

## ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ТА ТЕХНІЧНІЙ ДІАГНОСТИЦІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Кучерук В.Ю.

Вінницький державний технічний університет

Трифазні асинхронні двигуни (АД) є найбільш масовою продукцією електромашинобудування. Асинхронні електроприводи складають 95% загальної кількості електроприводів. Ефективна діагностика технічного стану АД в процесі виробництва, своєчасне прогнозування причин розлагодження технологічного процесу і засноване на цьому керування якістю виготовлення АД дозволяє вирішувати актуальні задачі на виробництві. Зокрема, прогнозування стану АД дозволяє раціонально спланувати проведення регламентних робіт, ремонт і заміну техніки, тощо. Важливе значення прогнозування в процесі діагностики привело до виділення його в особливий вид діагностики, який отримав назву *прогнозуючої діагностики*.

Потрібно відмітити, що прогнозуюча діагностика відрізняється від звичайної діагностики тільки тим, що прийняття рішень про придатність робиться для наступного моменту часу. За результатами спостереження параметрів АД на певному проміжку часу проводиться екстраполяція значень параметрів на майбутній момент часу і відповідно обчислюється майбутнє значення показника якості. Алгоритми прийняття рішень при прогнозуючій діагностиці такі ж самі, що і при поточній діагностиці. Прогнозуюча діагностика переходить в поточну діагностику при нульовому часі екстраполяції. Ця обставина дозволяє розглядати прогнозуючу діагностику як більш загальну, окремий випадок якої є поточна діагностика [1].

В даній статті пропонується метод технічної діагностики АД на основі логічних функцій. В ньому використано 14 найбільш поширених ознак браку, зведених в таблицю 1.

Для даних ознак браку складена таблиця 2 логічної відповідності їм 18-ти параметрів асинхронних двигунів, які розбиті на 4 групи: 1) параметри холостого ходу (струм  $I_{xx}$ , ККД  $\eta$ , кутова швидкість  $\omega_r$ ,  $\cos\phi_{xx}$ ); 2) параметри короткого замикання (пусковий струм  $I_p$ , пусковий момент  $M_p$ ,  $\cos\phi_{кз}$ ); 3) параметри динамічного режиму (максимальний момент  $M_{max}$ , момент інерції  $J$ , момент опору  $M_0$ , параметри механічної характеристики  $M(\omega_r)$ , параметри дисбалансу); 4) параметри обмоток (активний опір ізоляції  $R_{iz}$ , активний опір обмоток  $R_{обм}$ , індуктивність  $L_{обм}$ , ємність  $C_{обм}$ , добротність обмоток  $Q_{обм}$ ).

Таблиця 1. Причини браку асинхронних двигунів

Умовне позначення	Причина браку
Q <sub>1</sub>	Збільшений розмір повітряного зазору
Q <sub>2</sub>	Занижена кількість витків обмотки статора
Q <sub>3</sub>	Відступ у висоті вусика пазів ротора
Q <sub>4</sub>	Відступ у випалі листів магнітопроводу
Q <sub>5</sub>	Невідповідність марки сталі
Q <sub>6</sub>	Завищене число витків обмотки статора
Q <sub>7</sub>	Завищений опір обмотки статора
Q <sub>8</sub>	Неякісна заливка ротора
Q <sub>9</sub>	Підвищені втрати в сталі
Q <sub>10</sub>	Підвищені механічні втрати в підшипниках
Q <sub>11</sub>	Порушення в хімічному складі алюмінієвого сплаву
Q <sub>12</sub>	Невідповідність в обмоткових даних
Q <sub>13</sub>	Взаємне зміщення пакетів статора і ротора
Q <sub>14</sub>	Зменшений розмір повітряного зазору

При аналізі причин браку можливий нечіткий діагноз, оскільки одна і та ж сама причина може привести до відхилень одночасно кількох параметрів асинхронного двигуна. Тому діагностування можна проводити у такій послідовності дій:

1. Формування табличних множин для кожної причини браку Q<sub>k</sub>:

$$\mathbf{A}_{Тк} = \{a_{i \text{ табл.}k}; i = \overline{1, 6, 1}\}; \mathbf{B}_{Тк} = \{b_{i \text{ табл.}k}; i = \overline{1, 5, 1}\}; \quad (1)$$

$$\mathbf{C}_{Тк} = \{c_{i \text{ табл.}k}; i = \overline{1, 4, 1}\}; \mathbf{D}_{Тк} = \{d_{i \text{ табл.}k}; i = \overline{1, 3, 1}\};$$

- $Z_{Tk} = A_{Tk} \cup B_{Tk} \cup C_{Tk} \cup D_{Tk}$  для  $k = \overline{1, 14, 1}$ .
2. Визначення параметрів асинхронного двигуна і формування експериментальних множин:
- $$A_k = \{a_{i \text{ експ.}k}; i = \overline{1, 6, 1}\}; B_k = \{b_{i \text{ експ.}k}; i = \overline{1, 5, 1}\}; \quad (2)$$
- $$C_k = \{c_{i \text{ експ.}k}; i = \overline{1, 4, 1}\}; D_k = \{d_{i \text{ експ.}k}; i = \overline{1, 3, 1}\};$$
- $Z_k = A_k \cup B_k \cup C_k \cup D_k$  для  $k = \overline{1, 14, 1}$ .
3. Знаходження найбільш ймовірної причини браку:
- $$Z_k \cap Z_{Tk} \rightarrow \min \{ \dots \}, \quad k = \overline{1, 14, 1}. \quad (3)$$
- При  $Z_k \cap Z_{Tk} = \emptyset$  формується чіткий діагноз.

Таблиця 2. Таблиця станів асинхронного двигуна

Стани	1. Показники якості обмоток						2. Показники якості динамічного режиму				
	R <sub>із</sub>	R <sub>обм</sub>	L <sub>обм</sub>	C <sub>обм</sub>	L <sub>п</sub>	Q <sub>обм</sub>	M <sub>max</sub>	M(ω <sub>r</sub> )	J	M <sub>0</sub>	Дисб.
	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>
Q <sub>0</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Q <sub>1</sub>	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1
Q <sub>2</sub>	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Q <sub>3</sub>	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Q <sub>4</sub>	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1
Q <sub>5</sub>	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1
Q <sub>6</sub>	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Q <sub>7</sub>	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
Q <sub>8</sub>	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Q <sub>9</sub>	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Q <sub>10</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Q <sub>11</sub>	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Q <sub>12</sub>	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Q <sub>13</sub>	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0
Q <sub>14</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Стани	3. Показники якості холостого ходу				4. Показники якості короткого замикання		
	I <sub>xx</sub>	cosφ <sub>xx</sub>	η	ω <sub>r</sub>	I <sub>п</sub>	M <sub>п</sub>	cosφ <sub>кз</sub>
	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	c <sub>4</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>
Q <sub>0</sub>	1	1	1	1	1	1	1
Q <sub>1</sub>	0	0	1	1	0	1	1
Q <sub>2</sub>	0	1	1	0	0	1	1
Q <sub>3</sub>	1	0	0	1	0	1	0
Q <sub>4</sub>	1	0	1	1	1	1	0
Q <sub>5</sub>	1	1	0	1	1	1	1
Q <sub>6</sub>	1	1	1	0	1	0	1
Q <sub>7</sub>	1	1	1	0	1	1	1
Q <sub>8</sub>	1	1	0	0	1	0	1
Q <sub>9</sub>	1	1	0	0	1	1	1
Q <sub>10</sub>	1	0	0	1	1	1	0
Q <sub>11</sub>	1	1	0	1	1	1	1
Q <sub>12</sub>	1	0	1	0	1	1	0
Q <sub>13</sub>	1	0	1	1	0	1	1
Q <sub>14</sub>	1	0	0	1	0	1	0

*Примітка:*  
Число "1" відповідає попаданню в зону допуску, а число "0" – непопаданню в зону допуску відповідного параметра асинхронного двигуна

Поставимо задачу прогнозування якості технологічного процесу виробництва АД на основі [2]. На технічний стан АД впливають фактори (рис. 1): **X** - зміни у властивостях процесів виробництва АД; **Y** - випадкові зовнішні та внутрішні завади. Для вимірювань вибрано сукупність  $\xi = A \cup B \cup C \cup D$  прогнозуючих параметрів АД, які суттєво залежать від **X** і дозволяють (при певних засобах

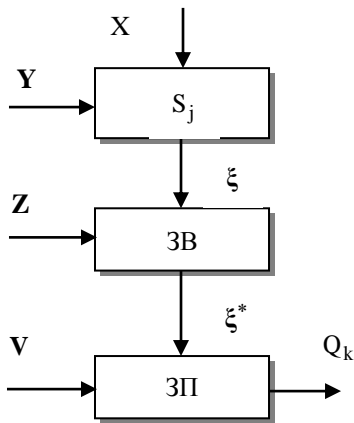


Рис. 1. Однолінійна схема системи прогнозування, яка вміщує АД  $S_j$ , засоби вимірювання ЗВ та засоби прогнозування ЗП

прогнозування, які реалізують алгоритм прогнозування) передбачити майбутній технічний стан  $Q_k$  АД. На значення прогнозуючих параметрів в загальному випадку впливають завади  $Y$ . При вимірюванні параметрів можливі похибки вимірювань  $Z$ , внаслідок чого замість вектору  $\xi$  істинних значень отримується вектор вимірних значень  $\xi \neq \xi^*$ . На результати прогнозування, можливо, впливають похибки прогнозування  $V$ . Таким чином, майбутній технічний стан  $Q_k$  АД залежить від кількох випадкових векторних аргументів:

$$Q_k = f(X, Y, Z, V). \quad (4)$$

Залежність (4) є моделлю процесу прогнозування. Імовірнісний характер цієї моделі визначається тим, що  $X, Y, Z, V$  є суттєво випадковими функціями. Отримати залежність (4) в аналітичній формі для АД як складної електромеханічної системи, неможливо.

У зв'язку з цим необхідно використати прийоми спрощення як самої моделі, так і процедур її обробки.

Розділимо загальну задачу прогнозування на дві самостійні задачі – задачу вимірювань прогнозуючих параметрів, коли використовується модель

$$\xi^* = \varphi(X, Y, Z), \quad (5)$$

і задачу отримання прогнозу (результату прогнозування) за моделлю

$$Q_k = \psi(\xi^*, V). \quad (6)$$

Методи вимірювання та ідентифікації прогнозуючих параметрів АД розглянуто в [4-12]. Як модель прогнозування (6) пропонується використати функцію показників якості АД [13]:

$$\begin{aligned} W &= W_{XX} \cdot W_{K3} \cdot W_D \cdot W_{OБM}; \\ W_{XX} &= W_{\text{пар. XX } 1} \cdot \dots \cdot W_{\text{пар. XX } k}; \\ W_{K3} &= W_{\text{пар. K3 } 1} \cdot \dots \cdot W_{\text{пар. K3 } l}; \\ W_D &= W_{\text{пар. D } 1} \cdot \dots \cdot W_{\text{пар. D } m}; \\ W_{OБM} &= W_{\text{пар. OБM } 1} \cdot \dots \cdot W_{\text{пар. OБM } n}, \end{aligned} \quad (7)$$

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

Ця функція достатньо зручна для практичного використання. Графічно представити функцію (7) найбільш просто як залежність  $W = W_1 \cdot W_2$  (рис. 2).

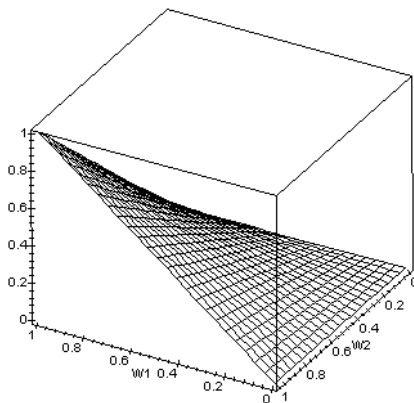


Рис. 2. Просторове зображення функції  $W = W_1 \cdot W_2$

Такі в загальному вигляді принципи формування узагальненого та комплексних показників якості. Формування узагальненого показника якості здійснюється на основі комплексних показників якості та показників якості основних параметрів.

Формалізація вибору показників якості основних параметрів – задача більш складна, так як прийняття тих чи інших показників залежить від особливостей об'єкту 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.

В основу методики визначення показників якості основних параметрів, які задовольняють вищевказаним вимогам, положено функцію Іордана [14]:

$$f_{\varepsilon}(y) = \frac{\cos y}{\sqrt{1 + \varepsilon \cdot \sin^2 y}}. \quad (8)$$

Чудова властивість цієї функції полягає в тому, що при зміні 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. 3).

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.

Для цього функцію Іордана потрібно перетворити. Можна показати [13], що необхідним вимогам задовольняє наступна функція:

$$f_{\varepsilon}(P) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2 \cdot \Delta P} \cdot (P - P_{\text{ном}})\right)}{\sqrt{1 + \varepsilon \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{2 \cdot \Delta P} \cdot (P - P_{\text{ном}})\right)}}, \quad (9)$$

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

$$f_{\varepsilon}(P) = \frac{\cos\left(\frac{50\pi}{P_{\text{ном}} \cdot D_P} \cdot (P - P_{\text{ном}})\right)}{\sqrt{1 + \varepsilon \cdot \sin^2\left(\frac{50\pi}{P_{\text{ном}} \cdot D_P} \cdot (P - P_{\text{ном}})\right)}}, \quad (10)$$

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

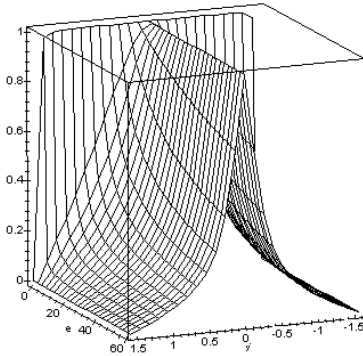


Рис. 3. Просторове зображення функції Іордана  $f_{\varepsilon}(\varepsilon, y)$

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

Після визначення узагальненого показника якості двигунам, що контролюються, можна присвоїти категорії якості. Категорії якості присвоюються в залежності від коефіцієнта рівня якості і лімітуючих показників: вища категорія при  $W \geq 0.95$ ; перша категорія при  $0.95 > W \geq 0.9$ ; друга категорія при  $W < 0.9$ .

Для екстраполяції дрейфу вектора вимірних значень  $\xi^*$  можна використати поліноміальну залежність від часу із випадковими величинами [1]:

$$U_i(t) = \sum_{k=1}^{h+1} U_{ik} \cdot t^{k-1}, \quad (11)$$

де  $i$  – номер параметра;  $h+1$  – порядок поліному;  $U_{ik}$  – випадкові коефіцієнти, що характеризують:  $U_{i1}$  – початкове значення,  $U_{i2}$  – швидкість зміни;  $U_{i3}$  – прискорення.

Як правило, достатньо обмежитися другим порядком поліному:

$$U_i(t) = U_{i1} + U_{i2} \cdot t + U_{i3} \cdot t^2. \quad (12)$$

Стрибок у зміні параметрів сигналізує про суттєве розлагодження технологічного процесу. Моделлю, що описує стрибки у значеннях параметрів, може слугувати випадковий процес, в якому поява стрибків проходить у випадкові моменти часу, а значення параметрів після стрибка є випадковими величинами. Для побудови цієї моделі необхідно знати закони розподілу ймовірностей моментів появи стрибків і значень параметрів. Характеристики цих законів розподілу достатньо точно знайти неможливо. Тому необхідно обмежитися наступною спрощеною моделлю стрибків. Закон розподілу ймовірностей часу появи стрибків приймається пуассонівським, а значення параметру після стрибка вважається відомим. Тоді математичне очікування певного параметра можна записати у вигляді:

$$U_i(t) = e^{-\lambda t} (U_{i1} + U_{i2} \cdot t + U_{i3} \cdot t^2) + (1 - e^{-\lambda t}) a, \quad (13)$$

де  $e^{-\lambda t}$  – ймовірність того, що стрибка за час  $t$  не буде;  $(1 - e^{-\lambda t})$  – ймовірність хоча б одного стрибка за час  $t$ ;  $a$  – значення параметра після стрибка.

При екстраполяції значень параметрів і функції показників якості АД бажано провести згладження коливань  $U(t)$ , наприклад, методом найменших квадратів.

Висновки:

1. Запропоновано метод технічної діагностики АД на основі логічних функцій, який використовує параметри АД, отримані в чотирьох режимах випробувань: випробування обмоток; динамічний режим; режим холостого ходу; режим короткого замикання.
2. Розглянуто особливості прогнозування якості технологічного процесу при виробництві АД, запропоновано аналітичну модель прогнозування на основі функцій показників якості та функції Йордана.
3. Як модель дрейфу параметрів запропоновано використати їх поліноміальну залежність від часу в процесі проведення випробувань.

#### Література

1. Евланов Л.Г. Контроль динамических систем.-М.:Наука, 1979.-432с.
2. Технические средства диагностирования: Справочник/В.В.Клюев, П.П.Пархоменко, В.Е.Абрамчук и др.; Под общ.ред. В.В.Клюева.-М.:Машиностроение, 1989.-672с.
3. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю., Гоменюк А.С. Новый способ измерения момента инерции электрических машин.//Научно-технический сборник «Автоматизация технологических процессов та промислова екологія», Випуск 1, 1997, с.23-27.
4. Кучерук В.Ю. Анализ существующих способов измерения механических характеристик электрических машин. //Вимірювальна техніка та метрологія, Львів, №54, 1999, с.125-138.
5. Podzharenko V.A., Kucheruk V.Yu. New method of measurement of a moment of inertia of an electrical machines.// XIV IMEKO World Congress, Tampere, Finland, 1-6 June 1997, Volume III, Topics 3, pp.90-95.
6. Джарадат Р.Х., Поджаренко В.О., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю. Фазовый метод микропроцессорного измерения добротности электрических машин.// Вимірювальна техніка та метрологія, Львів, Випуск 51, 1995, с.19-21.
7. Кучерук В.Ю., Кухарчук В.В. Анализ та практична реалізація мікропроцесорного засобу вимірювання кутової швидкості обертання електричних машин.// Вісник Вінницького політехнічного інституту, №2(7), 1995, с.12-17.
8. Кучерук В.Ю. Способ определения момента опоры электрических машин та пристрій для його реалізації.//Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.-Хмельницький.-1999.-№3.-с.49-52.
9. Кучерук В.Ю., Поджаренко А.В., Селезньова Р.В. Идентификация внутренних параметров обмоток электрических машин за допомогою теорії чутливості.//Вісник Державного університету "Львівська політехніка". Автоматика, вимірювання та керування. 2000. №389. с. 72-81.
10. Кучерук В.Ю. Класифікація та аналіз методів оцінки стану електричних машин. //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.-Хмельницький.-1999.-№4.-с.56-62.
11. Кучерук В.Ю., Кухарчук В.В., Поджаренко А.В., Дудикевич В.Б. Методологія побудови засобів вимірювання моменту інерції роторів електричних машин.//Проблеми створення нових машин і технологій. Наукові праці Кременчуцького державного політехнічного інституту.- Випуск 1/2000 (8), с.113-118.
12. Кучерук В.Ю. Идентификация внутренних параметров роторного кола асинхронных машин за допомогою теорії чутливості.// Вісник ВПІ.-2000.-№4.-С.5-10.
13. Кучерук В.Ю. Контроль якості асинхронних двигунів при їх випробуваннях/ Автоматизация виробничих процесів, Київ.-2000.-№2 (11).-С.41-45.
14. Земельман И.А. О классификации погрешностей измерений. //Измерительная техника, 1985, №6, с.3-5.

УДК 621.313.333.001.4

**Прогнозування якості технологічного процесу при виробництві та технічній діагностиці асинхронних двигунів /Кучерук В.Ю.// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.-2001.-№ .-С.**

Запропоновано метод технічної діагностики асинхронних двигунів на основі логічних функцій, який використовує параметри асинхронних двигунів, отримані в чотирьох режимах випробувань: випробування обмоток; динамічний режим; режим холостого ходу; режим короткого замикання. Розглянуто особливості прогнозування якості технологічного процесу при виробництві асинхронних двигунів, запропоновано аналітичну модель прогнозування на основі функцій показників якості та функції Йордана. Як модель дрейфу параметрів запропоновано використати їх поліноміальну залежність від часу в процесі проведення випробувань.

**Prediction of quality of the technological process by production and technical diagnostics of induction motors / V.Yu.Kucheruk // МСТТР. -2001. -№. -Р.**

The method of technical diagnostics of induction motors is offered on the basis of logical functions, which uses parameters of induction motors obtained in four modes of tests: test of windings; a dynamic behaviour; the mode of no-load operation; the mode of a short-circuit. The features of prediction of quality of the technological process are considered by production of induction motors, the analytical model of prediction is offered on the basis of functions quality metrics and Jordan's function. As the model of a drift of parameters is offered to use their polynomial dependence on time during testing.