

УДК 621.313.34

Ю.О. Ясинський, В.В. Баженин, Д.М. Гончаров

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ СХЕМ КЕРУВАННЯ

Надійність низьковольтних електромагнітних апаратів (зокрема пускечів) можна умовно підрозділити на заводську конструктивну і експлуатаційну, а їх відмови можна розділити на два види: раптові й поступові. Раптові відмови можна віднести до поняття конструктивної надійності. Поступові відмови можна віднести до поняття експлуатаційної надійності. Відмови низьковольтних електромагнітних апаратів спостерігається в контактах, обмотках котушок і в механічній частині. Відмови контактів електромагнітних апаратів у більшості випадків пояснюються тяжкими умовами роботи, при цьому відмови відбуваються через зношування контактів. Відмови обмоток котушок найбільш часто виникають через обриви й міжвиткові замикання. На підставі цих припущень проведено визначення ймовірності безвідмовної роботи низьковольтних електромагнітних апаратів.

**Ключові слова:** низьковольтні електромагнітні апарати, контактні системи, котушки, магнітні системи, надійність, аналіз, розрахунки.

### Вступ

Об'єктом аналізу є електромагнітні апарати (зокрема пускачі) на напругу в силових колах схем керування 0,4 – 0,66 кВ.

Від технічного стану низьковольтних електромагнітних апаратів у значній мірі залежить довговічність і надійність роботи електроприводів і електричних установок. Відмови низьковольтних електромагнітних апаратів можна розділити на два види: раптові й поступові. Раптові відмови наступають, як правило, при стрибкоподібній зміні одного або декількох параметрів функціональних вузлів апаратів. Поступові відмови наступають внаслідок зношування й старіння функціональних вузлів і деталей. Найбільше число відмов таких апаратів спостерігається в контактах, обмотках котушок і в механічній частині.

**Аналіз літератури.** Відмови контактів низьковольтних електромагнітних апаратів у більшості випадків пояснюються тяжкими умовами роботи. На зношування контактів впливають такі фактори, як струм і напруга, рід струму, частота включення й вимикання, характер навантаження, зовнішнє середовище (температура, вологість і запыленість повітря, наявність пар або газів), вібрація та ін. У зв'язку із цим спостерігається частий вихід контактів з ладу. Особливо це ставиться до контактів апаратів, що працюють у важких режимах [4].

Найбільш часто в умовах експлуатації відмови контактів відбуваються через зношування контактів. Одним з найбільш важливих факторів, що впливають на зношування контактів, є дія електричної дуги, що виникає при їхньому розмиканні. Дуговий розряд при розмиканні контактів викликає опалення й випар матеріалу, з якого виготовлені контакти. Ступінь зношування контактів залежить від струму дуги, часу її горіння, матеріалу контактів і

їхньої форми. При значних струмах і нечастих включеннях і вимиканнях зношування контактів можна вважати пропорційним числу вимикань. При відносно невеликих струмах і частих включеннях зношування контактів у значній мірі залежить від частоти включення, що багато в чому визначає температуру контактів і активність процесів окислювання їхніх поверхонь [1 – 4].

Електричне зношування контактів, яке перевищує механічне зношування, відбувається при включенні й відключенні контактів під напругою. При вимиканні між контактами виникає місток розплавленого металу, що випаровується й розприскується тим інтенсивніше, чим більше сила струму в момент розмикання контактів. Електричне зношування контактів виникає також при відскакуванні рухливих контактів від нерухливих при ударі в момент їхнього зіткнення.

В електричних колах з малим значенням струму досить часто виникають відмови незамикання, які викликані утворенням окисних плівок на поверхні контактів.

**Відмови обмоток котушок** найбільш часто виникають через обриви й міжвиткові замикання. Провідники котушок звичайно обриваються в місцях з низькою якістю пайки при механічних навантаженнях та вібрації. Міжвиткові замикання обмоток котушок виникають при ушкодженні ізоляції провідів, з яких намотані котушки при довгостроковому проходженні струму, значення якого перевищує номінальне. Струм у котушці найбільше часто збільшується при заклинюванні в проміжних положеннях або при нещільному приляганні робочих поверхонь магнітопроводів апаратів. Крім того, ізоляція ушкоджується при перенапругах під час включення й вимикання живлення обмотки котушки й з

інших причин. Для визначення струму, що проходить через короткозамкнені витки обмотки, у котушках магнітних пускачів ПМЕ-200, намотаних проводом ПЭТВ діаметром 0,18 мм, закорочувались 50 і 100 витків. Результати виміру струму показали, що при повному металевому замиканні 50 витків струм у них перевищує номінальний струм котушки приблизно в 30 разів[5]. При наявності 100 короткозамкнених витків струм у витках перевищує номінальний приблизно в 25 разів. Якщо між витками є не повне коротке замикання, тобто місце дефекту ізоляції має певний опір, то струм у короткозамкнених витках різко зменшується й при опорі 90 Ом дорівнює номінальному струму котушки. Отже, при опорі в місці дефекту міжвиткової ізоляції менше за 90 Ом у витках проходить струм більше номінального в кілька разів, що приводить до перегріву котушки, прискореному розвитку нагріву й виникненню нових дефектів в ізоляції – аж до виходу обмотки котушки пускача з ладу. Таким чином, в умовах експлуатації необхідно не тільки виявляти короткозамкнені витки з повним металевим замиканням, але й ослаблені ділянки ізоляції, які можуть привести до виходу котушки з ладу. У зв'язку із цим, для виявлення ослаблених місць в ізоляції рекомендується прикладати до виткової ізоляції котушки напругу, яка в 10 – 15 разів перевищує номінальну. Це дає можливість виявляти дефекти в початковій стадії їхнього розвитку й вживати необхідних заходів.

Експериментальні дані свідчать, що інтенсивність відмов котушок можна вважати лінійною функцією включення-відключення апарату і часу роботи котушки.

**Відмови механічних систем** електромагнітних апаратів часто виникають у зв'язку зі зношуванням і поломками деталей, а також внаслідок перекосів, зачіпань і заклинувань рухливої системи. Відмови їх механічних систем становлять близько 20% всіх відмов низьковольтних апаратів, причому такі відмови є поступовими.

**Метою роботи** є аналіз надійності низьковольтних електромеханічних комутаційних апаратів схем керування.

Об'єктивною оцінкою надійності низьковольтних електромагнітних апаратів є ймовірність безвідмовної роботи  $P(Z_1)$  за задану кількість комутаційних циклів при певних умовах експлуатації. Згідно з [1]:

$$P(Z_1) = \exp \left[ - \int_0^{z_1} \lambda(Z) dz \right], \quad (1)$$

де  $\lambda(Z)$  – інтенсивність відмов.

Для визначення надійності апарата необхідно знати характеристики надійності його основних функціональних вузлів – сприймаючого (котушки), проміжного (механічної системи) і виконавчого (за-

микальних і розмикальних контактів), які піддаються під час експлуатації комплексу механічних, електричних і теплових навантажень. Функціональні вузли з'єднані послідовно, тобто при відмові одного із них апарат виходить з ладу. Відмови окремих вузлів з достатньою для інженерних розрахунків ймовірністю приймаються незалежними.

Для визначення ймовірності безвідмовної роботи апарата дійсна формула [1]:

$$P(Z) = \prod_{i=1}^N P_i(Z), \quad (2)$$

де  $P_i(Z)$  – ймовірність безвідмовної роботи  $i$ -го функціонального вузла. Вираз (2) може бути представлений у наступному вигляді:

$$P(Z) = P_K(Z, t) \cdot P_{м.с}(Z) \cdot [P_{з.к}(Z)]^m [P_{р.к}(Z)]^n \quad (3)$$

де  $P_K(Z, t)$  – ймовірність безвідмовної роботи котушки в функції кількості циклів і часу;  $P_{м.с}(Z)$  – ймовірність безвідмовної роботи механічної системи;  $P_{з.к}(Z)$  і  $P_{р.к}(Z)$  – ймовірність безвідмовної роботи відповідно замикальних і розмикальних контактів,  $m$  і  $n$  – відповідно кількість замикальних і розмикальних контактів.

Ймовірність безвідмовної роботи низьковольтних електромагнітних апаратів слід розглядати в конкретних режимах їх використання в системах управління.

## Основний матеріал

Необхідність знання типових режимів визначає проведення ймовірнісно-статистичного аналізу навантажень виконавчих контактів апаратів. Знання характеристик конкретних навантажень, які комутуються (при включенні і відключенні) відповідною кількістю контактів пускачів у схемах управління, дозволяє виконати побудову графіків їх інтегральних статистичних ймовірностей. Найбільший практичний інтерес представляє область комутованих струмів, якій відповідає максимальне значення статистичної ймовірності.

Чисельно ця область визначається наступними параметрами:

- комутована напруга: 220 – 380 В;
- струм включення при  $\cos \varphi = 0,6 - 0,7 - 0,5: 1 - 10$  А;
- струм відключення при  $\cos \varphi = 0,3 - 0,4: 1 - 5$  А.

Експериментальні криві інтенсивності відмов  $\lambda(Z)$  і ймовірності безвідмовної роботи окремих функціональних елементів пускачів типу ПМЕ-071 і ПМЕ-111 –  $P(Z)$  – у типовому режимі застосування схем управління металорізальними верстатами представлені в [4].

Для порівняльної оцінки роботи функціональних елементів пускачів ПМЕ-071 і ПМЕ-111 у вка-

заному режимі в табл. 1 подані їх кількісні характеристики надійності. Аналіз експериментальних характеристик надійності контакторів і використання загальних теоретичних положень дозволяють отри-

мати розрахункові співвідношення, які об'єктивно оцінюють надійність функціональних елементів і апаратів в цілому.

Таблиця 1

Кількісні характеристики надійності елементів пускачів ПМЕ-071 і ПМЕ-111

Характеристика надійності		Функціональні елементи				
		Котушка	Механічна система		Контакти	
					замикальні	розмикальні
<b>Пускач типу ПМЕ-071</b>						
Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-6}$ 1 / цикл	Елементів	–	0,1		0,52	0,56
	Сумарна			1,18		
Ймовірність безвідмовної роботи за $10^6$ циклів	Елементів	–	0,90		0,59	0,57
	Апарата			0,31		
<b>Пускач типу ПМЕ-111</b>						
Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-6}$ 1 / цикл	Елементів	0,07	–		0,4	0,15
	Сумарна			0,62		
Ймовірність безвідмовної роботи за $10^6$ циклів	Елементів	0,93	–		0,67	0,86
	Апарата			0,54		

**Аналіз надійності роботи котушки.** В умовах реальної експлуатації у котушок низьковольтних електромагнітних апаратів спостерігаються і раптові, і поступові відмови. До раптових належать відмови типу коротке замикання і обрив, які відбуваються звичайно в момент здійснення апаратом комутаційної операції. Процес старіння ізоляції обмоток викликає поступові відмови котушок, які є функцією часу. Таким чином, ймовірність безвідмовної роботи котушки слід розглядати в функції двох аргументів – кількості комутаційних циклів і часу [2]. Для виведення розрахункової формули ймовірності безвідмовної роботи котушки приймаємо, що раптові і поступові відмови є незалежними подіями. Сумарна інтенсивність відмов котушки складає:

$$\lambda_k(Z, t) = \lambda_{BH}(Z) + \lambda_{пост}(t), \quad (4)$$

де  $\lambda_{BH}(Z)$  – інтенсивність раптових відмов;

$\lambda_{пост}(t)$  – інтенсивність поступових відмов.

Ймовірність безвідмовної роботи котушки на основі виразу (1) визначається співвідношенням:

$$P_k(Z, t) = \exp \left\{ - \int_0^Z \lambda_{BH}(Z) dZ + \int_0^t \lambda_{пост}(t) dt \right\}, \quad (5)$$

або:

$$P_k(Z, t) = \exp \left[ - \int_0^Z \lambda_{BH}(Z) dZ \right] \times \exp \left[ - \int_0^t \lambda_{пост}(t) dt \right], \quad (6)$$

де  $P_{BH}(Z) = \exp \left[ - \int_0^Z \lambda_{BH}(Z) dZ \right]$  – ймовірність безвідмовної роботи котушки при раптових відмовах, а

$P_{пост}(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda_{пост}(t) dt \right]$  – ймовірність безвідмовної роботи котушки при поступових відмовах.

Тоді:

$$P_k(Z, t) = P_{BH}(Z) \cdot P_{пост}(t). \quad (7)$$

Результати експериментальних досліджень на надійність пускачів типів ПМЕ-071, ПМЕ-211 і ПМЕ-111 (див. рис. 9 в [3]) свідчать, що інтенсивність раптових відмов котушок може бути прийнята з достатнім для інженерного розрахунку ступенем ймовірності величиною постійною, тобто:

$$\lambda_{BH}(Z) = \text{const}. \quad (8)$$

Ймовірність безвідмовної роботи котушок електромагнітних апаратів при поступових відмовах незначно відрізняється від одиниці і менше ймовірності їх безвідмовної роботи при поступових відмовах [4]. Тому в (3) другим співмножником можна знехтувати.

Остаточно вираз для визначення ймовірності безвідмовної роботи котушки буде мати такий вигляд:

$$P_k(Z) = \exp(-\lambda_{BH} \cdot Z). \quad (9)$$

**Аналіз надійності роботи механічної системи.** Експериментальні залежності інтенсивності відмов механічних систем загальнопромислових пускачів від кількості циклів на інтервалі 1 млн. операцій мають лінійний характер з тенденцією зростання. Ця закономірність підтверджує фізичну сутність процесів, які протікають в механічній системі і викликають її відмови:

$$\lambda_{\text{м.с}}(Z) = \lambda_{0_{\text{м.с}}} + RZ. \quad (10)$$

Використовуючи (1) і (10), можна отримати:

$$P_{\text{м.с}}(Z) = \exp \left[ - \left( \int_0^Z \lambda_{0_{\text{м.с}}} dZ + \int_0^Z RZ dZ \right) \right]. \quad (11)$$

Інтегруючи, отримуємо:

$$P_{\text{м.с}}(Z) = \exp \left[ - \left( \lambda_{0_{\text{м.с}}} \cdot Z + \frac{RZ^2}{2} \right) \right]. \quad (12)$$

Через те що параметр  $R$  має невелике значення, то для інженерного розрахунку може бути прийнята формула:

$$P_{\text{м.с}}(Z) = \exp(-\lambda_{\text{м.с}} \cdot Z). \quad (13)$$

**Аналіз надійності роботи контактної системи.** Порівняльний аналіз характеристик надійності контактів досліджуваних апаратів показав, що у типовому релейному режимі найменшу інтенсивність відмов мають контакти пускачів типу ПМЕ-111. Для замикальних і розмикальних контактів пускачів ПМЕ-071 і ПМЕ 111 на кривих інтенсивності відмов характерна наявність припрацювальної області на інтервалі до  $300 \cdot 10^3$  комутаційних циклів включно. Ймовірність безвідмовної роботи контактів пускачів ПМЕ-071 і ПМЕ-111 у вказаному режимі описується експоненціальним законом, тобто:

$$P_{\text{вн.к}}(Z) = \exp[-\lambda_{\text{вн}} \cdot Z]. \quad (14)$$

Інтенсивність раптових відмов контактів залежить від багатьох факторів. У роботах [5, 6] наводиться формула, яка дозволяє кількісно оцінити число відмов контакту при комутації навантажень, характерних для схем управління верстатами, в залежності від кількості циклів  $Z$  комутуваної напруги  $U$  і контактної тиску  $P$ :

$$F = 200 \frac{Z^{0,8}}{U^2 P^{1,5}}. \quad (15)$$

Кількість відмов контакту прийнята пропорційною кількості комутацій у ступені 0,8. Це означає, що в початковий період спостерігається велика кількість відмов. Аналогічні результати отримані при дослідженні надійності контактів загальнопромислових пускачів.

Суттєво збільшується інтенсивність відмов контактів при напрузі нижче 60 В. При великих конта-

ктних тисках різко збільшується кількість відмов у області більш низьких значень напруг [5]. Для скорочення кількості відмов контактів доцільно використовувати ланцюги управління з напругою живлення 110 В і більше.

Для типового релейного режиму застосування електромагнітних апаратів, які розглядаються, справедливий вираз для обчислення ймовірності безвідмовної роботи:

$$P(Z) = \exp \left[ - \left( \lambda_{\text{к}} + \lambda_{\text{м.с}} + m\lambda_{\text{з.к}} + n\lambda_{\text{р.к}} \right) \cdot Z \right]. \quad (16)$$

Для інших можливих режимів використання електромагнітних апаратів в схемах управління формули для ймовірності безвідмовної роботи мають більш складний вигляд і наведені в [4].

Таким чином, аналіз результатів експериментального дослідження надійності малих пускачів ПМЕ-071 і ПМЕ-111 у типовому релейному режимі застосування схем управління показує, що останні мають найбільшу надійність. Ймовірність безвідмовної роботи пускачів ПМЕ-111 у вказаному режимі складає 0,54 – 0,79 за  $10^6$  комутаційних циклів залежно від кількості контактів, які використовуються в схемах управління (мінімальне значення відповідає 5 замикальним і 2 розмикальним контактам, максимальне – 1 замикальному і 1 розмикальному контактам).

У той же час діагностика поточної працездатності електромагнітних апаратів на сьогоднішній день зводиться до періодичної перевірки властивостей ізоляції, перехідного опору силового ланцюга, змащення усіх тертьових вузлів, замірювання ходу рухомих частин і правильності функціонування, при цьому строки проведення перевірок регламентує виробник без урахування особливостей експлуатації обладнання.

Пропонується контроль працездатності апарата проводити шляхом постійного контролю стану контактної системи. Це можна реалізувати такими способами.

*Спосіб 1.* Через те що величина перехідного опору визначає температуру в контактному вузлі, то необхідно встановити термодатчик на оболонку камери і відповідно до граничних температурних значень проводити виведення апаратури із експлуатації:

$$T_{\text{М}} = T_{\text{ОКР}} + \frac{\rho I^2}{K_{\text{Тр}} P S} + \frac{R_{\mu} I^2}{2\sqrt{\lambda K_{\text{Тр}} P S}} + \frac{R_{\mu} I^2}{8\lambda p}. \quad (17)$$

Такий спосіб дуже простий і відображає реальність умов місця експлуатації. У фінансовому плані він не вимагає суттєвих вкладень, але необхідно встановлювати конкретні межі для кожного типу комутаційного апарата кожного виробника.

*Спосіб 2.* Замість термодатчика встановити вольтметр, який також у реальному часі відображає здатність апарата до комутації.

Спосіб 3. Спосіб перерахунку терміну служби апарата у часових одиницях, заснований на перерахунку величини струму комутації і режиму оперування у безрозмірні умовні одиниці з подальшим розрахунком необхідних значень.

Цей спосіб можна реалізувати на базі сучасних мікропроцесорних пристроїв постійним перерахунком ймовірного терміну експлуатації після здійснення кожної операції без виведення обладнання із ладу. Він дозволить полегшити процес експлуатації обладнання і знизити ризики в схемах керування.

### ВИСНОВКИ

Пропонується контроль працездатності низковольтних комутаційних апаратів проводити шляхом постійного контролю стану контактної системи. Пропонуються способи реалізації такого контролю:

– встановлення термодатчиків на конструкції системи дугогасіння і відповідно до граничних температурних значень проводити виведення апаратури із експлуатації;

– замість термодатчика встановити вольтметр, який також у реальному часі відображає здатність апарата до комутації;

– спосіб перерахунку терміну служби апарата у часових одиницях, заснований на перерахунку величини струму комутації і режиму оперування у безрозмірні умовні одиниці з подальшим розрахунком необхідних значень.

### Список літератури

1. Копытин Ф.А. Сравнительные соотношения расчетных и экспериментальных данных сопротивления электрических контактов / Ф.А. Копытин // *Электротехническая промышленность. Серия Аппараты низкого напряжения*. – 1971. – Вып. 7. – С. 18-21.

2. Кудрицкий В.Д. Прогнозирование надежности радиоэлектронных устройств / В.Д. Кудрицкий. – К.: Техника, 1973. – 156 с.

3. Основы теории электрических аппаратов / Под ред. Г.В. Буткевича. – М.: Высшая школа, 1970. – 600 с.

4. Таран В.П. Техническая диагностика при эксплуатации электрооборудования / В.П. Таран. – К.: Урожай, 1978. – 152 с.

5. Тевлин Э.В. Анализ надежности контакторной аппаратуры схем управления / *Электротехническая промышленность* / Э.В. Тевлин. – 1978. – Вып. 304. – С. 24-26.

Надійшла до редколегії 9.11.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.Г. Гриб, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків.

### АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Ю.А. Ясинский, В.В. Баженин, Д.Н. Гончаров

*Надежность низковольтных электромагнитных аппаратов (в частности пускателей) можно условно подразделить на заводскую конструктивную и эксплуатационную, а их отказы можно разделить на два вида: внезапные и постепенные. Внезапные отказы можно отнести к понятию конструктивной надежности. Постепенные отказы можно отнести к понятию эксплуатационной надежности. Наибольшее число отказов низковольтных электромагнитных аппаратов наблюдается в контактах, обмотках катушек и в механической части. Отказы контактов электромагнитных аппаратов в большинстве случаев объясняются тяжелыми условиями работы, при этом отказы происходят через изнашивание контактов. Отказы обмоток катушек наиболее часто возникают через обрывы и межвитковые замыкания. На основании этих допущений выполнено определение вероятности безотказной работы низковольтных электромагнитных аппаратов.*

**Ключевые слова:** низковольтные электромагнитные аппараты, контактные системы, катушки, магнитные системы, надежность, анализ, расчеты.

### SECURITY OF LOW-VOLTAGE ELECTROMECHANICAL INTERCONNECT VEHICLES OF MANAGEMENT CHARTS ANALYSIS

Ю.А. Yasinский, V.V. Bazhenin, D.N. Goncharov

*Reliability of low-voltage electromagnetic vehicles (in particular allow) can be de bene esse subdivided into factory structural and operating, and their refuses can be divided into two kinds: sudden and gradual. Sudden refuses can be attributed to the concept of structural reliability. Gradual refuses can be attributed to the concept of operating reliability. The most number of refuses of low-voltage electromagnetic vehicles is observed in contacts, обмотках of spools and in mechanical part. The refuses of contacts of electromagnetic vehicles in most cases are explained by the heavy terms of work, here refuses take place through the wear of contacts. The refuses of обмоток of spools most often arise up through precipices and межвитковые shorting. On the basis of these assumptions determination of probability of faultless work of low-voltage electromagnetic vehicles is executed.*

**Keywords:** low-voltage electromagnetic annпараты, контактные systems, spools, magnetic systems, reliability, analysis, calculations.