

# АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 621.313.322

В. О. Поджаренко, д. т. н., проф.; В. Ю. Кучерук, к. т. н., доц.;  
О. П. Войтович, асп.

## КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ ПІД ЧАС ЇХ ВИПРОБОВУВАНЬ

Зростають вимоги до якості електромоторів (ЕМ) вимагають вдосконалення методів і засобів їх контролю. Тому ефективний контроль показників якості електродвигунів в процесі їх випробовувань є актуальною проблемою сучасного машинобудування.

В нинішній час багато публікацій присвячено оцінюванню показників якості під час проектування ЕМ, проте питанню загальної оцінки якості під час їх випробовування приділяється мало уваги.

Крім таких досить важливих показників якості, як показники надійності, стандарти на ЕМ передбачають показники, які умовно називають номінальними. Наприклад для асинхронного двигуна номінальними параметрами є: ККД  $\eta$ , коефіцієнт потужності  $\cos \phi$ , максимальний обертовий момент  $M_{\max}$ , початковий пусковий момент  $M_{\text{пуск}}$ , початковий пусковий струм  $I_{\text{пуск}}$ , ковзання  $s$ , мінімальний обертовий момент в процесі пуску  $M_{\min}$ , момент інерції ротора  $J$ .

Номінальні показники визначають за результатами періодичних випробовувань. Але останнім підлягають лише незначна кількість електромоторів (два, три ЕМ кожного типорозміру на початку їх виробництва або з кардинальною зміною конструкції). Всі ЕМ, які випускаються в подальшому, підлягають сильно скороченим приймально-здавальним випробовуванням. Крім вимірювання опору обмоток і випробовування електричної міцності ізоляції обмоток, в процесі приймально-здавальних випробовувань проводять два досліді: холостого ходу ХХ і короткого замикання КЗ. За результатами дослідів ХХ, КЗ і випробовувань обмоток приймають рішення про відповідність номінальних показників ЕМ вимогам стандартів.

Сучасний розвиток метрологічного забезпечення і технічних засобів контролю у напрямку ширшого використання мікроконтролерів, персональних ЕОМ дозволяє здійснювати ефективніші вимірювальні алгоритми і процедури, проводити швидше оброблення результатів вимірювань і тим самим суттєво підвищити функційні можливості і ефективність роботи засобів контролю.

В [1] запропоновано під час приймально-здавальних випробовувань ЕМ проводити деякі випробовування не в статичному, а в динамічному режимі роботи ЕМ. При цьому програма приймально-здавальних випробувань не змінюється.

Перевага такого підходу така: в динамічному режимі немінучі виявлення відхилень показників якості від нормованих, які виявляються у змінах значень струмів в обмотках, частоти обертання, моменту інерції, моменту опору, моменту на валу, форми механічної характеристики, параметрів статорного і роторного кола, параметрів дисбалансу. Тому вважаємо досить привабливим проводити діагностику ЕМ за цими параметрами. При цьо-

цьому слід зауважити, що кількість і склад параметрів, які підлягають визначенню згідно з державними стандартами на випробовування, не змінюються.

З точки зору контролю зручно як модель використовувати залежність показників якості від параметрів, які розбиті на певні функційні групи [2]. Показники якості ЕМ в прийнятно-здавальних випробовуваннях представимо у вигляді ієрархічної моделі (рис. 1 – 3), попередньо прийнявши для них такі умови:

1. Показники, які враховуються для оцінки якості ЕМ у випробовуваннях, повинні бути ідентичні показникам, які враховуються під час проектування.
2. Склад показників якості повинен відображати основні експлуатаційні характеристики ЕМ.
3. Показники якості повинні бути визначені таким чином, щоб простіше було б визначати залежність між підвищенням якості ЕМ і зміною при цьому будь-якої експлуатаційної характеристики.

Рівень I ієрархії характеризує узагальнений показник якості. Рівень II – комплексні показники якості. Рівень III – показники якості основних параметрів ЕМ.

Така ієрархічна побудова показників якості зводиться до того, щоб оцінити вплив певного параметра двигуна на узагальнений показник якості під час випробовування.

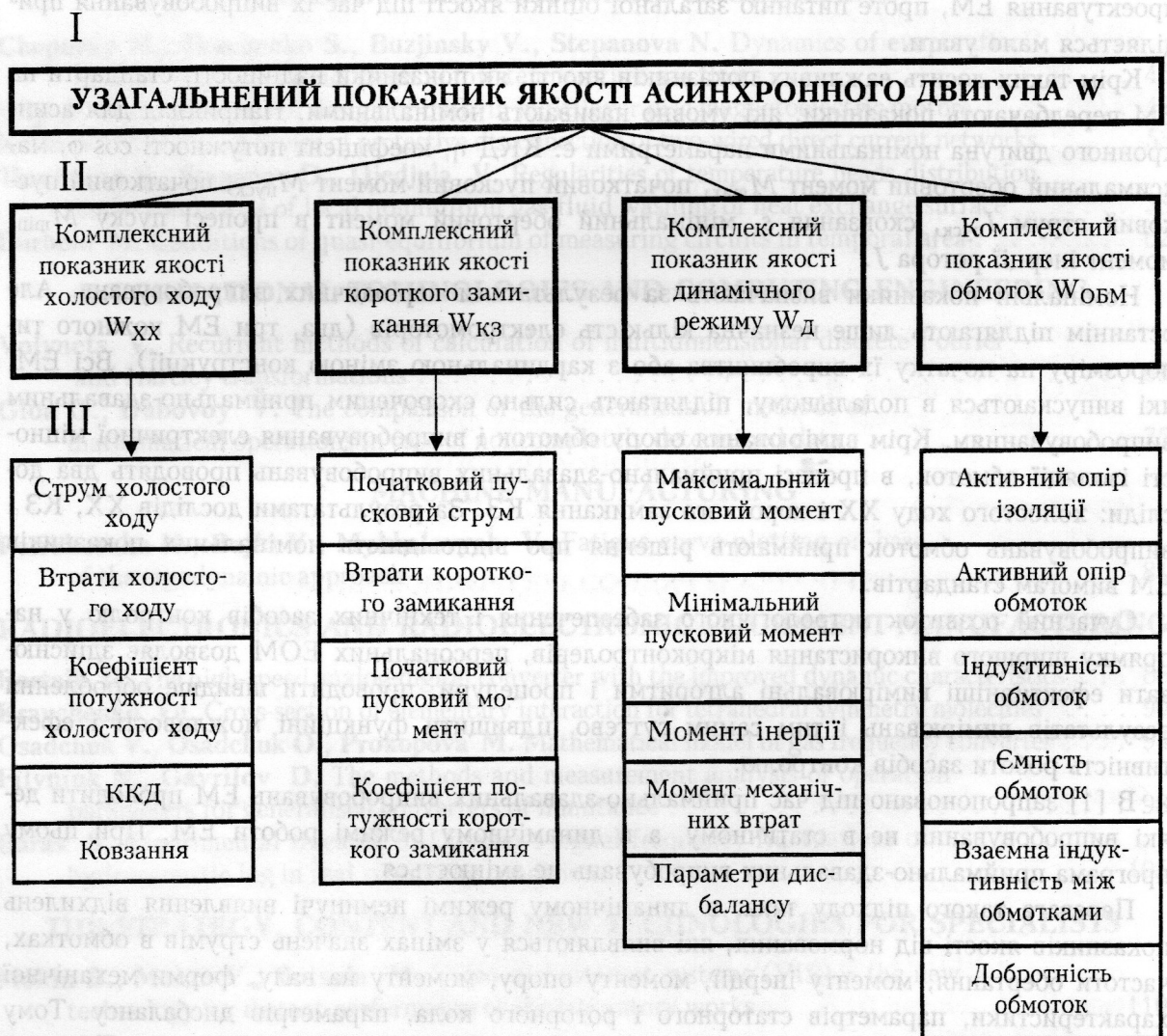


Рис. 1. Ієрархічна модель асинхронного двигуна

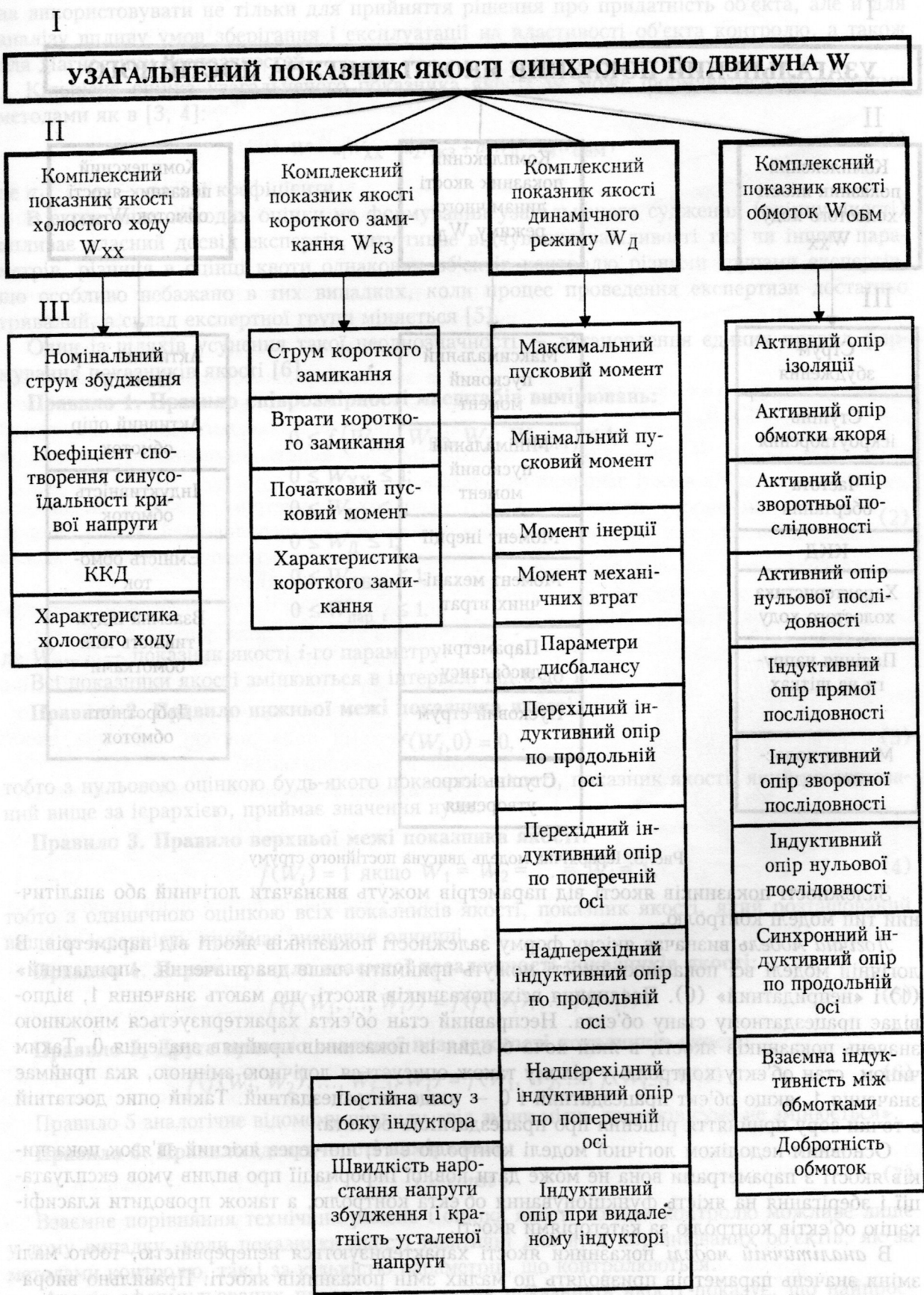


Рис. 2. Ієрархічна модель синхронного двигуна



Рис. 3. Ієрархічна модель двигуна постійного струму

Залежності показників якості від параметрів можуть визначати логічний або аналітичний тип моделі контролю.

*Логічна модель* визначає якісну форму залежності показників якості від параметрів. В логічній моделі всі показники якості можуть приймати лише два значення: «придатний» (1) і «непридатний» (0). Поєднання всіх показників якості, що мають значення 1, відповідає працездатному стану об'єкта. Несправний стан об'єкта характеризується множиною значень показників якості, в якій хоча б один із показників прийняв значення 0. Таким чином, стан об'єкту контролю у цілому також описується логічною змінною, яка приймає значення 1, якщо об'єкт працездатний і 0 — якщо непрацездатний. Такий опис достатній з точки зору прийняття рішення про працездатність об'єкта.

Основним недоліком логічної моделі контролю є те, що через якісний зв'язок показників якості з параметрами вона не може дати повної інформації про вплив умов експлуатації і зберігання на якість функціонування об'єкта контролю, а також проводити класифікацію об'єктів контролю за категоріями якості.

В *аналітичній моделі* показники якості характеризуються неперервністю, тобто малі зміни значень параметрів призводять до малих змін показників якості. Правильно вибраний показник якості як функція параметрів повинен мати екстремальне значення. Екстремуму показника якості відповідають номінальні значення параметрів. Тому всяке відхилення параметрів двигуна від своїх номінальних значень призводить до погіршення значення показника якості. Аналітична модель дає кількісний зв'язок показників якості з

параметрами. Цей кількісний зв'язок дає більшу інформацію під час контролю, яку можна використовувати не тільки для прийняття рішення про придатність об'єкта, але й для аналізу впливу умов зберігання і експлуатації на властивості об'єкта контролю, а також для діагностики несправностей.

Кількісна оцінка узагальненого показника якості  $W$  може формуватися експертними методами як в [3, 4]:

$$W = a_1 W_{XX} + a_2 W_{KЗ} + a_3 W_D + a_4 W_{ОБМ}, \quad (1)$$

де  $a_1, \dots, a_4$  — вагові коефіцієнти.

В експертних методах оцінки на формування узагальненого судження (оцінку якості) впливає власний досвід експертів, інтуїтивне відчуття важливості тих чи інших параметрів, різниця в оцінці квоти однакових об'єктів контролю різними групами експертів, що особливо небажано в тих випадках, коли процес проведення експертизи достатньо тривалий, а склад експертної групи міняється [5].

Один із шляхів усунення такої неоднозначності — встановлення єдиних правил формування показників якості [6].

**Правило 1. Правило співрозмірності масштабів вимірювань:**

$$\begin{aligned} 0 \leq f(W_{XX}, W_{KЗ}, W_D, W_{ОБМ}) &\leq 1; \\ 0 \leq W_{XX} &\leq 1; \\ 0 \leq W_{KЗ} &\leq 1; \\ 0 \leq W_D &\leq 1; \\ 0 \leq W_{ОБМ} &\leq 1; \\ 0 \leq W_{\text{пар. } i} &\leq 1, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $W_{\text{пар. } i}$  — показник якості  $i$ -го параметру.

Всі показники якості змінюються в інтервалі від 0 до 1.

**Правило 2. Правило нижньої межі показника якості:**

$$f(W_i, 0) = 0, \quad (3)$$

тобто з нульовою оцінкою будь-якого показника якості, показник якості, який розташований вище за ієрархією, приймає значення нуля.

**Правило 3. Правило верхньої межі показника якості:**

$$f(W_i) = 1 \text{ якщо } W_1 = W_2 = \dots = W_i = 1, \quad (4)$$

тобто з одиничною оцінкою всіх показників якості, показник якості, який розташований вище за ієрархією, приймає значення одиниці.

**Правило 4. Перше правило взаємної незалежності показників якості:**

$$f(f(W_1, \dots, W_i)) = f(f(W_1), \dots, f(W_i)). \quad (5)$$

**Правило 5. Друге правило взаємної незалежності показників якості:**

$$f(f(W_1, W_2), \dots, W_{i-1}, W_i) = f(W_1, W_2, \dots, f(W_{i-1}, W_i)). \quad (6)$$

Правило 5 аналогічне відомому правилу «від зміни місць доданків сума не змінюється».

**Правило 6. Правило ідентичності вимірювань:**

$$i = \text{const}. \quad (7)$$

Взаємне порівняння технічних рішень і оцінка якості об'єкта контролю можливе лише у тому випадку, коли показники якості ідентичні для всіх порівнюваних об'єктів, як за методами контролю, так і за кількістю параметрів, що контролюються.

Аналіз сформульованих правил формування показників якості показує, що найпростішою функцією, яка задовольняє їм, є функція

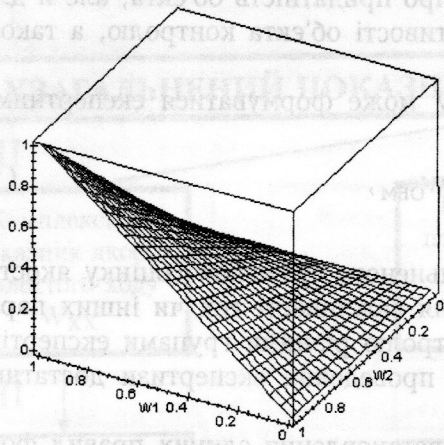


Рис. 4.. Просторове зображення функції  $W = W_1 W_2$

якості та показників якості основних параметрів.

Формалізація вибору показників якості основних параметрів — задача складніша, оскільки прийняття тих чи інших показників залежить від особливостей об'єкта оцінки.

До показника якості основних параметрів можна сформулювати такі вимоги:

- показник якості — це симетрична унімодальна функція відносно поля допуску параметра;
- в межах поля допуску показник якості змінюється від 0 до 1 в залежності від відхилення вимірюваного значення параметра від номінального;
- за межами поля допуску показник якості приймає нульове значення.

Цим вимогам задовольняє функція Іордана [5]

$$f_\varepsilon(y) = \frac{\cos y}{\sqrt{1 + \varepsilon \sin^2 y}} \quad (9)$$

Основна властивість цієї функції полягає в тому, що зі зміною її параметра  $\varepsilon$  в діапазоні  $-1 < \varepsilon \leq \infty$  при  $-\frac{\pi}{2} \leq y \leq +\frac{\pi}{2}$  форма функції змінюється від прямокутної до дельта-функції Дірака (рис. 5).

Для того щоб використати функцію Іордана для формування показників якості основних параметрів, потрібно формувати її у межах поля допуску  $\pm \Delta P$  параметра  $P$  і максимум функції ( $f_\varepsilon(P) = 1$ ) повинен відповідати номінальному значенню параметру  $P_{\text{ном}}$ , що контролюється (рис. 6).

Для цього функцію Іордана потрібно перетворити. Можна показати, що необхідним вимогам задовольняє така функція:

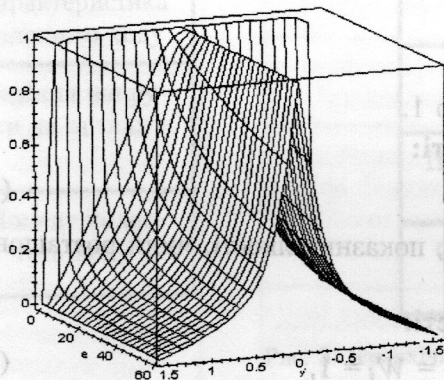


Рис. 5. Просторове зображення функції Іордана  $f_\varepsilon(\varepsilon, y)$

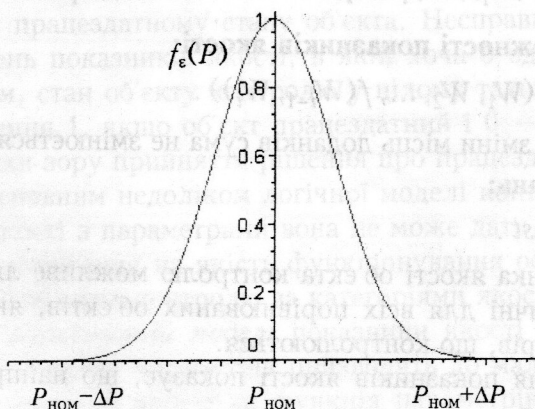


Рис. 6. Формування показника якості параметра  $P$  за допомогою функції Іордана

$$\begin{aligned} W &= W_{XX} W_{K3} W_D W_{\text{ОБМ}}; \\ W_{XX} &= W_{\text{пар. XX } 1} \dots W_{\text{пар. XX } k}; \\ W_{K3} &= W_{\text{пар. K3 } 1} \dots W_{\text{пар. K3 } l}; \\ W_D &= W_{\text{пар. D } 1} \dots W_{\text{пар. D } m}; \\ W_{\text{ОБМ}} &= W_{\text{пар. ОБМ } 1} \dots W_{\text{пар. ОБМ } n}, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $k, l, m, n$  — кількість параметрів, які формують відповідно показники якості  $W_{XX}, W_{K3}, W_D, W_{\text{ОБМ}}$ , тобто  $W = \prod_i W_i$ .

Ця функція достатньо зручна для практичного використання. Графічно представити функцію (8) найпростіше як залежність  $W = W_1 W_2$  (рис. 4).

$$f_{\varepsilon}(P) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2\Delta P}(P - P_{\text{ном}})\right)}{\sqrt{1 + \varepsilon \sin^2\left(\frac{\pi}{2\Delta P}(P - P_{\text{ном}})\right)}}, \quad (10)$$

де поле допуску  $\pm\Delta P$  задається в одиницях вимірювання параметра, або

$$f_{\varepsilon}(P) = \frac{\cos\left(\frac{50\pi}{P_{\text{ном}}D_P}(P - P_{\text{ном}})\right)}{\sqrt{1 + \varepsilon \sin^2\left(\frac{50\pi}{P_{\text{ном}}D_P}(P - P_{\text{ном}})\right)}}, \quad (11)$$

де поле допуску  $\pm D_P$  задається у відсотках.

Вибір показника якості  $\varepsilon$  залежить від жорсткості вимог, що висуваються до проведення випробовувань.

Після визначення узагальненого показника якості ЕМ, що контролюються, можна присвоїти категорії якості. Категорії якості присвоюються в залежності від коефіцієнта рівня якості і лімітувальних показників [3]: вища категорія, якщо  $W \geq 0,95$ ; перша категорія, якщо  $0,95 > W \geq 0,9$ ; друга категорія, якщо  $W < 0,9$ .

### Висновки

1. Запропонована ієрархічна модель ЕМ під час випробовувань, в яку входять: узагальнений та комплексні показники якості, показники якості основних параметрів.

2. Визначено єдині правила формування показників якості, на основі яких синтезовано функцію якості. Показники якості основних параметрів запропоновано визначати за допомогою модифікованої функції Йордана.

3. Запропонована методика оцінки якості ЕМ дозволяє суттєво підвищити загальну якість контролювання та оцінювання якості ЕМ, проводити їх сортування за категоріями якості, прогнозувати вплив технологічного процесу на якість виготовлення ЕМ.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кучерук В. Ю., Поджаренко А. В. Про вдосконалення програм випробувань електричних машин / В кн. «Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини». Збірник наукових праць, випуск № 3.— К.: ФАДА, ЛТД, 1999. — С. 101—104.
2. Евланов Л. Г. Контроль динамических систем. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. — 432 с.
3. Лопухина Е. М., Семенчуков Г. А. Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. — М.: Высш. школа, 1980. — 359 с.
4. Жуков Н. А., Игнатович В. М., Муравлев О. П. Управление качеством при изготовлении асинхронных двигателей. // Стандарты и качество. — 1977. — № 1. — С. 3—12.
5. Земельман И. А. О классификации погрешностей измерений // Измерительная техника. — 1985. — № 6. — С. 3—5.
6. Кучерук В. Ю. Контроль якості асинхронних двигунів при їх випробовуваннях // Автоматизація виробничих процесів. — 2000. — № 2 (11). — С. 41—45

Рекомендована кафедрою метрології та промислової автоматики

Надійшла до редакції 27.08.02

Рекомендована до опублікування 20.11.02

**Поджаренко Володимир Олександрович** — завідувач кафедри; **Кучерук Володимир Юрійович** — доцент; **Войтович Олеся Петрівна** — аспірант.

Кафедра метрології та промислової автоматики, Вінницький державний технічний університет.

1. Кучерук В.Ю., Поджаренко А.В. Про вдосконалення програм випробувань електричних машин / В кн. "Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини". Збірник наукових праць, випуск №3.- К.: ФАДА, ЛТД, 1999. - с. 101-104.
2. Евланов Л.Г. Контроль динамических систем. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. - 432 с.
3. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. - М.: Высш. школа, 1980. - 359 с.
4. Жуков Н.А., Игнатович В.М., Муравлев О.П. Управление качеством при изготовлении асинхронных двигателей // Стандарты и качество. - 1977. - №1. - с. 3-12.
5. Земельман И.А. О классификации погрешностей измерений // Измерительная техника. - 1985.- №6. - с. 3-5.
6. Кучерук В.Ю. Контроль якості асинхронних двигунів при їх випробуваннях // Автоматизація виробничих процесів. - 2000. -№2 (11). - с. 41-45.