

ОЦІНКА СТАТИЧНИХ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ДОБРОТНОСТІ

Кучерук В.Ю., Поджаренко В.О., Кухарчук В.В.

Вінницький державний технічний університет

Електричні машини (ЕМ) - складні системи, що складаються з електромагнітної системи, механічної системи і системи обмоток. Якість ЕМ визначається в основному якістю обмоток [1]. Судячи з результатів статистичних досліджень причин виходу з ладу ЕМ [1], більшість відмов у функціонуванні ще нових обмоток відбувається через своєчасно не виявлені дефекти. Відмови по вузлах ЕМ розподіляються таким чином: 50-95% відмов відбувається через ушкодження обмотки статора (пробій міжвиткової ізоляції); підшипники 10-40%; інші вузли і деталі 5-10%.

Обмотки ЕМ виготовлюються на високо механізованому чи автоматизованому обладнанні. Висока швидкість обробки проводів обмотки і часта наступна деформація обмотки ведуть до великого навантаження ізоляції. Таким чином, найбільш характерним видом браку є наявність короткозамкнених витків в обмотках. У зв'язку з цим велику практичну цінність представляють методи технічної діагностики та вимірювання параметрів обмоток.

В [2, 3] запропонований високочутливий фазовий метод вимірювання добротності котушок індуктивності, в якому використовується схема вимірювального перетворювача (рис. 1), що містить такі

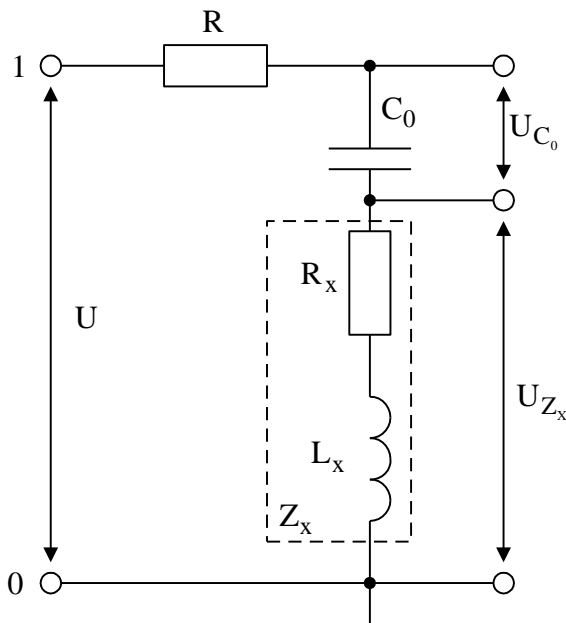


Рис. 1. Схема вимірювального перетворювача добротності

елементи: R – розділювальний резистор; C_0 – зразковий конденсатор; Z_x – комплексний опір досліджуваної котушки; R_x , L_x - активний опір і індуктивність досліджуваної котушки відповідно.

Рівняння вимірювального перетворення добротності Q для даного методу має вигляд:

$$Q = \operatorname{ctg}(\varphi_x). \quad (1)$$

Вимірюючи фазовий зсув φ_x між напругами \dot{U}_{C_0} та \dot{U}_{Z_x} , можна визначити добротність котушки індуктивності, а отже, і добротність Q обмотки ЕМ. На рис. 2 зображена статична характеристика вимірювального перетворювача добротності, а на рис. 3 – функція чутливості цієї характеристики до зміни добротності. Аналіз показує, що такий метод найбільш ефективний для вимірювання добротності в межах $Q \in [0.1..15]$ при частоті генератора 50 Гц, у яких знаходяться і номінальні значення добротностей обмоток ЕМ.

Отримана статична характеристика нелінійна, а функція перетворення (1) є

вихідною для отримання аналітичних залежностей для оцінки таких статичних метрологічних характеристик: номінальна функція перетворення; чутливість; похибка нелінійності; адитивна і мультиплікативні складові похибок.

На основі проведених досліджень можна сформулювати узагальнену структурну схему (рис. 4), у якій реалізовано вимірювання зсуву фаз двох напруг методом зіставлення. Цифрові фазометри зіставлення вимірюють зсув фаз за значенням проміжку часу між моментами проходження відповідних фронтів синусоїд через нульові значення (перетворення фази в інтервал часу). Формувачі керуючих імпульсів F1 та F2 у моменти проходження миттєвих значень напруг через нульові значення генерують керуючі імпульси, які відкривають ключ SW на час t_x , пропорційний вимірюваному зсуву фаз φ_x . Цей проміжок часу вимірюється заповненням t_x імпульсами, що квантуються, від генератора імпульсів G частотою f_0 , число яких зчитується двійковим лічильником СТ2. Тоді залежність $\varphi_x = f(t_x)$ визначиться

$$\varphi_x = \varphi_1 - \varphi_2 = \omega t_1 - \omega t_2 = 2\pi f_0 t_x, \quad (2)$$

де f_q – частота вхідної напруги генератора G.

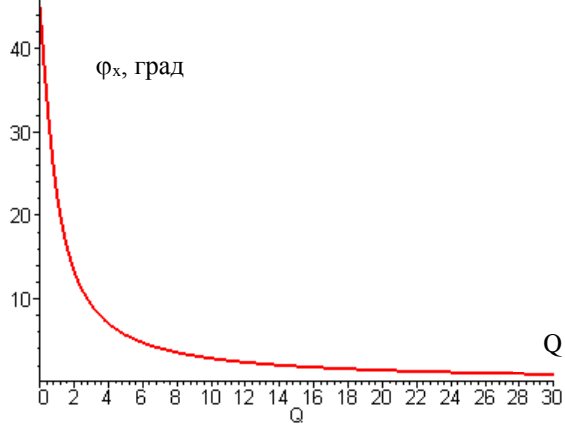


Рис. 2. Статична характеристика вимірювального перетворювача Q

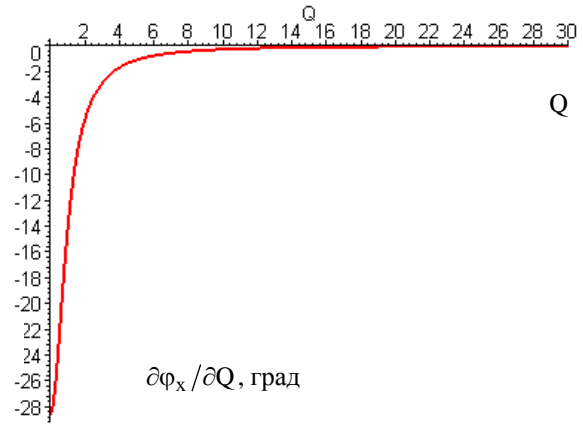


Рис. 3. Функція чутливості статичної характеристики вимірювального перетворювача до зміни Q

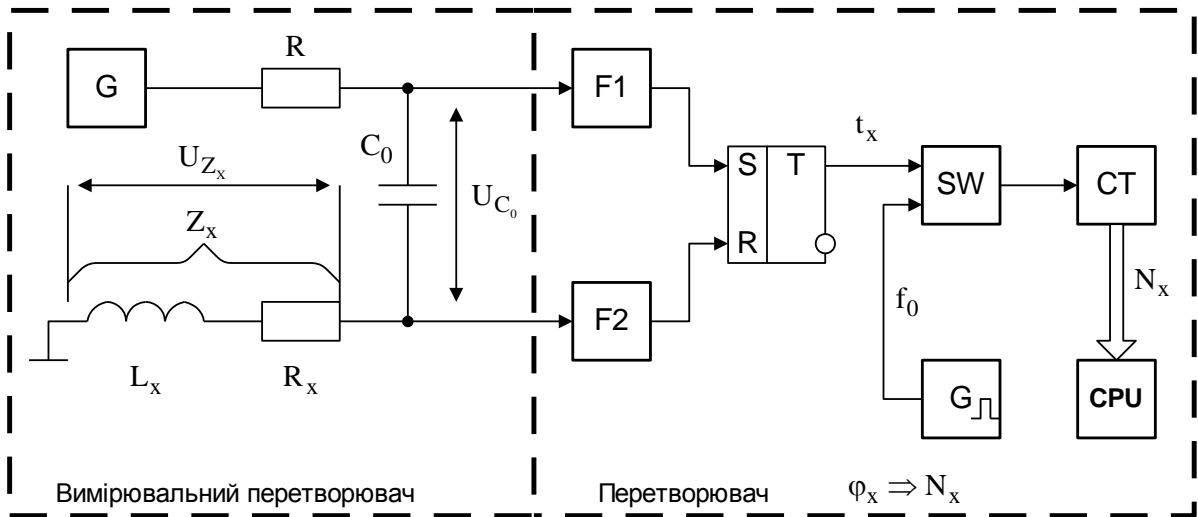


Рис. 4. Узагальнена структурна схема засобу вимірювання добротності

Тривалість часового проміжку t_x , пропорційного φ_x , визначиться:

$$t_x = \frac{\varphi_x}{2\pi f_q} = \frac{\arctg(Q)}{2\pi f_q}. \quad (3)$$

Кількість імпульсів на виході двійкового лічильника СТ2 рівна

$$N_x = \frac{t_x}{T_0} = t_x f_0 = \frac{f_0}{2\pi f_q} \arctg(Q). \quad (4)$$

Рівняння (4) є загальним рівнянням перетворення засобу вимірювання добротності.

На рис. 5 зображено сімейство статичних характеристик засобу вимірювання добротності при різних значеннях квантуючої частоти f_0 при $f_q=50$ Гц.

Функція чутливості статичної характеристики (4) виражається формулою

$$S = -\frac{1}{1+Q^2} \frac{f_0}{2\pi f_q}. \quad (5)$$

Поверхня $S(Q, f_0)$ функцій чутливості (5) наведена на рис. 6.

Теорія формалізованого визначення статичних метрологічних характеристик знаходиться у стадії розвитку. Як математичний апарат дослідження статичних метрологічних характеристик вимірювального перетворення добротності пропонується використати [4] розклад функції перетворення в ряд Тейлора. В даній роботі пропонується подальший розвиток теорії розкладання функції перетворення у ряд Тейлора для отримання аналітичних залежностей основних статичних метрологічних характеристик вимірювального каналу добротності.

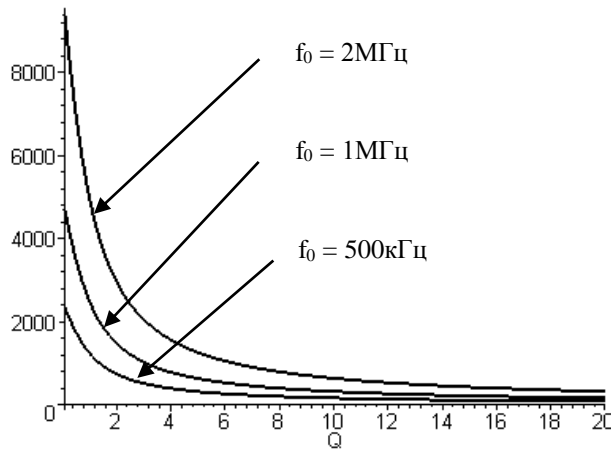


Рис. 5. Сімейство статичних характеристик засобу вимірювання добротності

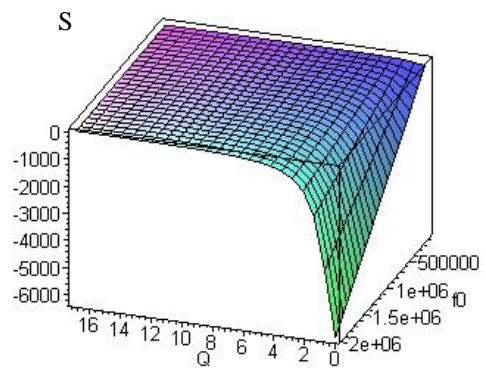


Рис. 6. Поверхня $S(Q, f_0)$ функцій чутливості

В загальному випадку вимірювальний канал добротності, на який діє відхилення Δf зовнішньої величини f від її значення в нормальних умовах, описується аналітичною функцією перетворення

$$y = y(x, \Delta f). \quad (6)$$

Аналітичні залежності для визначення основних статичних метрологічних характеристик із використанням [4] представлені в табл. 1.

Табл. 1. Аналітичні залежності для визначення основних статичних метрологічних характеристик

№	Найменування	Аналітична залежність	№ ф-ли
1.	Номінальний коефіцієнт перетворення або чутливість вимірювального перетворення Q	$\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_0 = S_0$	(7)
2.	Зміна чутливості по діапазону перетворення x	$\frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right)_0 = S_0''$ і $\frac{1}{6}\left(\frac{\partial^3 y}{\partial x^3}\right)_0 = S_0'''$	(8)
3.	Коефіцієнти впливу зовнішньої величини f на вихідний параметр вимірювального перетворення y	$\left(\frac{\partial y}{\partial f}\right)_0 = \beta_0$ і $\frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 y}{\partial f^2}\right)_0 = \beta_0'$	(9)
4.	Коефіцієнт впливу зовнішньої величини f на номінальну чутливість S_0 вимірювального перетворення Q	$\left(\frac{\partial^2 x}{\partial x \partial f}\right)_0 = \alpha_0$	(10)
5.	Номінальна функція перетворення	$y = S_0 x + S_0'' x^2 + S_0''' x^3 + \dots$	(11)
6.	Абсолютна похибка нелінійності номінальної функції перетворення	$S_0'' x^2 + S_0''' x^3 = \Delta y_H$	(12)
7.	Відносна похибка нелінійності номінальної функції перетворення	$\delta_H = \frac{\Delta y_H}{S_0 x} = \frac{S_0''}{S_0} x + \frac{S_0'''}{S_0} x^2$	(13)
8.	Мультиплікативна похибка	$\alpha_0 x \Delta f = \Delta y_M$	(14)
9.	Адитивна похибка	$\beta_0 \Delta f + \beta_0' \Delta f^2 = \Delta y_A$	(15)

В робочих умовах вимірювальний канал добротності здійснює функціональне перетворення інформативного параметра Q у бінарний код N_x . Крім інформативного сигналу, на такий засіб вимірювання діють впливні величини $\bar{f} = (f_0, f_Q)$, які мають зв'язок з вихідною величиною N_x і спричиняють виникнення неінформативних складових перетворення. В цьому випадку вимірювальний канал добротності можна представити як на рис. 7.

Розкладемо в ряд Тейлора функцію перетворення (4) вимірювального каналу добротності:

1) чутливість

$$S_Q = \frac{\partial N_X}{\partial Q} = -\frac{f_0}{2\pi f_q} \frac{1}{(1+Q^2)}; \quad (12)$$

2) зміна чутливості по діапазону

$$S'_Q = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 N_X}{\partial Q^2} = \frac{f_0}{2\pi f_q} \frac{Q}{(1+Q^2)^2},$$

$$S''_Q = \frac{1}{6} \frac{\partial^3 N_X}{\partial Q^3} = -\frac{f_0}{2\pi f_q} \frac{3Q^2-1}{(1+Q^2)^3}; \quad (13)$$

3) коефіцієнти впливу зовнішніх величин на вихідний параметр N_X :

$$\beta_{0f_0} = \frac{\partial N_X}{\partial f_0} = \frac{1}{2\pi f_q} \operatorname{arccctg}(Q), \quad \beta_{0I_M} = \frac{\partial^2 N_X}{\partial I_M^2} = 0; \quad (14)$$

$$\beta_{0f_q} = \frac{\partial N_X}{\partial f_q} = -\frac{f_0}{2\pi f_q^2} \operatorname{arccctg}(Q), \quad \beta_{0f_q^2} = \frac{\partial^2 N_X}{\partial f_q^2} = \frac{f_0}{\pi f_q^3} \operatorname{arccctg}(Q).$$

4) коефіцієнти впливу зовнішніх величин на номінальну чутливість S_0 вимірювального перетворення:

$$\alpha_{0f_0} = \frac{\partial^2 N_X}{\partial Q \partial f_0} = -\frac{1}{2\pi f_q} \frac{1}{1+Q^2}; \quad \alpha_{0f_q} = \frac{\partial^2 N_X}{\partial Q \partial f_q} = \frac{f_0}{2\pi f_q^2} \frac{1}{1+Q^2}. \quad (15)$$

Враховавши (12)-(15), номінальну функцію перетворення представимо у вигляді:

$$N_X = S_0 Q + \alpha_{0f_0} Q \Delta f_0 + \alpha_{0f_q} Q \Delta f_q + \beta_{0f_0} \Delta f_0 + \beta_{0f_q} \Delta f_q + \beta'_{0f_0} \Delta f_0^2 + \beta'_{0f_q} \Delta f_q^2 \quad (16)$$

Абсолютна ΔN_H та відносна δ_H похибки нелінійності запишуться

$$\Delta N_H = -\frac{f_0}{2\pi f_q} \frac{(Q-Q_H)(1+Q \cdot Q_H)}{(1+Q^2)^2}; \quad \delta_H = -\frac{1+Q \cdot Q_H}{(1+Q^2)^2 \operatorname{arccctg}(Q)}. \quad (17)$$

Аддитивна похибка матиме вигляд

$$\Delta N_a = \frac{\operatorname{arccctg}(Q)}{2\pi f_q^2} \left[2f_q^2 f_0 - f_q^2 f_{0H} - 3f_0 f_q f_{qH} + 2f_0 f_{qH} \right], \quad (18)$$

а мультиплікативну похибку вимірювального каналу добротності представимо такою аналітичною залежністю

$$\Delta N_M = -\frac{1}{2\pi f_q^2} \frac{Q-Q_H}{1+Q^2} \left[f_0 f_{qH} - f_q f_{0H} \right]. \quad (19)$$

Результати моделювання похибок наведені на рис. 8-13.

Висновки:

1. Виведено функцію перетворення вимірювального каналу добротності. В результаті математичного моделювання показано, що статична характеристика даного вимірювального каналу нелінійна.

2. Застосувавши розкладання функції перетворення вимірювального каналу добротності в ряд Тейлора, отримано аналітичні залежності для оцінки основних статичних метрологічних характеристик (номінальна функція перетворення, чутливість, адитивна і мультиплікативна складові похибок).

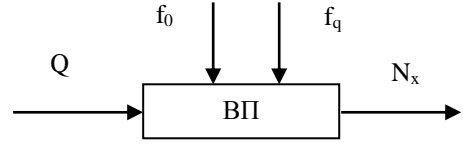


Рис. 7. Узагальнена структурна схема вимірювального каналу добротності

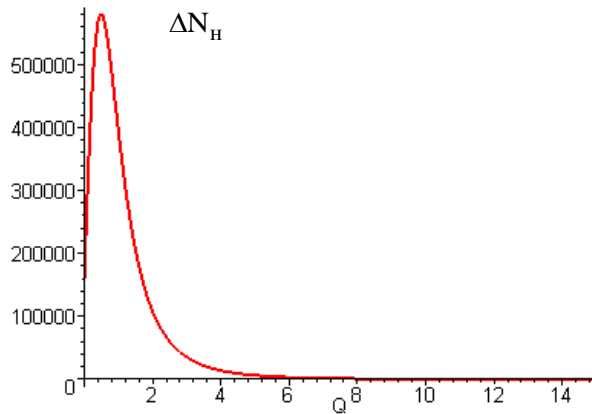


Рис. 8. Абсолютна похибка нелінійності вимірювального перетворення добротності

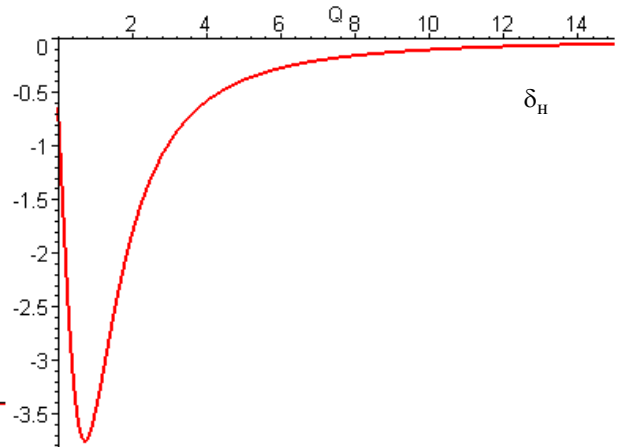


Рис. 9. Відносна похибка нелінійності вимірювального перетворення добротності

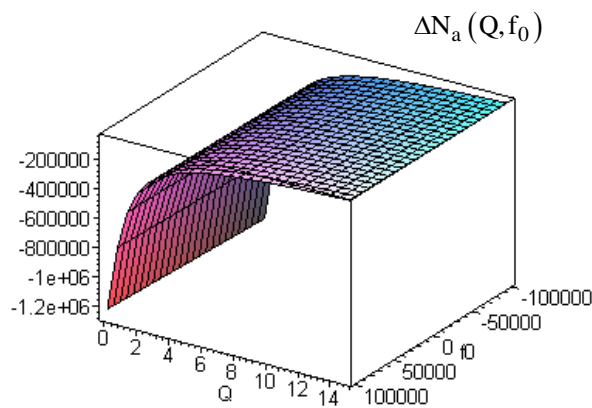


Рис. 10. Адитивна похибка $\Delta N_a(Q, f_0)$

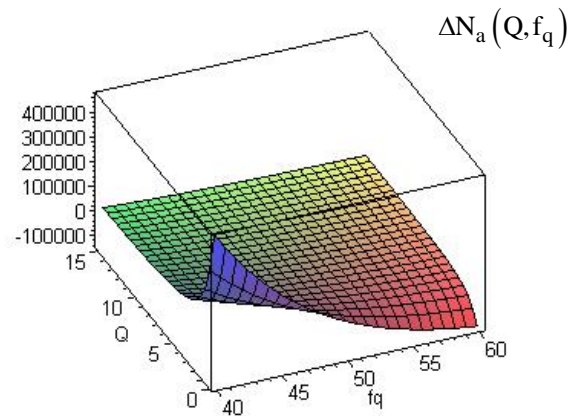


Рис. 11. Адитивна похибка $\Delta N_a(Q, f_q)$

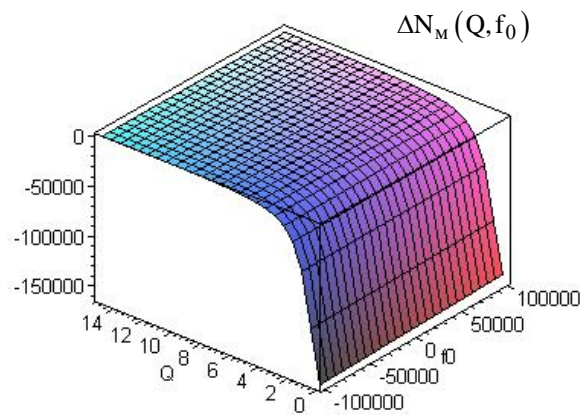


Рис. 12. Мультиплікативна похибка $\Delta N_M(Q, f_0)$

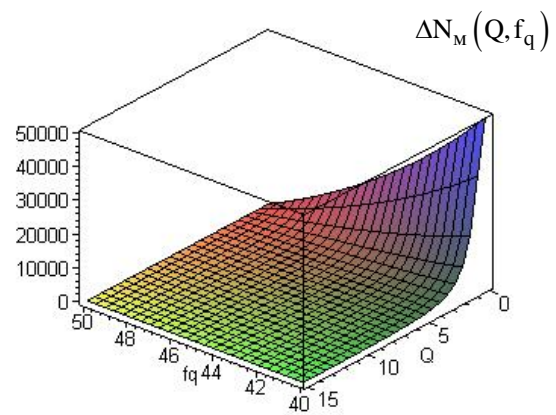


Рис. 13. Мультиплікативна похибка $\Delta N_M(Q, f_q)$

Література

1. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. -Л.: Энергия, 1976.
2. Джарадат Р.Х., Поджаренко В.О., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю. Фазовий метод мікропроцесорного вимірювання добротності електричних машин.// Вимірювальна техніка та метрологія, Львів, Випуск 51, 1995, с.19-21.
3. Патент України на винахід №23637А, G 01 R 27/26, G 01 R 27/02. Спосіб вимірювання добротності котушок індуктивності.// Куцевол М.О., Поджаренко В.О., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю.-96124526; заявл. 03.12.96, опубл. 31.08.98, бюл. №4.-3с.
4. Воловик Г. С. Основы теории инвариантных измерений.-Севастополь: "Севпол", 1995 – 160 с.

УДК 621.317

Оцінка статичних метрологічних характеристик вимірювального перетворення добротності/ Кучерук В.Ю., Поджаренко В.О., Кухарчук В.В.// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.-2001.-№ .-С.

Розглянуто принципи побудови вимірювальних каналів добротності. Отримано аналітичні залежності для оцінки основних статичних метрологічних характеристик вимірювального каналу добротності за допомогою розкладання функції перетворення в ряд Тейлора.

Estimation of the static metrology characteristics of measuring conversion of a quality-factor/ V.Yu.Kucheruk, V.O.Podzharenko, V.V.Kuharchuk // МСТП. -2001. -№. -Р.

The principles of construction of counting channels of a quality-factor are considered. The analytical dependencies for main static metrological characteristics evaluation of quality-factor measuring channel are got by the expansion of the transformation function in Taylor's series.