

МЕТОД ІНТЕРВАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ДІЇ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

В.О. Поджаренко, д.т.н., проф.; Д.А. Гоменюк, асп.
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця
кафедра метрології та промислової автоматики

Abstract

The reason of unsatisfactory exactness of existent methodological construction of devices of decision of moment of inertia of rotors of electric machines is exposed. A new method of interval estimation of action of moment of inertia of rotor of asynchronous engine is developed; the examples of its realization and direction of development are resulted.

Вступ

Світова промисловість щорічно виготовляє понад 5 мільярдів асинхронних двигунів (АД) і кожний з них проходить динамічні приймально-здавальні випробування (ПЗВ).

Існуюча техніка динамічних ПЗВ АД з незадовільною точністю визначає його момент інерції J . Похибка визначення моменту інерції обумовлює низьку точність обчислення динамічного моменту $M_d(\omega)$, коефіцієнта корисної дії η та коефіцієнта потужності $\cos\varphi$, а тому ці показники якості АД не включаються в програми діючих ПЗВ [1].

Відомо довгий перелік методів, способів і пристроїв визначення моменту інерції електричних машин описаних у [1...4] та наведених в їх списках літератури, але на сьогодні є тільки декілька повідомлень [2,4...7] про досягнуту точність 0,5...1%, яка не задовольняє вимоги державних стандартів по точності представлення показників якості АД. А тому теоретичний пошук нових можливостей підвищення точності та швидкодії визначення моменту інерції АД по результатам його динамічних ПЗВ є актуальною темою для виробників електричних машин.

Системний аналіз [8] відомих методів, способів та пристроїв визначення J [1-7] виявив такі закономірності їх фізичної реалізації в широкому колі робочих засобів.

1. Застосування допоміжних пристроїв навантаження АД: пружньо-коливальних [2,7]; механічних [3]; динамічних [4,9]; електромагнітних [2,5,6]; вентиляційних [4,9] та інші.

2. Обчислення моменту інерції миттєвими величинами параметрів динамічних режимів: кутової швидкості $\omega(t)$ [4...6]; кутового прискорення $\varepsilon(t)$ [4,7]; крутного моменту $M(t)$ [2,7]; моменту опору $M_0(t)$ [4]; періоду коливань $T(J)$ [2...4] та інші.

3. Активізація динамічних режимів АД джерелами енергій: тягіння [3]; пружних зусиль [2,7]; тертя [5,6] та аеродинамічних [4,9], які відрізняються від його робочого електричного джерела живлення.

Саме ці закономірності і вказують на головні причини існування в техніці динамічних випробувань АД суттєвих похибок.

1. Інструментальних, створених складними конструктивними схемами пристроїв навантаження, моментом інерції рухомих вузлів пристроїв навантаження, наближених за величиною до моменту інерції випробувального АД, наявністю муфт механічного спряження, невирішеною проблемою повірки пристроїв навантаження в державних метрологічних центрах (ДМЦ).

2. Методичних, обумовлених відсутністю аналізу енергетичного балансу взаємоперетворень різних видів енергії в динамічних процесах, неврахуванням складності функцій втрат енергії, обчисленням моменту інерції миттєвими параметрами динамічних режимів АД (короткочасне спостереження дії моменту інерції).

3. Встановлення, зумовлених застосуванням різноманітних джерел активізації

динамічних режимів АД взамін його робочого джерела електричної енергії (похибки вимірювальних перетворень).

Вибір напрямку рішення проблеми

Функціональний аналіз мікропроцесорних та інформаційно-вимірювальних систем (МПС та ІВС) показав, що під час випробувань АД в складі МПС та ІВС він функціонує як електромеханічний вимірювальний прилад [10], а саме, його статор поглинає електричну енергію, а ротор при цьому повертається на деякий кут.

Якщо вхідні, внутрішні та вихідні параметри АД, відповідно, напругу $U(t)$, і струм $i(t)$, активний опір статорних обмоток R і момент інерції ротора J та частоту обертання вала $n(t)$ [8,10] взяти за критерії подібності, то за третьою теоремою теорії подібності [11] АД, в складі МПС та ІВС, подібний інтегруючому індукційному лічильнику електричної енергії [10]. Фізичні процеси перетворення електричної енергії в механічну в АД та в індукційному лічильнику описуються одним і тим же рівнянням перетворення [10,12,13] з відмінністю тільки на їх кількісну конструктивну сталу величину C , тобто

$$\int_{t_1}^{t_2} U(t) \cdot i(t) dt = C \cdot \int_{t_1}^{t_2} n(t) dt .$$

Теорії електричних машин [12] та електроприводу [13] вказують, що фізичні процеси перетворення енергій в роторі АД володіють особливою властивістю, а саме, втрати енергії в роторі не залежать від часу динамічного режиму та форми характеристики динамічного моменту $M_d(\omega)$ – втрати енергії в роторі зумовлені тільки зміною його кінетичної енергії $T(\omega_n, \omega_g) = 0,5 \cdot J(\omega_g^2 - \omega_n^2)$ між нижньою ω_n та верхньою ω_g межами інтервалу кутової швидкості ω . Ця особлива властивість відкриває можливість визначення моменту інерції J методом інтервальної оцінки його дії (кількісна зміна кінетичної енергії) в певних межах кутової швидкості. При цьому кількість переданої електричної енергії в ротор (різниця між спожитою енергією АД та її втратами в статорній обмотці) і миттєві величини кутової швидкості в теперішній час вимірюються цифровими приладами та обробляються мікропроцесорною технікою з точністю на два -три порядки вищою [8, 10, 14...17] проти точності визначення параметрів якими обчислюють момент інерції існуючі методи (крутний момент M_k ротора загальмованого вимірювальним важелем і сенсором зусилля [2], момент опору [4] вимірюного пристроєм [9] в якому застосовується вимірювальний важіль і сенсор зусилля).

Метод інтервальної оцінки дії фізичної величини в певних межах динамічного, метрологічного експерименту наповнює його змістом багаторазових спостережень вимірювальної величини за допомогою одного і того засобу вимірювань в наслідок чого випадкова похибка зменшується в \sqrt{n} раз, де n – число дискретних значень фізичної величини виміряних і зареєстрованих в межах дослідного інтервалу динамічного процесу [10, 15, 16].

Суть методу інтервальної оцінки дії моменту інерції АД

Програма випробувань АД включає в себе: два режими розгону, в яких кутова швидкість $\omega_p(t)$ зростає (рис.) і на її інтервалі між нижньою ω_n та верхньою ω_g межами ротор накопичує кінетичну (корисну) енергію $T(\omega_n, \omega_g)$; два режими гальмування –

самогальмування та противключення, в яких їх кутові швидкості $\omega_{c2}(t)$ та $\omega_{2n}(t)$ спадають і на їх інтервалах в тих самих межах ω_n та ω_6 , що і в режимі розгону, ротор втрачає ту ж саму частину своєї кінетичної енергії $T(\omega_n, \omega_6)$.

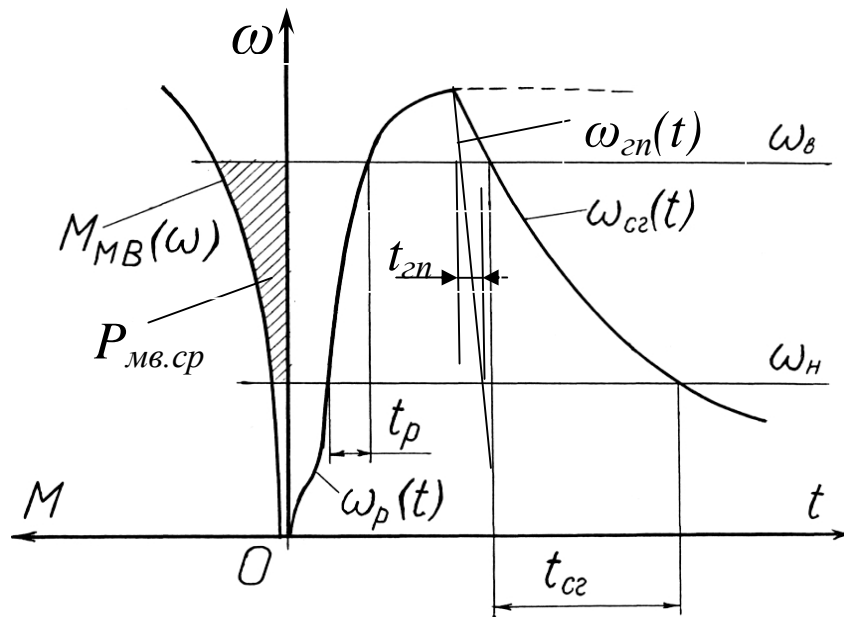


Рисунок. Ілюстрація тотожної дії моменту механічних втрат $M_{MB}(\omega)$ в динамічних режимах АД.

В режимах розгону та гальмування діє момент механічних втрат $M_{MB}(\omega)$, який є функцією кутової швидкості ω , а тому незалежно від енергетичного змісту динамічних режимів АД, але в одних і тих самих межах ω_n та ω_6 інтервалів функцій $\omega_p(t)$, $\omega_{c2}(t)$ та $\omega_{2n}(t)$ діє однією і тією самою величиною середнього значення потужності механічних втрат [12, 13], тобто

$$P_{MB.cpr}(\omega_n, \omega_6) = \int_{\omega_n}^{\omega_6} M_{MB}(\omega) d\omega.$$

Фізичний зміст цього математичного твердження ілюструє рисунок, де з метою більшої очевидності тотожної дії моменту механічних втрат $M_{MB}(\omega)$ в різних динамічних режимах АД, площина функції $M_{MB}(\omega)$ повернути на кут 90° проти годинникової стрілки, а її вісь ω накладена на відповідну вісь ω функцій кутових швидкостей $\omega_p(t)$, $\omega_{c2}(t)$ та $\omega_{2n}(t)$. На рисунку параметри t_p, t_{c2} та t_{2n} відповідно проміжки часу розгону, самогальмування та гальмування противключенням АД в одних і тих самих межах ω_n, ω_6 інтервалів кутових швидкостей $\omega_p(t)$, $\omega_{c2}(t)$ та $\omega_{2n}(t)$.

Середнє значення потужності механічних втрат $P_{MB.cpr}(\omega_n, \omega_6)$ та момент інерції J діють в режимах гальмування кількісно невідомими величинами, які визначають шляхом складання та розв'язування системи двох рівнянь енергетичного балансу режимів гальмування в одних і тих самих межах ω_n, ω_6 інтервалів їх кутових швидкостей $\omega_{2n}(t)$ та $\omega_{c2}(t)$. В режимі самогальмування в межах ω_n, ω_6 інтервалу кутової швидкості $\omega_{c2}(t)$ кінетична енергія ротора $T(\omega_n, \omega_6) = 0,5 \cdot J(\omega_6^2 - \omega_n^2)$ повною мірою розсіюється енергією

механічних втрат $\Delta W_{MBc2}(\omega_n, \omega_e) = t_{c2} P_{MBcp}(\omega_n, \omega_e)$ [4,12,13], тобто

$$0,5 \cdot J(\omega_e^2 - \omega_n^2) - t_{c2} P_{MBcp}(\omega_n, \omega_e) = 0. \quad (1)$$

В режимі противключення АД кінетичної енергії (корисної) не створює і в тих самих межах ω_n, ω_e , що і в режимі самогальмування, на інтервалі кутової швидкості $\omega_{zn}(t)$ та ж сама кількість кінетичної енергії ротора $T(\omega_n, \omega_e)$ розсіюється енергіями механічних втрат $\Delta W_{MBzn}(\omega_n, \omega_e) = t_{zn} P_{MBcp}(\omega_n, \omega_e)$ та спожитою електричною із мережі живлення $W_{1ГП}(\omega_n, \omega_e)$ за винятком її втрат в статорі $\Delta W_{1ГП}(\omega_n, \omega_e)$ [12,13], тобто

$$0,5J(\omega_e^2 - \omega_n^2) - t_{zn} P_{MBcp}(\omega_n, \omega_e) - [W_{1zn}(\omega_n, \omega_e) - \Delta W_{1zn}(\omega_n, \omega_e)] = 0. \quad (2)$$

Із сумісного розв'язку рівнянь (1) і (2) виводиться формула обчислення моменту інерції J по результатам випробувань АД в режимах самогальмування та противключення:

$$J = \frac{t_{c2} [W_{1ГП}(\omega_n, \omega_e) - \Delta W_{1ГП}(\omega_n, \omega_e)]}{0,5 \cdot (t_{c2} - t_{cn})(\omega_e^2 - \omega_n^2)}. \quad (3)$$

Формула (3) вказує, що середньоквадратична відносна похибка обчислення моменту інерції J в запропонованому методі є геометрична сума відносних похибок (некорельованих) [10,14...16] вимірювання параметрів динамічних режимів трьохфазного АД

$$\sigma = \sqrt{8\delta_t^2 + 4\sigma_\omega^2 + 3\sigma_R^2 + 3\sigma_i^2 + 3\sigma_P^2 + 3\sigma_{np}^2},$$

де похибки: δ_t – процесорна проміжків часу t_{c2}, t_{zn} ; σ_ω – середньоквадратична цифрових тахометрів миттєвих значень ω_n, ω_e ; δ_R, δ_i та δ_P – середньоквадратичні цифрових приладів вимірювання відповідно опору R , струму i та потужності P ; σ_{np} – процесорна середньоквадратична обчислення середніх значень потужності втрат енергії в одній фазній обмотці статора, $\sigma_{np}^2 = \delta_i^2 + \delta_R^2$.

Поява тут похибок δ_R, δ_i та δ_P обумовлена тим, що величини енергій $W_{1ГП}(\omega_n, \omega_e)$ та $\Delta W_{1ГП}(\omega_n, \omega_e)$ будуть визначатися програмно в МПС чи ІВС як суми енергій трьох фаз в межах ω_n, ω_e за формулами

$$W_{1ГП}(\omega_n, \omega_e) = t_{zn} \sum_{m=1}^3 P_{mcp}(\omega_n, \omega_e),$$

$$\Delta W_{1ГП}(\omega_n, \omega_e) = t_{zn} \sum_{m=1}^3 R_m I_{mcp}^2(\omega_n, \omega_e),$$

де m – індекс та число фаз АД, $m = 1, 2, 3$; P_{mcp} та I_{mcp} – середні значення потужності та струму m -ї фази.

Приклади реалізації метода

Структурні схеми МПС та ІВС, в яких може реалізуватись запропонований метод наведені у [1,4,8...10, 18].

Робочий пристрій визначення моменту інерції АД може застосовувати цифрові прилади широкого вжитку з похибками $\delta_R = \delta_i = \delta_P = 10^{-2}\%$ [14, 16] та лазерний тахометр [17], $\sigma_\omega = 10^{-2}\%$. Проміжки часу $t_{zn} \geq 0,01$ с визначаються програмно в МПС, $\delta_i = 10^{-3}\%$. Отже, середньоквадратична похибка обчислення J в робочому пристрої

$$\sigma_p = \sqrt{8 \cdot 10^{-6} + 19 \cdot 10^{-4}} = \pm 0,044\% .$$

Таким чином, точність запропонованого методу реалізованого в робочому пристрої на порядок вища проти точності існуючих методів [2,4] та дослідних пристроїв визначення моменту інерції АД [2,4...7].

Зразковий засіб перевірки робочого пристрою в ДМЦ буде реалізовуватись цифровими приладами з похибками $\delta_R = \delta_i = \delta_P = 10^{-3}\%$, $\delta_i = 10^{-3}\%$ та тахометром АСТ-3 [17], $\sigma_\omega = 1,5 \cdot 10^{-3}\%$. Отже, похибка зразкового засобу в ДМЦ складає

$$\sigma_z = \sqrt{8 \cdot 10^{-6} + 21 \cdot 10^{-6}} = \pm 0,0054\%$$

і вимоги державних стандартів до зразкових засобів вимірювання 3-го розряду – задовольняються, $\sigma_p / \sigma_z = 8,2 > (3...5)$ [15, 16].

Зазначимо, що проблема перевірки робочих пристроїв визначення моменту інерції механізмів в ДМЦ ніколи в спеціальних джерелах інформації не розглядалась.

Резерви підвищення точності запропонованого методу існують в сучасній тенденції поступового підвищення рівня метрологічних показників цифрових засобів вимірювання параметрів електричного кола [10, 14, 16] та кутової швидкості [8, 17].

Запропонований метод інтервальної оцінки енергодії моменту інерції ротора АД в його динамічних режимах роботи і спосіб визначення інтервальних коефіцієнтів корисної дії АД [18, 19] створюють реальну основу для розробки нового методу інтервальної оцінки фізичної величини по її енергодії в певних межах динамічного процесу. Метод інтервальної оцінки наповнений змістом багаторазових спостережень вимірювальної фізичної величини знайде своє місце в класифікаційній схемі основних методів теорії вимірювань [16].

Висновки

1. Головна причина незадовільної точності існуючої методології побудови засобів вимірювання моменту інерції роторів АД [2...4] проявляється в традиційному поєднанні застарілих низько-точних муфто-важільних електромеханічних пристроїв навантаження АД [5...7, 9] із сучасними високоточними цифровими вимірювальними приладами [8, 10, 14, 16, 17] та комп'ютерною технікою [1, 10, 18].

2. Новий метод інтервальної оцінки енергодії параметрів АД, сутністю якого є вимірювання складових величин енергетичних балансів динамічних режимів роботи АД [19] реалізується в середовищі цифрової комп'ютерно-вимірювальної техніки [1,10,18] без застосування допоміжних електромеханічних пристроїв і тому (новий метод) має перспективу збільшення точності в існуючій тенденції підвищення рівня метрологічних показників цифрової вимірювальної техніки [8, 10, 14, 16, 17].

3. Новый метод интервальной оценки энергодѣи параметров АД може застосовуватись в системах контролю, діагностики і управління електроприводом складних промислових установок [1,13,15].

Література

1. Кучерук В.Ю. Елементи теорії побудови систем технічного діагностування електромоторів. Монографія. – Вінниця: Універсум – Вінниця, 2003. – 195 с.
2. Кухарчук В.В. Елементи теорії контролю динамічних параметрів електричних машин (монографія). – Вінниця: „Універсум – Вінниця”, 1998.-125 с.
3. Гернет М.М., Ротабыльський В.Ф. Определение моментов инерции. – М.: Машиностроение, 1969. – 355с.
4. Кучерук В.Ю., Кухарчук В.В., Дудикевич В.Б., Поджаренко В.О. Методологія побудови засобів вимірювання моменту інерції роторів електричних машин. // Проблеми створення нових машин і технологій. Наукові праці Кременчуцького державного політехнічного інституту.– 2000 – Випуск 1/ (8). – С.113-118.
5. Устройство нагрузки электрических двигателей. Россия, НИИФИ. Website: www.niifi.sura.ru. – 2003.
6. Стенд испытания асинхронных двигателей. Россия, „Космос-Нефть-Газ”, Website: www.knq.ru – 2003.
7. Прецезіонні перетворювачі статичного та динамічного крутного моменту в пропорційний електричний сигнал // Проспект фірми Lorenz Meßtechnik GmbH. Тел. 07172/3675 – 2003.
8. Поджаренко В.А. Системное проектирование тахометров. // Избыточные системы счисления, моделирование, обработка данных и системное проектирование в технике преобразования информации: Учеб. пособие. – К.: Вища.шк. 1990. - С.7-11.
9. Кучерук В.Ю. Спосіб визначення моменту опору електричних машин та пристрій для його реалізації. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 1999. - №3. - С.49-52.
10. Поджаренко В.О., Кухарчук В.В. Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка. – К: УМВК ВО, 1991. – 240 с.
11. Яворский Б.М. Справочник по физике.–М.: 1968.–940 с.
12. Радин В.И., Брускин Д.Э., Зохорович А.Е. Асинхронные машины. Учеб. для электромех. спец. вузов. – М.: Вышш.шк, 1988. – 328 с.
13. Ключев Л.И. Теория электропривода.– М: Энергия, 1989. – 660 с.
14. Мирский Г.Я. Электронные измерения: 4-е изд., перераб. и допол. – М: Радио и связь, 1986. – 440 с.
15. Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. Навчальний посібник. – Вінниця: Велес, 2001. – 219 с.
16. Метрология и радиоизмерения. Под ред. проф. В.И. Нефёдова. – М.: “Высшая школа” 2003. – 526 с.
17. Лазерный тахометр 0,1 ... 10000 об/хв \pm 0,01%; Тахометр АСТ – 3, 5...10000 об/хв \pm 0,0015%, фірма MONARCH INSTRUMENT, USA. Website: www.monarchinstrument.com. 2003.
18. Поджаренко В.О., Гоменюк Д.А. Спосіб визначення інтервальних коефіцієнтів корисної дії асинхронних двигунів.// Патент на корисну модель № 12517. Бюл. №2., 15.02.2006.
19. Поджаренко В.О., Гоменюк Д.А. Інтервальні коефіцієнти корисної дії асинхронних двигунів.// Вісник технологічного університету Поділля. –2005.– №4, ч. 2.