\Delta\phi_i} \cdot U_{\phi n} \quad (9)$$

Відповідно фазні струми рівні:

$$\underline{I}_{\phi i} = \frac{\underline{U}_{\phi i}}{\underline{Z}_{wi}} = \frac{(1 + \Delta U_{\phi i}) \cdot e^{j\Delta\phi_i} \cdot U_{\phi n}}{\left(1 - \frac{w_k}{w_1}\right)^2 \cdot \left[\frac{r_1}{1 - \frac{w_k}{w_1}} + jx_1\right] + \frac{\left(\frac{r_2'}{s} + jx_2'\right) \cdot \left[\frac{r_\mu}{\left(1 - \frac{w_k}{w_1}\right)^2} + jx_\mu\right]}{\left(\frac{r_2'}{s} + jx_2'\right) + \left[r_\mu + j\left(1 - \frac{w_k}{w_1}\right)^2 x_\mu\right]} \quad (10)$$

Установлюючи критеріальні залежності:

$$I_{ар} = I_{a \text{ изм}} \pm \delta; I_{бр} = I_{b \text{ изм}} \pm \delta; I_{ср} = I_{c \text{ изм}} \pm \delta, \quad (11)$$

де - $I_{ар}$, $I_{бр}$, $I_{ср}$, - розрахункові фазові струми, $I_{амзи}$, $I_{бизм}$, $I_{сизм}$, - фазові струми, що були виміряні та

$$\varphi_{ар} = \varphi_{a \text{ изм}} \pm \delta; \varphi_{бр} = \varphi_{b \text{ изм}} \pm \delta; \varphi_{ср} = \varphi_{c \text{ изм}} \pm \delta, \quad (12)$$

де - $\varphi_{ар}$, - $\varphi_{бр}$, - $\varphi_{ср}$, - розрахункові фазові кути, - $\varphi_{амзи}$, - $\varphi_{бизм}$, - $\varphi_{сизм}$, - фазові кути, що були виміряні.

Значення фазних струмів, які були виміряні і розраховані, в межах заданої похибки δ є критерієм нормальної роботи АД

Виконання нерівності:

$$I_{ар} \neq I_{a \text{ изм}} \pm \delta; I_{бр} \neq I_{b \text{ изм}} \neq \delta; I_{ср} \neq I_{c \text{ изм}} \pm \delta \quad (13)$$

та

$$\varphi_{ap} \neq \varphi_{a \text{ изм}} \pm \delta; \varphi_{bp} \neq \varphi_{b \text{ изм}} \pm \delta; \varphi_{cp} \neq \varphi_{c \text{ изм}} \pm \delta \quad (14)$$

є критерієм виявлення початкового моменту виткового замикання.

Одночасне зниження рівнів напруги і фазних струмів до величин нижче (0,8-0,6) номінального значення і тривалістю більше трьох постійних нагріву АД є критерієм діагностики провалу напруги, при якому артеріальний тиск відключають від мережі живлення.

Відсутність одного з фазних струмів $I_{a \text{ изм}}$, $I_{b \text{ изм}}$, $I_{c \text{ изм}}$ або лінійного напруження є критерієм неповнофазного режиму мережі живлення або обриву, недовключення кола струму.

Використовуючи отримані критеріальні залежності розроблена комп'ютерна програма «Пристрій діагностики неповнофазних режимів мережі, струмових ланцюгів, початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках і захисту електродвигуна (ЕД)» [2], є програмним забезпеченням для безаварійної експлуатації електродвигунів, які отримують живлення від мереж напругою до 1000 В.

На рис. 2, приведена логічна схема пристрою діагностики неповнофазних режимів мережі, струмових ланцюгів, початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках і захисту електродвигуна.



Рисунок 2 – Блок-схема пристрою виявлення початкового моменту виткових замикань в статорних обмотках АД

Пристрій складається з комутаційного апарату 1, блок вимірювання лінійних струмів двигуна 2, аналогово-цифрового перетворювача 3, 6, 8, 11, двигуна 4, блоку вимірювання швидкості обертання двигуна 5, блок вимірювання лінійних напруг мережі живлення 7, мікроконтролера 9, блоку вимірювання частоти живильної мережі 10, виконавчого блоку управління і сигналізації 12, блоку живлення 13.

Машинобудування і зварювальне виробництво

На рис. 3, приведена логічна схема проходження інформаційних сигналів, сигналів виміру контрольованих величин, командних управляючих сигналів.

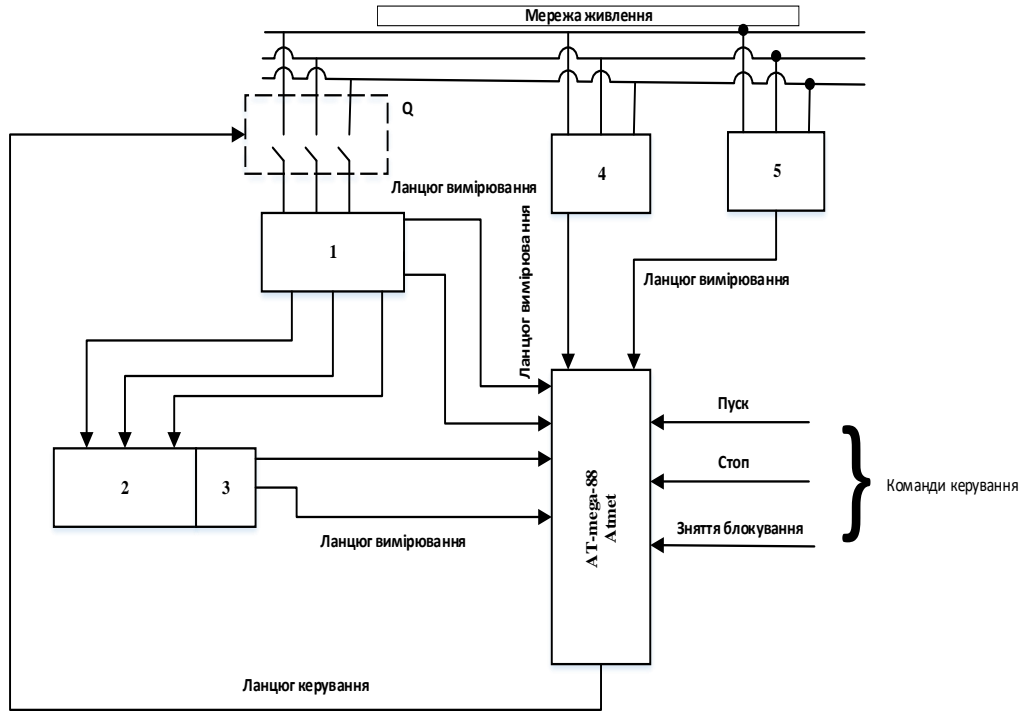


Рисунок 3 – Логічна схема проходження інформаційних сигналів, сигналів виміру контрольованих величин, командних управляючих сигналів

На рис. 3 позначено: 1 – блок виміру струмів, 2 – електродвигун, блок виміру швидкості обертів електродвигуна, 4 – блок виміру частоти мережі живлення, 5 – блок виміру лінійних напруг мережі живлення.

На рис. 4 приведена блок схема алгоритму комп'ютерної програми, позначено: $U_{ав}$, $U_{вс}$, $U_{са}$ - лінійних напруги; U_a , U_b , U_c - фазні напруги; r_1 , x_1 – активна та реактивна складові обмотки статора r_2 , x_2 , - приведені активна та реактивна складові обмотки ротора, r_μ , x_μ , - активна та реактивна складові ланцюгів намагнічення; p – число пар полюсів; $\Delta\beta$ – розмір довірчих інтервалів; φ_a , φ_b , φ_c - фазові кути між напругами; τ – часова пауза; I_a , I_b , I_c , - фазові струми; $\varphi_{а1}$, φ_{b1} , φ_{c1} - фазові кути струмів; S – ковзання; f – частота мережі; n – швидкість електродвигуна; n_0 - швидкість магнітного поля; I_{aPac} , I_{bPac} , I_{cPac} – розрахункові значення фазних струмів.

Керуючими командами є сигнали на керування пускачів Q- пускач (вимикач) для включення і виключення електродвигуна це команда «Пуск» - підключення електродвигуна до мережі живлення, команда «Стоп» - відключення електродвигуна від мережі, команда «Зняття блокування» - знімає обмеження після аварійної зупинки електродвигуна.

Вимірюваними сигналами є: $I_{aизм}$, $I_{bизм}$, $I_{cизм}$, - фазні струми, φ_{a1} , φ_{b1} , φ_{c1} - фазові кути струмів, $U_{ав}$, U_{bc} , U_{ca} - лінійні напруги, φ_a , φ_b , φ_c - фазові кути між напругами, f – частота мережі; n – швидкість електродвигуна;

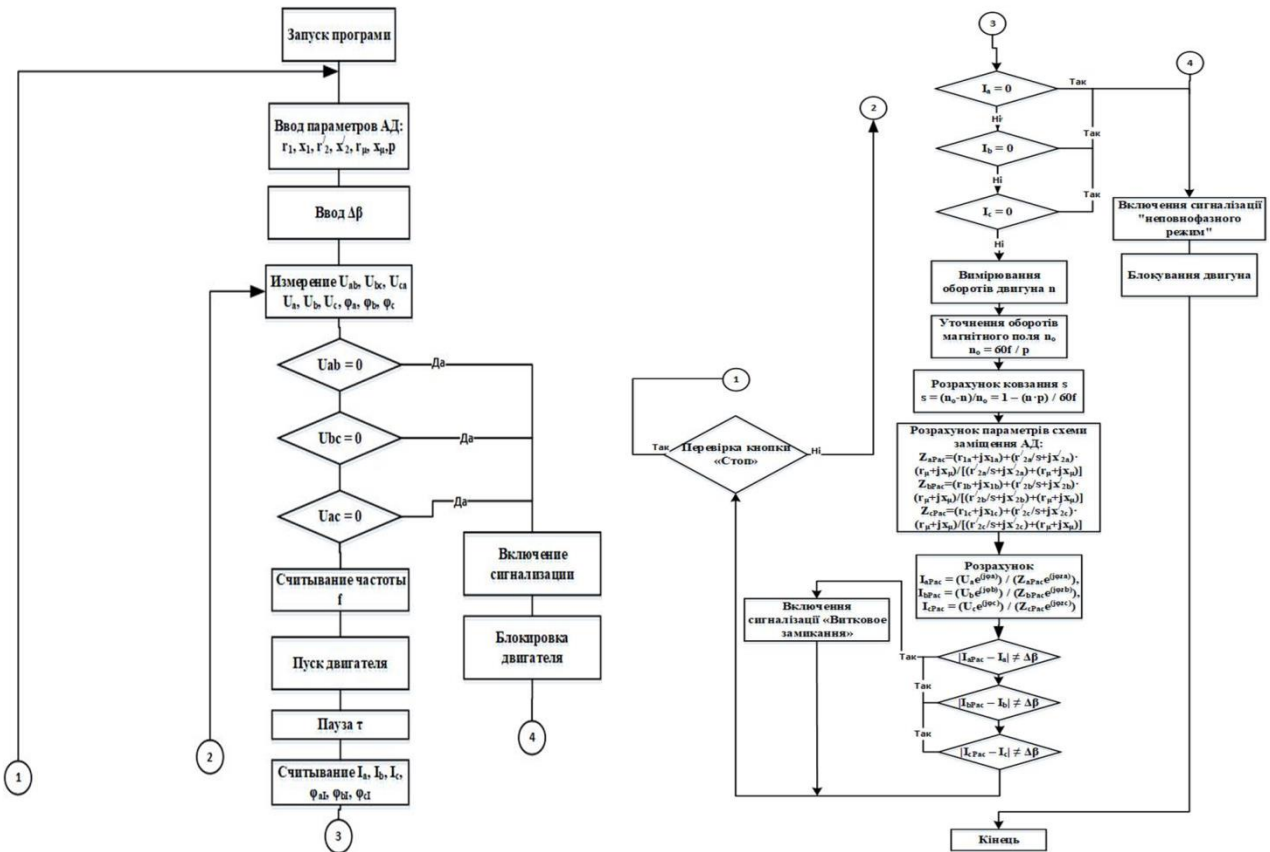


Рисунок 4 – Блок схема алгоритму

Робота комп'ютерної програми «Пристрій діагностики неповнофазних режимів мережі, струмових ланцюгів, початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках і захисту електродвигуна».

За даними дослідів холостого ходу і короткого замикання розраховуються параметри схеми заміщення ЕД, які є вихідними даними.

«Команда «Пуск». Перевіряється обмеження «Блокіровок» за відсутності блокіровок проводиться вимірювання лінійних напруг мережі живлення. Наявність трьох лінійних напруг, відхилення яких не перевищують значення нормованого ДСТУ 13109-97, формує сигнал в ланцюзі управління комутаційним апаратом Q і ЕД підключається до мережі. У другу чергу проводиться вимірювання фазних струмів. Наявність трьох напруг мережі живлення і трьох фазних струмів свідчить про нормальному режимі праці струмових ланцюгів та електропостачання ЕД.

Обрив одного струмоведучого ланцюга призводить до появи нульового значення струму в пошкодженому ланцюгу і збільшення сили струмів в двох непошкоджених ланцюгах, при цьому лінійних напруг залишаються незмінними. Ця аварійна ситуація

Машинобудування і зварювальне виробництво

сигналізується як «обрив кола струму». Мікропроцесор подає сигнал в блок керування, який відключає ЕД від мережі.

Неповнофазний режим мережі призводить до зникнення однієї лінійної напруги і фазного струму ЕД. Мікропроцесор подає сигнал в блок керування, який відключає ЕД від мережі та відображає цю аварійну ситуацію.

Постійно вимірюються швидкість обертання ЕД, частота мережі, рівень напружень мережі і величини фазних струмів. За отриманими значеннями проводиться корекція параметрів схеми заміщення ЕД і розраховуються фазні струми і фазові кути між ними. Проводиться порівняння вимірних і розрахункових значення фазних струмів і фазових кутів. Відхилення порівнюваних значень більше встановленого, з урахуванням величини довірчого інтервалу, є критерієм виявлення початкового моменту виткового замикання в обмотках статора ЕД.

Програма працює таким чином. Встановлюються початкові дані, якими є : константи, задаючи допустимі значення контрольованих величин,. На рис. 5 приведений протокол роботи комп'ютерної програми.

```

Ввод параметров АД:
r1 : 4.9
x1: 4.7
r2: 7.2
x2: 5.15
rm: 2.04
xm: 49.02
p: 3
B: 0.02
Измерение U:
Ua: 220
Ub: 220
Ua: 220
Uab: 380
Ubc: 380
Uac: 380
Измерение ф(фи):
фа: 0
фb: -120
фс: -240
Ua: 220
Ub: -109.798-190.642j
Uc: -110.404+190.292j
Измерение частоты f: 50
Пуск двигателя!
Пауза t: 10
Измерение I:
Ia: 4.640
Ib: 4.638
Ic: 4.655
Измерение угла фи:
фIab: -57
фIab: -177
фIab: 63
Измерение оборотов двигателя n: 915
Измерение частоты f: 50
Расчёт n0: 1000
Расчёт скольжения s: 0.085
Расчёт параметров АД
Za: 25.7991+39.6375j
Zb: 25.7991+39.6375j
Zac: 25.7991+39.6375j
Гарас: 2.53755-3.89867j
Гарас: -4.64486-0.253181j
Гарас: 2.09876+4.15138j
Сигнализация! Витковое замыкание!
Нажата кнопка "Стоп" ? (y/n) _
    
```

Рисунок 5 – Протокол роботи комп'ютерної програми

ВИСНОВКИ

1. Порівняння вимірних векторів фазних струмів АД з їх розрахунковими значеннями підвищує достовірність і чутливість виявлення початкового моменту виткових замикань в статорних обмотках АД.

2. Встановлені критеріальні залежності між контрольованими параметрами мережі і АД дозволили розробити програмне забезпечення для пристрою, що реалізує спосіб діагностики і захисту АД від неповнофазних режимів напруг мережі, обривів струмових ланцюгів та виявлення початкового моменту утворення виткового замикання в обмотках статора АД.

Список використаних джерел:

1. *Хомутов, С. О.* Система поддержания надежности электрических двигателей на основе комплексной диагностики и эффективной технологии восстановления изоляции [Электронный ресурс] : монография / *С. О. Хомутов*. – Барнаул : МЦ ЭОР, 2015. – 399 с. – Режим доступа: http://elib.altstu.ru/disser/stat/Хомутов_monograph.pdf

2. *Бобров, В. В.* Оценка эффективности основных методов диагностики асинхронных электродвигателей / *В. В. Бобров* // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/1. – С. 198–203.

3. *Браташ, О. В.* Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей / *О. В. Браташ, А. П. Калинов* // Вести Кременчукского гос. политехн. ун-та. – 2006. – № 4. – С. 44.

4. Новые методы диагностики асинхронных двигателей / *А. И. Титко [и др.]* // Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ: зб. наук. пр. – К., 2014. – Вип. 37. – С. 58–61.

5. А. с. 96405 Україна. Комп'ютерна програма «Пристрій діагностики неповнофазних режимів мережі, струмових ланцюгів, початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках і захисту електродвигуна» / *Кривоносов В. Є., Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Кривоносов В. В., Борякін А. О., Василенко С. В.* – опубл. 27.02.2020. – 1 с.

6. *Кривоносов, В. Е.* Сравнительный анализ методов расчета параметров схем замещения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [Электронный ресурс] = Comparative analysis of methods for calculating the parameters of asynchronous engines for reference data / *В. Е. Кривоносов, С. В. Василенко* // Österreichisches Multiscience Journal. – 2019. – Vol. 1, N 18. – P. 36–42. – Mode of access: http://aus-journal.com/wp-content/uploads/2019/07/Oster_%E2%84%9618.pdf

Кривоносов В. Е., Василенко В. В., Бухлал Н. А.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫЯВЛЕНИЯ МЕЖВИТКОВОГО ЗАМЫКАНИЯ В СТАТОРНЫХ ОБМОТКАХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Асинхронные двигатели (АД) получили широкое применение в электротехнических комплексах промышленных предприятий, портов и судов благодаря простоте эксплуатации.

Актуальность исследования заключается в том, что на сегодняшний день разработка электрических методов диагностики начального момента появления витковых замыканий в обмотке статора, основана на сравнении измеренных фазных токов АД с их расчетными значениями.

В статье рассматривается сравнение измеренных векторов фазных токов АД с их расчетными значениями. Что в свою очередь повышает достоверность и чувствительность обнаружения начального момента витковых замыканий в статорных обмотках АД.

Установлено, что одновременное снижение уровней напряжения и фазных токов до величин ниже (0,8-0,6) номинального значения и продолжительностью более трех постоянных нагрева АД является критерием диагностики провала напряжения, при котором артериальное давление отключают от сети. Отсутствие одного из фазных токов $I_{aизм}$, $I_{bизм}$, $I_{сизм}$ или линейного напряжения является критерием неполнофазного режима сети питания или обрыва, недовключения цепи тока.

Установлены критериальные зависимости между контролируемыми параметрами сети и АД, что дало возможность разработать компьютерную программу «Устройство диагностики неполнофазных режимов сети, токовых цепей, начального момента виткового замыкания в статорных обмотках и защиты электродвигателя (ЭД)». В статье приведена логическая схема устройства диагностики неполнофазных режимов сети, токовых цепей, начального момента виткового замыкания в статорных обмотках и защиты электродвигателя. Разработанное программное обеспечение используется для безаварийной эксплуатации электродвигателей, которые получают питание от сетей напряжением до 1000 В., а также реализуется способ диагностики и защиты АД от неполнофазных режимов напряжений сети, обрывов токовых цепей и выявления начального момента образования виткового замыкания в обмотках статора АД.

Ключевые слова: *электродвигатель, межвитковые замыкания, функциональная диагностика, критериальные зависимости, устройство защиты электродвигатель, алгоритм, компьютерная программа.*

Krivosov V. E., Vasilenko V. V., Bouhlal N. A.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR DETECTING AN INTER-TURN FAULT IN THE STATOR WINDINGS OF AN ELECTRIC MOTOR UNDER CONDITIONS OF VOLTAGE ASYMMETRY

Asynchronous motors are widely used in electrical complexes of industrial enterprises, ports and ships due to their ease of operation. The relevance of the study lies in the fact that today the development of electrical methods for diagnosing the initial moment of occurrence of loop faults in the stator winding is based on comparing the measured phase currents of asynchronous motors with their calculated values.

The article deals with the comparison of the measured phase current vectors of asynchronous motors with their calculated values. This, in turn, increases the reliability and sensitivity of detecting the initial moment of loop faults in the stator windings of asynchronous motors.

It is established that the simultaneous reduction of voltage levels and phase currents to values below (0.8-0.6) the nominal value and lasting more than three continuous heating of asynchronous motors is a criterion for diagnosing a voltage failure in which blood pressure is disconnected from the network. The absence of one of the phase currents I_{aizm} , I_{bizm} , I_{cizm} or line voltage is a criterion for an incomplete phase mode of the power supply network or an open or under-connected current circuit.

The criteria dependences between the controlled parameters of the network and asynchronous motors were established, which made it possible to develop a computer program "Device for diagnostics of incomplete network modes, current circuits, the initial moment of a turn circuit in the stator windings and motor protection (ED)". The article presents a logical diagram of the device for diagnostics of non-full-phase network modes, current circuits, the initial moment of the turn circuit in the stator windings and motor protection. The developed software is used for trouble-free operation of the electric motors that receive power from networks with voltage up to 1000 V, and also implements a method of diagnosis and protection of asynchronous motors unbalance voltage, break current circuits and identify the initial moment of short circuit in the stator windings of asynchronous motors.

Keywords: *electric motor, inter-turn circuits, functional diagnostics, criterion dependencies, electric motor protection device, algorithm, computer program.*

*Рекомендовано до публікації: канд. техн. наук, доц. Балалаєва О. Ю.
Стаття надійшла 01.12.2020 р.*