

УДК 681.518.54 : 621.313.13

РАЗГОНОВ А. П., д.т.н. проф. (ДІТ);  
КАПЦА М.І., д.т.н. проф. (ДІТ);  
ЛЕБЕДЄВ О.Ю., аспірант (ДІТ);  
ЖУРАВЛІОВ А.Ю., асистент (ДІТ).

## Комп'ютерне діагностування стрілочних та тягових електродвигунів за допомогою частотних методів

### Вступ

З кожним роком до залізничного транспорту ставляться усе більш високі вимоги по безпеці руху й надійності функціонування. Підвищуються швидкості руху поїздів, вводяться в експлуатацію швидкісні поїзди (Київ-Харків, Київ-Дніпропетровськ та ін. з використанням трифазних електричних машин) і кожна затримка поїзда на перегоні або на станції призводить до значної зміни графіка руху поїздів і зниженню добової пропускної спроможності дороги.

У зв'язку із цим, пошук й усунення несправностей у системах залізничної автоматики в тому числі і електрообладнанні локомотивів є достатньо тривалим процесом. У світлі всього вище сказаного, стає очевидним необхідність створення систем автоматизованого технічного діагностування і контролю, що прискорить пошук відмов, а також допоможе не тільки виявляти, але й заздалегідь прогнозувати можливі відмови.

Відомо, що обмотки електричних машин відносяться до двопровідних довгих ліній. Первинні параметри пасивних схем заміщення лінії ( $R$ ,  $L$ ,  $C$  і  $G$ ), віднесені до одиниці довжини обмоток, використовуються при виборі структури Т- і П-подібних схем заміщення. Для нескінченно малого елемента лінії схеми заміщення, що включає первинні параметри, складаються вирази в диференціальній формі для розподілення вздовж лінії напруг  $\underline{U}(x) = \underline{U}$  і струмів  $\underline{I}(x) = \underline{I}$  джерела гармонійного сигналу.

Використовуючи ці вирази отримують рівняння типу Гельмгольца [1]:

$$\begin{aligned} d^2 \underline{U} / dx^2 - \underline{\gamma}^2 \underline{U} &= 0; \\ d^2 \underline{I} / dx^2 - \underline{\gamma}^2 \underline{I} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\underline{\gamma}$  – коефіцієнт поширення лінії. Загальні і приватні рішення рівняння (1) після перетворень для стаціонарного режиму процесів, що протікають в лінії, можна звести до рівнянь передачі чотириполюсника виду:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cosh \underline{\gamma} l + \underline{Z}_c \underline{I}_2 \sinh \underline{\gamma} l; \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_c} \sinh \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \cosh \underline{\gamma} l, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\underline{U}_1$ ,  $\underline{I}_1$  – напруга і струм на початку лінії,  $\underline{Z}_c$  – характеристичний опір лінії.

### Постановка задачі

З досвіду експлуатації встановлено, що термін служби електричних машин (електрогенераторів, електродвигунів) істотно залежить від стану діелектрика електроізоляційної конструкції обмоток. В свою чергу, якість ізоляції згодом погіршується за рахунок зміни макронеоднорідності діелектрика (розтріскування, насичення вологою та ін.). Тому за ступенем втрати макронеоднорідності можна судити про динаміку зміни електричної ізоляції обмоток.

Отримані в роботі [2] результати оцінки зміни параметрів елементів еквівалентної схеми заміщення діелектрика тя-

гових машин показали, що як критерій ступеню зміни неоднорідності ізоляції діелектрика може служити величина його сумарної ємності, обумовлена геометрією діелектрика, абсорбційною ємністю й опором, зв'язаним, в свою чергу, з явищем абсорбції неоднорідностей. Виявилося, що величини цих параметрів прямо залежать від стану ізоляції діелектрика. Крім того, у згаданій роботі було запропоновано так званий імпульсний метод визначення сумарної ємності.

До недоліків такого методу діагностики варто віднести технічні труднощі, що вимагають спеціальної порівняно рідкої й складної апаратури виміру даних, що пов'язано з підвищенням вірогідності оцінки малих ємностей (нФ, пФ) діелектриків і опорів обмоток.

### Мета роботи

Розробка частотних методів діагностування стану стрілочних та тягових електродвигунів та їх застосування для побудови комп'ютерного комплексу діагностування.

В роботі розглянуто пропонуємий частотний метод оцінки часу старіння ізоляції електричних машин за ємністю діелектрика, що заміняє згаданий вище імпульсний метод обчислювальними методами із застосуванням сучасної високоточної вимірювальної техніки (цифрових амперметрів, вольтметрів, АЦП та ін.).

Частотні характеристики (ЧХ) кіл з розподіленими параметрами (КРП) визначають звичайно за залежністю вхідних опорів від частоти:

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = Z_{\text{вх}} \cdot e^{j\varphi_{\text{вх}}} \quad Z(j\omega). \quad (3)$$

Рівняння для опору розписуються за двома складовими АЧХ і ФЧХ:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{вх}} &= \text{mod} \underline{Z}_{\text{вх}} \quad Z(\omega); \\ \varphi_{\text{вх}} &= \arg \underline{Z}_{\text{вх}} \quad \varphi(\omega). \end{aligned} \quad (4)$$

Звичайно ЧХ КРП досліджують у граничних режимах – ХХ і КЗ [3]:

$$\begin{aligned} Z_{\text{х}} &= Z_{\text{х}}(\omega); & \varphi_{\text{х}} &= \varphi_{\text{х}}(\omega); \\ Z_{\text{к}} &= Z_{\text{к}}(\omega); & \varphi_{\text{к}} &= \varphi_{\text{к}}(\omega). \end{aligned} \quad (5)$$

АЧХ – носій важливої інформації про властивості й параметри кіл, які вона відображає. По виду АЧХ судять про характер вхідного опору – індуктивний або ємнісний. Встановлено, що  $\underline{Z}_{\text{вх}}$  обмоток електричних машин, як правило, має ємнісний характер у режимі ХХ й індуктивний – КЗ, якщо в колі ще не виникли резонансні явища. Екстремуми  $\underline{Z}_{\text{вх}}$  відповідають резонансу струму (РС), а мінімуми – резонансу напруги (РН). Число резонансів може бути біля 3, оскільки з ростом частоти схема переходить із коливального режиму в аперіодичний – спостерігається зростання активного опору  $r_{\text{акт}}$ , що порозумівається властивістю власних чисел. Частотну характеристику можна використати для обчислення первинних і вторинних параметрів КРП. Ці параметри можна знаходити, використовуючи одну точку на АЧХ. Але краще брати ряд точок, оскільки обмотки електромашин мають параметри залежні від частоти.

Методи побудови АЧХ будуються на вимірі комплексних опорів  $Z(\omega)$ , при цьому відзначимо, що довгі лінії обмоток електродвигуна з П- і Т-ланками ставляться до так названих мінімально-фазових ланок [4]. Ознаками їх служить розташування всіх нулів передатної функції в лівій напівплощині  $p = -\delta + j\omega$ .

Для таких кіл існує взаємна й однозначна комплексна відповідність між їх АЧХ і ФЧХ. Наприклад, комплексна передатна функція однорідної ланцюгової схеми (ОЛС) визначається по відношенню напруги  $K_u$  або току  $K_i$ :

$$\frac{K_u}{K_i} = \frac{U_2 I_1}{U_1 I_2} = \frac{Z_2}{Z_{ex}},$$

$$\text{звідки } Z_{ex} = \frac{K_i}{K_u} Z_2. \quad (6)$$

Складна комплексна функція частоти:

$$Z_{ex} = Z_{ex} \cdot e^{j\varphi_{ex}} = r(\omega) + jx(\omega), \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{де } \operatorname{Re}[Z_{ex}] &= r(\omega) = Z_{ex} \cdot \cos \varphi_{ex}; \\ \operatorname{Im}[Z_{ex}] &= x(\omega) = Z_{ex} \cdot \sin \varphi_{ex}. \end{aligned}$$

Властивості ЧХ КРП електродвигунів вивчені мало: іноді спостерігаються різні швидкості зміни фази при переході через резонансні точки; не відомий, зокрема, зв'язок екстремумів ФЧХ із загальними властивостями кола й ін [1].

### Обчислення вторинних параметрів

Метод припускає, що відомі АЧХ і ФЧХ у деякому діапазоні частот. Тоді модуль й аргумент характеристичного опору:

$$\begin{aligned} Z_c &= \sqrt{Z_x Z_k}, \quad \varphi_c = \frac{1}{2}(\varphi_x + \varphi_k), \\ \text{де } -\frac{\pi}{2} &\leq \varphi_c \leq \frac{\pi}{2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Знаючи коефіцієнт поширення запишемо:

$$\begin{aligned} \operatorname{th} \gamma l &= T e^{j\theta}, \quad T = \sqrt{\frac{Z_k}{Z_x}}, \\ \theta &= \frac{1}{2}(\varphi_k - \varphi_x). \end{aligned} \quad (9)$$

Виявляється, що для обмоток електричних машин, електродвигунів звичайно  $T \leq 1$ , для  $\arg \theta$  обмежень немає. Відомо:

$$\operatorname{th} 2\alpha l = \frac{2T \cos \theta}{1 + T^2}, \quad \operatorname{th} 2\beta l = \frac{2T \sin \theta}{1 - T^2} \quad (10)$$

З (10) одержуємо значення параметра  $2\beta l$ , що у силу періодичності функції тангенса, повинно відповідати умові  $2\beta l = 2\frac{\omega}{c}l$  (Нп/км), де  $c = \frac{\omega}{\beta}$  – фазова швидкість,  $l$  – довжина дроту фазової обмотки статора. Якщо виявиться, що  $2\beta l = 2\beta^* l + n\pi$ , звідки  $n = \frac{2\beta l - 2\beta^* l}{\pi}$  – число півкіл, яке слід додати до найменшої величини кута  $2\beta^* l$ , щоб точно визначити величину кута  $\beta$  – визначаємо з (10). Кут  $\beta$  можна приблизно оцінити по формулі  $\beta \approx \omega \sqrt{LC}$ .

Таким чином, по модулях й аргументах вхідних опорів  $Z_x$  й  $Z_k$  можна визначити вторинні параметри обмоток.

На рис. 1 приведена електрична схема для виміру опорів  $Z_x$  і  $Z_k$  і визначення вторинних параметрів обмоток статора електродвигуна електровозу постійного струму, котрий було досліджено нами в лабораторних умовах.

Параметри двигуна, що досліджувався, наступні: потужність  $P = 305$  кВт, напруга на статорі 463 В, швидкість обертання ротору 2290 об/хв, частота живлення схеми випробувань 50...200.000 Гц і довжина обмотки 210 м. Електрична схема для побудови АЧХ-ФЧХ і виміру параметрів  $Z_x$  й  $Z_k$  містить вимірювальні прилади – амперметр, вольтметр, АЦП і фазометр на базі МК, типу Е20-10, а також генератор частоти типу ГЗ-103.

Експериментально отриманні АЧХ для режимів КЗ і ХХ опитного двигуна зображені на рис. 2.

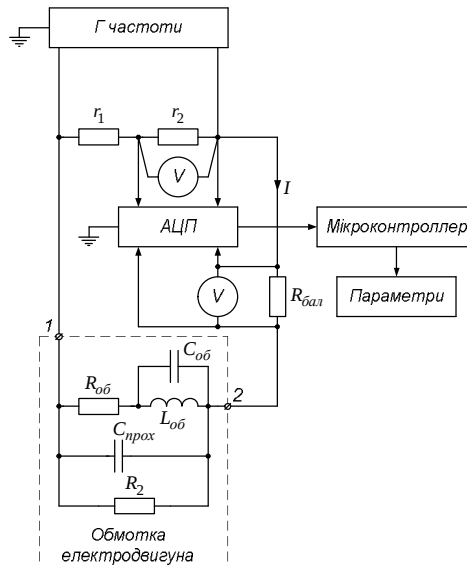


Рис. 1. Електрична схема для виміру параметрів  $Z_x$  і  $Z_k$  і побудови АЧХ і ФЧХ електродвигуна

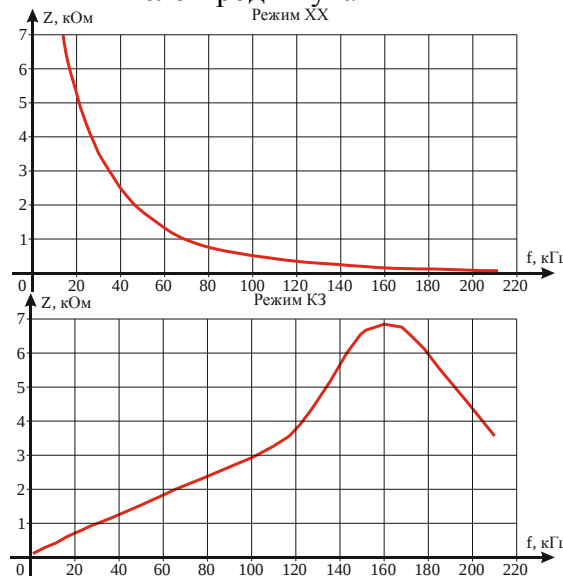


Рис. 2. АЧХ обмоток електродвигуна у режимах ХХ і КЗ

Знайдені в режимі ХХ – опір  $Z_x = 210 \text{ Ом}$  і його аргумент  $\varphi_x = -15^\circ$ ;

в режимі КЗ – опір  $Z_k = 6809 \text{ Ом}$  і його аргумент  $\varphi_k = 21^\circ$ .

Використовуючи ці данні опиту одержимо наступне значення характеристичного опору лінії:

$$Z_c = \sqrt{Z_x Z_k} = 119,141 + j62,582.$$

Тоді гіперболічний тангенс постійної передачі буде мати таке значення:

$$\text{th}\gamma l = \sqrt{\frac{Z_k}{Z_x}} = 5,415 + j1,76.$$

Тепер ми маємо змогу визначити постійну передачі лінії:

$$\gamma l = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1 + \text{th}\gamma l}{1 - \text{th}\gamma l} \right) + j \frac{1}{2} \left( \arg \left( \frac{1 + \text{th}\gamma l}{1 - \text{th}\gamma l} \right) \right) = 0,168 + j3,03$$

Знаючи, що  $\gamma l = \alpha l + j\beta l$  далі легко знаходиться коефіцієнти загасання і фази:

$$\alpha = \frac{1}{2l} \ln \left| \frac{1 + th\gamma l}{1 - th\gamma l} \right| = 0,0008, \\ \beta = \frac{1}{2l} \left( \arg \left( \frac{1 + th\gamma l}{1 - th\gamma l} \right) \right) = 0,0144.$$

За результатами виміру хвильових параметрів лінії можна обчислити також значення її первинних параметрів. Для цього слід прирівняти дійсну і мниму частини рівностей  $R + j\omega L = \gamma Z_c$  та  $G + j\omega C = \frac{\gamma}{Z_c}$ , звідки і знаходяться параметри  $R, L, C$  і  $G$  [5]. Тож для обмоток даного електродвигуна були розраховані наступні первинні параметри:

$$R = 52,7 \text{ мОм} \quad L = 1,72 \text{ мкГн} \\ G = 1,3 \text{ мкСм} \quad C = 11,95 \text{ пФ}$$

Отримані таким чином значення первинних параметрів при подальших профілактичних вимірах через  $\tau_{np}$  можуть порівнюватись зі знову виміряними величинами, що дозволить оцінювати динаміку їх зміни і прогнозувати періодичність проведення профілактик в значній мірі підвищуючи експлуатаційну надійність електричних машин.

За значеннями АЧХ та ФЧХ об'єктів профілактики можна методом синтезу побудувати електричні схеми заміщення однорідної ланцюгової схеми (ОЛС) з Т- або П-ланками і утворюючими похибку пристроїв діагностики електричних машин. Це дозволить докладніше досліджувати інші параметри схеми ОЛС (вхідний опір при інших, окрім канонічних, формах запису виразів, уточнити раціональний зв'язок між параметрами ланок схеми заміщення, резонансні властивості та ін.) та оцінити похибку пристроїв діагностики електричних машин.

Дослідження показали, що існує реальна можливість розробки мобільного

автоматизованого цифрового діагностичного пристрою, що дозволить провести виміри параметрів обмоток електричних машин в умовах локомотивних депо або ремонтно-технологічних дільниць дистанції сигналізації та зв'язку, що дозволить визначити параметри нової стратегії обслуговування електричних машин.

## Висновки

В роботі було проведено аналіз існуючих методів оцінки параметрів обмоток електричних двигунів, зокрема величини її сумарної ємності, що служить як критерій ступеню зміни неоднорідності ізоляції діелектрика. В результаті аналізу і сутності пропонуємого частотного методу було розроблено електричну схему для виміру параметрів опорів холостого ходу і короткого замикання. В ході лабораторних досліджень були виміряні і побудовані амплітудо-частотні характеристики для електродвигуна у режимах холостого ходу та короткого замикання. За результатами цих вимірів і відомою методикою було проведено визначення хвильових параметрів обмотки електричного двигуна, що досліджується. За визначеними хвильовими параметрами проведено розрахунок первинних параметрів ( $R, L, C$  і  $G$ ) обмоток електродвигуна, що характеризують стан ізоляції цих обмоток. Тобто, знаючи ці параметри, можна судити про динаміку зміни електричної ізоляції обмоток а отже і про ймовірний час відмови двигуна [6]. Це дає змогу планувати і проводити вчасно профілактичні роботи і уникати затримок поїздів, що впливають на зміну їх графіку руху.

## Список літератури

1. Каганов, З. Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы [Текст] / З. Г. Каганов // М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
2. Боднар, Б.Є. Сучасні методи контролю поточкового стану ізоляції

тягових електричних машин локомотивів [Текст] / Б.Є. Боднар, М.І. Капіца // Залізничний транспорт України. – 2006. – № 2. – С. 22-26.

3. Полехин, С. И. Теория связи по проводам [Текст] / С. И. Полехин // М.: Связьиздат, 1960. – 464 с.

4. Инкин, А. И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин. [Текст]: учеб. пособие / А. И. Инкин. – Новосибирск: ООО «Издательство ЮКЭА», 2002. – 464 с.

5. Белецкий, А. Ф. Основы теории линейных электрических цепей [Текст] / А. Ф. Белецкий // М.: Связь, 1967. – 608 с.

6. Діагностування електричних машин частотним методом [Текст] / А. П. Разгонов та ін. // Матеріали IV Міжнародної науково – практичної конференції «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті». – Д.: Видво Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011. – С. 67-68.

#### **Анотації:**

В статті проведено огляд існуючих методів оцінки стану ізоляції електричних машин, виявлено їх основні недоліки та переваги. На основі запропонованого частотного методу для їх діагностування побудована розрахункова електрична схема для визначення амплітудно-частотних характеристик обмоток у режимах холостого ходу і короткого замикання. Для обраного тягового двигуна

зняті характеристики, визначенні хвильові параметри лінії, за котрими розраховані первинні параметри обмоток.

**Ключові слова:** електродвигун, коло з розподіленими параметрами, амплітудно-частотна характеристика, хвильові та первинні параметри обмоток.

---

В статье проведен обзор существующих методов оценки состояния изоляции электрических машин, выявлены их основные недостатки и преимущества. На основе предложенного частотного метода для их диагностирования построена расчетная электрическая схема для определения амплитудно-частотных характеристик обмоток в режимах холостого хода и короткого замыкания. Для выбранного тягового двигателя сняты характеристики, определены волновые параметры линии, по которым рассчитаны первичные параметры обмоток.

**Ключевые слова:** электродвигатель, цепь с распределенными параметрами, амплитудно-частотная характеристика, волновые и первичные параметры обмоток.

---

The existent methods estimating the state of electric machines insulation have been reviewed in article, the main advantages and disadvantages have been reviewed. The calculation electric scheme based on offered frequency method has been made to determine winding's amplitude-frequency characteristics in idling and short circuit conditions. The characteristics of chosen propulsion engine have been taken, wave characteristics of line have been determined, primary winding characteristics have been calculated.

**Key words:** engine, line with distributed characteristics, amplitude-frequency characteristic, wave and primary winding characteristics.