

УДК 621.313.019.3

Ю.О. Ясинський, П.В. Васюченко, Д.І. Гришин

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## АНАЛІЗ І РОЗРАХУНКИ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Фактори, що визначають надійну роботу електродвигунів постійного струму в період їхньої експлуатації, практично можна підрозділити на дві групи. До першої з них відноситься конструкційна надійність машин, а до другої – умови експлуатації. Одною з головних причин виходу з ладу електродвигунів є неефективність методів аналізу та розрахунків експлуатаційної надійності електродвигунів постійного струму, які розглядаються в літературі без достатніх подробиць. Для кількісної оцінки показників надійності електродвигунів запропоновано ряд статистичних критеріїв. Розглянута методика оцінки надійності електроціток заснована на використанні статистичних даних випробування на надійність вибірки електроціток обсягом  $n$ . Імовірність безвідмовної роботи, або надійність, колекторно-щіткового вузла  $P_{ц.г}(t)$  практично можна визначити через імовірність безвідмовної роботи щіткового апарата  $P_{ц.а}(t)$ .

**Ключові слова:** електродвигун постійного струму, колекторно-щітковий вузол, надійність, аналіз, розрахунок.

## Вступ

**Постановка задачі.** Фактори, що визначають надійну роботу електродвигунів постійного струму в період їхньої експлуатації, практично можна підрозділити на дві групи. До першої з них відноситься конструкційна надійність машин, а до другої – умови експлуатації.

Як показує аналіз причин виходу з ладу електродвигунів на різних підприємствах і окремих об'єктах, багато аварій відбувається з вини обслуговуючого персоналу, що не завжди забезпечує необхідний догляд за машинами або ж якісне виконання поточного ремонту. Слід зазначити, що дані про причини виходу з ладу в період експлуатації електродвигунів постійного струму у цей час поки ще недостатні. Тому питання, яке розглядається у цій роботі, є актуальним.

У відомій літературі, наприклад [1 – 6], розглядаються питання експлуатаційної надійності електродвигунів постійного струму, але методи її аналізу

та розрахунків надаються без достатніх подробиць.

**Аналіз літератури.** В [2] наводяться дані про спостереження за роботою шести прокатних електродвигунів постійного струму типу ПКБ250/145, 3320 кВт, які застосовувались для індивідуального приводу валків блюмінгів. Ці дані показують, що за шість років з початку експлуатації прокатних установок (1978–1984 р.) мали місце 22 повних відмови електродвигунів. Наробіток до перших відмов їх склав  $T_{ср} = 2$  років, або 17520 годин, а середній час між сусідніми відмовами  $t_{ср} = 1,4$  року, або 12260 годин. У табл. 1 для ілюстрації наводяться дані про відмовах окремих частин прокатних двигунів типу ПКБ250/145 у відсотках до загального числа відмов двигунів [2].

Табл. 1 звертає увагу на дуже високий відсоток відмов прокатних електродвигунів типу ПКБ250/145 через ушкодження колекторів, причому усунення цих відмов вимагає значного часу й засобів для відновлення працездатності електродвигунів.

Таблиця 1

Дані відмов прокатних двигунів постійного струму

Частини прокатних двигунів	Відмови окремих частин двигунів по відношенню до загальної кількості їх відмов, %			Простої цеха внаслідок відмов окремих частин двигунів по відношенню до загального часу їх простоїв		
	Блюминг №1	Блюминг №2	Блюминг №3	Блюминг №1	Блюминг №2	Блюминг №3
Обмотка якоря	5,5	10,5	–	29,4	33,3	–
Обмотка головних полюсів	–	–	–	–	–	–
Обмотка додаткових полюсів та компенсаційна	11,0	–	–	7,2	–	–
Колектор	44,3	58,6	66	47,1	61,4	85
Різні механічні пошкодження	39,2	30,9	34	16,3	5,3	15

Аналіз причин відмов прокатних двигунів постійного струму типу ПКБ250/145 показує, що близько 80% становлять конструкційні й технологічні відмови й приблизно 20% – експлуатаційні відмови.

Якщо припустити, що імовірність безвідмовної роботи розглянутих прокатних двигунів типу ПКБ250/145 змінюється в часі практично по експоненціальній кривій, то середня інтенсивність відмов двигунів буде:

$$\lambda = \frac{1}{T_{\text{CP}}} = \frac{1}{17250} = 0,57 \cdot 10^{-4} \text{ г}^{-1}, \quad (1)$$

а надійність їх по рівнянню (1) для двох проміжків часу роботи  $t = 1000$  і  $4000$  годин складе:

$$P(1000) = e^{-0,57 \cdot 10^{-4} \cdot 1000} = e^{-0,067} \approx 0,945,$$

$$P(4000) = e^{-0,57 \cdot 10^{-4} \cdot 4000} = e^{-0,228} \approx 0,80.$$

Це є невисоким показником.

У тягових двигунах електровозів одною з частих причин відмов у роботі є виникнення колового вогню на колекторах. Оpubліковані статистичні дані за 1984 р. показують, що найбільша інтенсивність цього явища, а також інших ушкоджень двигунів доводиться на літні місяці. У табл. 2 для ілюстрації цього наводяться дані про кількість ушкоджень тягових двигунів типу НБ-412М електровозів ВЛ60 [4].

Нарешті, відносно відмов в роботі електродвигунів постійного струму загальнопромислового застосування слід зазначити, що по статистиці виходу з ладу цих машин під час експлуатації близько 20% випадків відмов із загального числа ушкоджених машин відбувається через несправності колекторів [3, 5].

**Метою роботи є підвищення надійності електродвигунів постійного струму.**

Таблиця 2

Дані по кількості пошкоджень тягових електродвигунів

Пошкодження двигуна	Місяць				
	травень	липень	червень	серпень	вересень
Круговий вогонь на колекторі	42	76	71	112	78
Кількість інших пошкоджень	70	102	97	170	106

## Основний матеріал

Важливими заходами щодо підвищення надійності електродвигунів постійного струму масового виробництва є кількісне визначення впливу на комутацію технологічних відхилень параметрів магнітної системи й колекторно-щіткового вузла й розробка відповідних допусків на ці відхилення.

Для кількісної оцінки показників надійності електродвигунів можна користуватися наступними статистичними критеріями:

- імовірністю безвідмовної роботи електродвигунів  $P(t)$  протягом певного заданого проміжку часу;
- частотою відмов електродвигунів  $a(t)$ ,
- інтенсивністю відмов електродвигунів  $\lambda(t)$ .

У ряді випадків для більше повної кількісної оцінки надійності електродвигунів постійного струму необхідно знати ще наступні дані:

- середній час безвідмовної роботи електродвигунів

$$\bar{T}_{\text{CP}} = \frac{1}{\lambda(t)}, \quad (2)$$

де  $\lambda(t)$  – середня інтенсивність відмов електродвигунів;

- середній час між двома сусідніми відмовами електродвигунів (наробіток на відмову):

$$t_{\text{CP}} = \frac{\sum_{i=1}^r t_i}{r}, \quad (3)$$

де  $r$  – кількість відмов машини за час  $t$ ;  $t_i$  – час справної роботи її між  $(i-1)$ -м та  $i$ -м відмовами;

– коефіцієнт профілактики й ремонту електродвигуна

$$k_{\text{РЕМ}} = \frac{\sum t_{\text{РЕМ}}}{t_{\text{РАБ}}}, \quad (4)$$

де  $\sum t_{\text{РЕМ}}$  – сумарний час у годинах, затрачений на необхідну профілактику й ремонт електродвигунів протягом року (місяця) для підтримки її в справному стані;  $t_{\text{РАБ}}$  – кількість годин безвідмовної роботи електродвигунів протягом року (місяця);

– частота профілактики й ремонту електродвигунів

$$f_{\text{РЕМ}} = \frac{n_{\text{РЕМ}}}{\sum t_{\text{РАБ.П}}}, \quad (5)$$

де  $n_{\text{РЕМ}}$  – число ремонтів машини протягом року (місяця);  $\sum t_{\text{РАБ.П}}$  – сумарний час роботи й змушеного простою її протягом року (місяця);

– коефіцієнт простою електродвигунів

$$k_{\text{П}} = \frac{t_{\text{П}}}{\sum t_{\text{РАБ.П}}}, \quad (6)$$

де  $t_{\text{П}}$  – час змушеного простою електродвигунів протягом року (місяця);

– коефіцієнт ремонтпридатності електродвигунів,

$$k_{\text{р.п.}} = \frac{\sum C_{\text{рік}}}{C_0}, \quad (7)$$

де  $\sum C_{\text{рік}}$  – сума витрат часу й засобів протягом року на виявлення, усунення й попередження відмов електродвигунів;  $C_0$  – вартість нової машини.

Для розглянутих вище шести прокатних електродвигунів постійного струму типу ПКБ250/145 визначені по рівняннях (1)–(7) середні часи безвідмовної роботи становлять:  $T_{\text{ср}} = 2$  роки, і наробітку на відмову:  $t_{\text{ср}}=1,4$  роки. Можна для ілюстрації привести по рівняннях (4), (5), (7) ще наступні додаткові величини для кількісної оцінки надійності цих двигунів: коефіцієнт профілактики й ремонту  $k_{\text{рем}} = 0,03$ , частоту цієї профілактики й ремонту  $f_{\text{рем}} = 0,10$  і коефіцієнт ремонтпридатності з урахуванням витрат на капітальні ремонти  $k_{\text{р.п}} = 0,14 - 0,16$ .

### Розрахунок надійності колекторно-щіткового вузла

Колекторно-щітковий вузол конструктивно являє собою одну з відповідальних частин машини постійного струму, що поєднує колектор і щітковий апарат у єдиний пристрій для спільної роботи. Під щітковим апаратом тут розуміються комплекти щіткотримачів із щітками, розташовані на бракетах або пальцях щіткової траверси. Щітковий апарат під час тривалої роботи характеризується зносними відмовами за рахунок поступового зношування щіток. Межа цього зношування обмежується величиною припустимого мінімального значення їхньої висоти, нижче якого настає відмова в роботі машини через вихід з ладу щіток.

Електрощітка є невідновлюваним елементом конструкції щіткового апарата. Її надійність  $P_{\text{щ}}(t)$  оцінюється ймовірністю безвідмовної роботи за час  $t$ , протягом якого відбувається її зношування до граничної припустимої мінімальної висоти. У зв'язку із цим відмова електрощітки настає у випадку, коли:

$$h_t \leq h_{\text{пр}}, \quad (8)$$

де  $h_t$  – значення висоти щітки, що проробила час  $t$ , мм;  $h_{\text{пр}}$  – припустиме мінімальне значення висоти щітки (за межами якої настає відмова), мм.

Отже, безвідмовна робота електрощітки буде за умови:

$$h_t > h_{\text{пр}}. \quad (9)$$

Зноси електрощіток різних марок залежать від величини окружної швидкості обертання колектора, тиску щіток на колектор, ряду виробничих факторів і умов експлуатації. Вони є випадковими подіями, тому й швидкість зношування щітки  $v_{\text{щ}}$  є випадковою величиною.

Час безвідмовної роботи електрощітки становить:

$$t = \frac{h - h_i \delta}{v_{\dot{u}}}, \tilde{a} \quad (10)$$

де  $h$  – висота електрощітки перед випробуванням, мм;  $v_{\text{щ}}$  – швидкість зношування, мм/г.

Як показує досвід експлуатації електрощіток на різних електричних машинах, розподіл їхніх швидкостей зносу наближається до нормального розподілу. Тоді середнє значення швидкості зношування електрощітки можна представити у вигляді:

$$\bar{v}_{\text{щ}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{\text{щ}i}, \quad (11)$$

і середнє квадратичне відхилення цієї швидкості як:

$$\bar{\sigma}_v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_{\text{щ}i} - \bar{\sigma}_v)^2}, \quad (12)$$

де  $\sigma_{\text{щ}i}$  – СКВ поточного значення швидкості зношування електрощіток, мм/год;  $n$  – обсяг вибірки цих щіток.

Вірогідність безвідмовної роботи електрощіток у інтервалі часу  $t$  можна представити у вигляді:

$$P_{\text{щ}}(t) = 1 - Q_{\text{щ}}(t), \quad (13)$$

де ймовірність відмови щіток у цьому інтервалі в припущенні нормального розподілу відмов:

$$Q_{\text{щ}}(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{v_{\text{щ}} \sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t_i - \bar{T})^2}{2v_{\text{щ}}^2}} dt, \quad (14)$$

при цьому середнє статистичне значення часу відмов електрощіток буде:

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, \quad (15)$$

і середнє квадратичне відхилення їхнього часу:

$$v_{\text{щ}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{T})^2}, \quad (16)$$

де  $t_i$  – частка час відмови електрощітки.

Розглянута методика оцінки надійності електрощіток заснована на використанні статистичних дані випробування на надійність вибірки електрощіток обсягом  $n$ .

Ймовірність безвідмовної роботи, або надійність колекторно-щіткового вузла  $P_{\text{щ.в}}(t)$  практично можна визначити через ймовірність безвідмовної роботи щіткового апарата  $P_{\text{щ.а}}(t)$ :

$$P_{\text{щ.у.}}(t) \approx P_{\text{щ.в.}}(t). \quad (17)$$

Розрахунок надійності щіткового апарата машини постійного струму  $P_{\text{щ.а}}(t)$  базується на використанні кривої ймовірності безвідмовної роботи  $P_{\text{щ}}(t)$  для генеральної сукупності електрощіток даної марки. На практиці, однак, мають у своєму розпорядженні тільки статистичну оцінку зазначеної характеристики й область її довірчих значень. Щітковий апарат при даному розрахунку розглядають як деяку резервовану систему із дробовим коефіцієнтом резервування, обумовленим експериментальним шляхом по рівнянню:

$$k_p = \frac{N}{N - n_1}, \quad (18)$$

де  $N$  – загальне число електрощіток у машині;  $n_1$  – припустима кількість їх відмов, що не приводить до відмови машини (визначається в ході випробувань).

Комплект електрощіток у машині можна розглядати як вибірку обсягу  $N$  з великої генеральної сукупності, що характеризується кривою надійності  $P_{щ}(t)$ . Для деякого обраного моменту часу  $t$  по вихідній кривій надійності визначаємо імовірність безвідмовної роботи щіток  $P_{щ}(t_i)$  і, отже, імовірність їхньої відмови:

$$Q_{щ}(t_i) = 1 - P_{щ}(t_i). \quad (19)$$

Якщо припустимо число відмов щіток у комплекті дорівнює  $n_1$ , то ймовірність події, що при  $N$  випробуваннях зустрінеться не більше  $n_1$  відмов, по теорії імовірності буде:

$$P_N(n_1) = \sum_{K=0}^{n_1} C_N^K [Q_{щ}(t_i)]^K [P_{щ}(t_i)]^{N-K}, \quad (20)$$

де число сполучень із  $N$  по  $K$  дорівнює:

$$C_N^K = \frac{N(N-1)(N-2)\dots(N-K+1)}{K}.$$

Величина  $P_N(n_1)$  є сумарна імовірність появи при випробуваннях  $0, 1, 2, \dots, n_1$  відмов, що за умовою допустимості  $n_1$  відмов буде відповідати імовірності безвідмовної роботи щіткового апарата. Останню на підставі сказаного можна представити у вигляді:

$$P_{ща}(t) = \sum_{K=0}^{n_1} C_N^K [Q_{щ}(t)]^K [P_{щ}(t)]^{N-K}. \quad (21)$$

Імовірність того, що при випробуваннях зустрінеться більш ніж  $n_1$  відмов щіток, являє собою імовірність відмови щіткового апарата.

Наприклад, при наявності в машині двох щіток ( $N = 2, n_1 = 0$ ) рівняння (21) приймає вигляд:

$$P_{ща}(t) = C_2^0 [Q_{щ}(t)]^0 [P_{щ}(t)]^{2-0} = [P_{щ}(t)]^2. \quad (22)$$

Отже, розрахунок імовірності безвідмовної роботи щіткового апарата  $P_{ща}(t)$  зводиться до використання рівняння (21) для фіксованих моментів часу  $t_i$ .

## Висновки

1. Проаналізована статистика відмов двигунів постійного струму. Проаналізовані ушкодження машин постійного струму.
2. Запропоновані засоби підвищення надійності двигунів постійного струму.
3. Виконано розрахунок надійності колекторно-щіткового вузла.

## Список літератури

1. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко. – М.: Наука, 1984. – 446 с.
2. Маликов В.М. Повышение качества, надежности и долговечности электрических машин / В.М. Маликов. – М.: ВНИИЭМ, 1975. – 15 с.
3. Ермолин Н.П. Вопросы надежности и долговечности электрических машин / Н.П. Ермолин. – М.: ЛЭТИ, 1976. – 35 с.
4. Леонович А.С. О законе распределения времени безотказной работы электродвигателей / А.С. Леонович // Электромеханика. – 1987. – №8. – С. 858-863.
5. Повышение надежности и эффективности работы электрических машин // сб. статей под ред. В.А. Глебова // Труды РИИЖТ. – Вып. 53. – М.: Транспорт, 1965. – 48 с.

Надійшла до редколегії 5.01.2010

**Рецензент:** канд. техн. наук, доцент В.В. Шевченко, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.

## АНАЛИЗ И РАСЧЕТЫ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ю.А. Ясинский, П.В. Васюченко, Д.И. Гришин

*Факторы, которые определяют надежную работу электродвигателей постоянного тока в период их эксплуатации, практически можно подразделить на две группы. К первой из них относится конструкционная надежность машин, а ко второй – условия эксплуатации. Одна из основных причин выхода из строя электродвигателей есть неэффективность методов анализа и расчетов эксплуатационной надежности электродвигателей постоянного тока, которые рассматриваются в литературе без достаточной детальности. Для количественной оценки показателей надежности электродвигателей предложен ряд статистических критериев. Рассмотренная методика оценки надежности электрощеток основана на использовании статистических данных испытания на надежность достоверной выборки электрощеток. Вероятность безотказной работы, или надежность, коллекторно-щеточного узла  $R_{ш.в}(t)$  практически можно определить через вероятность безотказной работы щеточного аппарата  $R_{щ.а}(t)$ .*

**Ключевые слова:** электродвигатель постоянного тока, коллекторно-щеточный узел, надежность, анализ, расчет.

## THE ANALYSIS AND CALCULATIONS OF RELIABILITY ELECTRIC MOTORS OF THE DIRECT CURRENT

J.A. Yasinsky, P.V. Vasjuchenko, D.I. Grishin

*Factors which determine reliable work of electric motors of direct-current in the period of their exploitation, it is practically possible to subdivide into two groups. Construction reliability of machines behaves to first from them, and to the second are external environments. One of principal reasons of death of electric motors is uneffectiveness of methods of analysis and calculations of operating reliability of electric motors of direct-current, which are examined in literature without sufficient detailed. For the quantitative estimation of reliability of electric motors indexes the row of statistical criteria is offered. The considered method of estimation of reliability of electro-brushes is based on the use of statistical information of reliability test of selection of electro-brushes by a volume. Probability of faultless work, or reliability, collector-brush knot of  $R_{sh.v}(t)$  it is practically possible to define through probability of faultless work of a brush vehicle of  $R_{shch.a}(t)$ .*

**Keywords:** electric motor of direct-current, collector-brush knot, reliability, analysis, calculation.