

РОЗВИТОК ЧАСТОТНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

¹Вінницький національний технічний університет, e-mail: kucheruk@mail.ru

²Вінницьке виробничо-комерційне підприємство «Техногаз»

В роботі пропонуються шляхи підвищення точності при визначенні моментних характеристик електричних машин. Наведені результати математичного моделювання законів змінення кутової швидкості в режимі самогальмування. Моделювання виконано для різних залежностей моменту опору від кутової швидкості, якими характеризуються різні типи електричних машин. Це дає змогу для вимірювання моментних характеристик використовувати наперед визначену залежність моменту опору від кутової швидкості. На відміну від існуючих, даний метод не потребує використання операції диференціювання кутової швидкості. Наведено також метод визначення залежності моменту механічного опору на валу від кутової швидкості.

Постановка проблеми. До моментних характеристик електричних машин (ЕМ) згідно рівняння моментів відносяться динамічний момент, момент інерції ротора, момент механічного опору на валу. Момент інерції ротора ЕМ – один із важливих ДП, який визначає його динамічні властивості [1], оскільки він є невід’ємною складовою при визначенні динамічного моменту $M_d(t) = M_{em}(t) + M_0(t)$ ($M_{em}(t)$, $M_0(t)$ - залежності електромагнітного моменту та моменту механічного опору від часу відповідно) та динамічної механічної характеристики $M_d(\omega_r)$, де ω_r - кутова швидкість ротора ЕМ.

Але у довідниках на ЕМ він не завжди вказується. Крім того, у відповідності із ДЕСТ 16264.0-85 момент інерції ротора може мати великі відхилення від номінального значення ($\pm 10\%$). При проектуванні різноманітних електроприводів і систем автоматики, виробництві ЕМ розробників часто цікавлять точні значення моменту інерції ЕМ (а іноді і в зборі з виконавчими механізмами), оскільки вони визначають швидкодію і тепловий режим роботи ЕМ. Визначити момент інерції ротора чи всього вузлу, що обертається, можна розрахунковим та експериментальним шляхом.

Розрахунки моменту інерції ЕМ є кропіткими і трудомісткими із-за неоднорідності матеріалів та складної геометричної форми ротора ЕМ. Вони не відзначаються високою точністю і використовуються рідко.

Більш розповсюджені є експериментальні методи [1-4]: *допоміжного маятника, крутильних коливань, самогальмування, короткого замикання.*

Недоліками методу допоміжного маятника є те, що він не відрізняється високою точністю, тому що важко визначити відстань центру ваги маятника від осі обертання, оскільки при цьому повинна бути врахована маса важеля. Ротор повинен бути добре відбалансований, так як його невірноваженість спотворює результати вимірів. За періодом T коливань маятника знаходять момент інерції $J = (GaT^2)/(4\pi^2)$, де G – вага ротора; a – відстань центра тяжіння від осі обертання.

При використанні методу крутильних коливань ротор підвішують на пружній проволочі і приводять в крутильний коливальний рух. При цьому визначається період малих коливань, який потім порівнюється із періодом коливань еталонного тіла з відомим моментом інерції $J = J_s \cdot (T_x/T_s)^2$, де J_s - момент інерції взірцевого тіла; T_s - період коливань взірцевого тіла; T_x - період коливань ротора, момент інерції якого визначають.

Вимагається, щоб перед дослідом ротор був відбалансованим і точка підвісу знаходилась точно на осі обертання. Якщо точка підвісу буде зміщена з осі обертання, то підвищується похибка визначення моменту інерції. Основні недоліки цього методу такі: необхідність розбору ЕМ та значна трудомісткість проведення дослідів.

Метод самогальмування вимагає попереднього визначення механічних втрат (наприклад, з дослідів холостого ходу). Недоліком цього методу є те, що механічні втрати визначаються як

константа, коли в дійсності вони є функцією від кутової швидкості. Це обумовлює низьку точність визначення моменту інерції роторів ЕМ методом самогальмування.

З метою розширення функціональних можливостей (як в умовах сертифікації і технічної діагностики, так і в умовах реальної експлуатації ЕМ в системах автоматики) в [5-8] запропоновано вдосконалення методу самогальмування, в якому вимірюють спочатку кутове прискорення самогальмування ротора ξ_{r1} , а потім кутове прискорення самогальмування ξ_{r2} із взірцевим моментом інерції J_3 . Взірцевий задавач моменту інерції виконаний у вигляді простого тіла обертання, наприклад, диску чи циліндру. Момент інерції J_3 визначають за його геометричними та ваговими параметрами. Рівняння руху ЕМ із взірцевим задавачом моменту інерції та без нього мають вигляд:

$$\begin{cases} 0 = M_0(\omega_r) + M_{ВП}(\omega_r) + (J(\omega_r) + J_{ВП}(\omega_r)) \cdot \xi_{r1}(\omega_r); \\ 0 = M_0(\omega_r) + M_{ВП}(\omega_r) + (J(\omega_r) + J_{ВП}(\omega_r) + J_3(\omega_r)) \cdot \xi_{r2}(\omega_r), \end{cases} \quad (1)$$

де $M_{ВП}$ - момент механічних втрат вхідного валу вимірювального перетворювача; $J_{ВП}$ - момент інерції вхідного валу ВП.

Всі вищеперераховані величини представлені як функції від кутової швидкості ω_r . З рівнянь (1) при умовах $J_{ВП} \ll J$ та $M_{ВП} \ll M_0$ знаходять

$$J(\omega_r) = J_3 \cdot \frac{\xi_{r1}(\omega_r)}{\xi_{r2}(\omega_r) - \xi_{r1}(\omega_r)}, \quad M_0(\omega_r) = J_3 \cdot \frac{\xi_{r1}(\omega_r) \cdot \xi_{r2}(\omega_r)}{\xi_{r2}(\omega_r) - \xi_{r1}(\omega_r)}. \quad (2)$$

Відзначимо, що даний метод дозволяє також визначити залежність $M_0(\omega_r)$. Визначення моменту інерції зводиться до вимірювання кутової швидкості ω_r , цифрового диференціювання $\xi = d\omega_r/dt$, згладжування результатів диференціювання та опосередкованого визначення моменту інерції.

Суттєвим недоліком засобів вимірювання моменту інерції, які реалізують даний метод, є значна похибка, що виникає за рахунок операції диференціювання експериментальних даних з виходу сенсора кутової швидкості. Отже, виникає необхідність розробки таких методів вимірювання моменту інерції ротора, в яких відсутня операція цифрового диференціювання експериментальних даних $d\omega_r/dt$.

Цілі дослідження. Відповідно до цього, метою статті є визначення законів змінення кутової швидкості ЕМ в режимі самогальмування, що дає змогу суттєво підвищити точність визначення моменту інерції роторів ЕМ за рахунок усунення операція цифрового диференціювання експериментальних даних $d\omega_r/dt$.

Виклад основного матеріалу. В режимі самогальмування кутова швидкість знаходиться із розв'язку диференціального рівняння руху ротора

$$J \cdot d\omega_r/dt = -M_0(\omega_r). \quad (3)$$

Для опису залежності моменту сил опору від параметрів руху використовуються моделі [9].

В обмеженому діапазоні кутових швидкостей можна вважати, що момент опору лінійно пов'язаний з кутовою швидкістю

$$M_0(\omega_r) = a \cdot \omega_r, \quad (4)$$

де a – тангенс кута нахилу усередненої характеристики опору.

Тоді аналітичний розв'язок диференціального рівняння (3)

$$J \cdot d\omega_r/dt = -a \cdot \omega_r \text{ при } \omega_r(0) = \omega_{ном}, \omega_r \in [\omega_{ном} \dots 0] \quad (5)$$

має вигляд

$$\omega_r(t) = \omega_{ном} \cdot \exp\left(-\frac{at}{J}\right). \quad (6)$$

При лінійній апроксимації ділянки характеристики $M_0(\omega_r)$ поблизу робочої кутової швидкості $\omega_{ном}$ в лінійній моделі враховується також постійна складова моменту опору M_{const}

$$M_0(\omega_r) = M_{const} + a(\omega_r - \omega_{ном}). \quad (7)$$

Тоді аналітичний розв'язок диференціального рівняння

$$J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = -(M_{const} + a(\omega_r - \omega_{ном})) \quad (8)$$

при $\omega_r(0) = \omega_{ном}$, $\omega_r \in [\omega_{ном} \dots 0]$ має вигляд

$$\omega_r(t) = \omega_{ном} - \frac{M_{const}}{a} \left(1 - \exp\left(-\frac{at}{J}\right) \right). \quad (9)$$

У широкому діапазоні зміни кутових швидкостей момент опору пов'язаний з кутовою швидкістю залежністю, наближеною до квадратичної

$$M_0(\omega_r) = b \cdot \omega_r^2. \quad (10)$$

При цьому аналітичний розв'язок рівняння

$$J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = -b \cdot \omega_r^2 \text{ при } \omega_r(0) = \omega_{ном}, \quad \omega_r \in [\omega_{ном} \dots 0] \quad (11)$$

матиме вигляд

$$\omega_r(t) = \frac{J}{bt + J/\omega_{ном}}. \quad (12)$$

Узагальненням моделей самогальмування (4), (7), (10) може слугувати модель

$$M_0(\omega_r) = M_n + (M_{ном} - M_n) \left(\frac{\omega_r}{\omega_{ном}} \right)^n, \quad (13)$$

де n – показник, що залежить від конструкції механізму; $n = 1 \div 2$.

При $n=1$ аналітичний розв'язок рівняння (3)

$$J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = - \left[M_n + (M_{ном} - M_n) \left(\frac{\omega_r}{\omega_{ном}} \right) \right] \quad (14)$$

матиме вигляд

$$\omega_r(t) = \frac{\omega_{ном}}{M_{ном} - M_n} \cdot \left(M_{ном} \cdot e^{-\frac{M_{ном} - M_n}{J \cdot \omega_{ном}} t} - M_n \right), \quad \omega_r(t) \in [\omega_{ном} \dots 0]. \quad (15)$$

При $n=2$ аналітичний розв'язок рівняння (3)

$$J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = - \left[M_n + (M_{ном} - M_n) \left(\frac{\omega_r}{\omega_{ном}} \right)^2 \right] \quad (16)$$

матиме вигляд

$$\omega_r(t) = -\omega_{ном} \sqrt{\frac{M_n}{M_{ном} - M_n}} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{M_n (M_{ном} - M_n)}{\omega_{ном} J} - \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{M_{ном} - M_n}{M_n}} \right) \right), \quad (17)$$

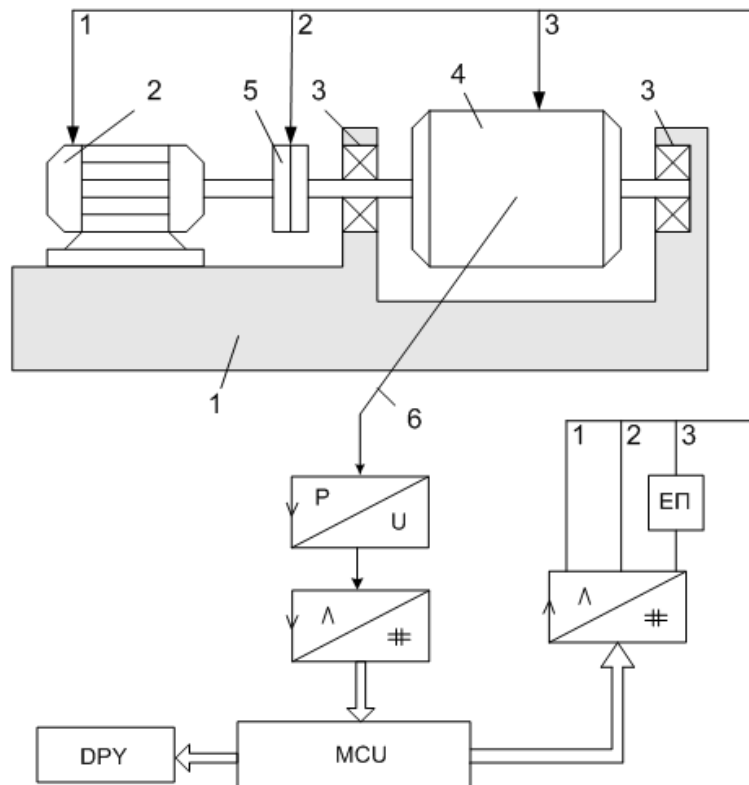
$$\omega_r(t) \in [\omega_{ном} \dots 0].$$

За допомогою аналітичних перетворень розв'язків диференціального рівняння (3) для моделей $M_0(\omega_r)$ (4), (7), (10), (15), (17) можна отримати вирази для моменту інерції ротора J . Всі отримані вирази зведені в таблиці 1. Значення моменту інерції J усереднюються на розглядуваному проміжку часу t або кутова швидкість $\omega_r(t)$ перераховується в кут повороту ротора $\alpha_r(t)$ і знаходяться $J(\alpha_r)$.

Для визначення залежності $M_0(\omega_r)$ використовується такий метод [10] (рис. 1). Пристрій вміщує основу 1, на якій закріплений об'єкт дослідження (ОД) 2 і балансірно в підшипниках 3 привідний асинхронний двигун 4. Вали ОД і привідного двигуна можуть з'єднуватися і роз'єднуватися електромагнітною муфтою 5, яка жорстко встановлена на вихідному валі привідного двигуна 4. Сенсор зусилля 6 механічно з'єднаний за допомогою вимірювального важеля 7 із статором привідного двигуна 4. Інформаційно-вимірювальна система включає в себе мікроконтролер МСУ, цифро-аналоговий перетворювач, електропривід ЕП, сенсор зусилля. Вимірювання здійснюються таким чином.

Формули для визначення моменту інерції

Модель самогальмування	Момент інерції
1.Лінійна:	$\hat{j} = \frac{at}{\ln\left(\frac{\omega_{ном}}{\omega_r(t)}\right)}$
2.Лінеаризована поблизу робочої точки:	$\hat{j} = \frac{at}{\ln\left((\omega_r(t) - \omega_0) \cdot \frac{a}{M_{const}} + 1\right)}$
3.Квадратична:	$\hat{j} = \frac{\omega_r(t)bt}{1 - \frac{\omega_r(t)}{\omega_{ном}}}$
4.Узагальнена (n=1):	$\hat{j} = \frac{(M_{ном} - M_{\Pi})}{\ln\left(\frac{M_{ном}}{\frac{\omega_r(t)}{\omega_{ном}}(M_{ном} - M_{\Pi}) + M_{\Pi}}\right)}$
5.Узагальнена (n=2):	$\hat{j} = \frac{M_{\Pi}(M_{ном} - M_{\Pi})t}{\omega_{ном} \cdot \arctg\left(\frac{\omega_r(t) - \omega_{ном}}{\omega_r(t) \sqrt{\frac{M_{ном} - M_{\Pi}}{M_{\Pi}}} + \omega_{ном} \sqrt{\frac{M_{\Pi}}{M_{ном} - M_{\Pi}}}}\right)}$

Рис. 1. Структурна схема інформаційно-виміральної системи для визначення залежності $M_0(\omega_r)$

Частотно-регулюючий електропривід ЕП дозволяє проводити зміну кутової швидкості обертання $\omega_r \in [0 \dots \omega_{ном}]$ привідного двигуна 4. Як привідний двигун 4 використовується асинхронний двигун. Мікроконтролер MCU через цифро-аналоговий перетворювач керує з'єднанням та роз'єднанням напівмуфт електромагнітної муфти 5; через електропривід ЕП змінює частоту обертання привідного двигуна 4; через сенсор зусилля проводить вимірювання моментів. Принцип дії пристрою ілюстрований на рис. 2.

Перший крок. ОД 2 знеструмлений і механічно не зв'язаний із валом привідного двигуна 4. Обертання привідного двигуна 4 у всьому діапазоні $\omega_r \in [0 \dots \omega_{ном}]$ на протязі часу $t \in [0 \dots t_1]$ при роз'єднаній електромагнітній муфті 5. При цьому на роботу пристрою впливають дисипативні сили $\Delta Q_{C1}(\omega_r)$ (сума сил тертя в підшипниках привідного двигуна 4 і в підшипниках 3). Ці сили $\Delta Q_{C1}(\omega_r)$ створюють момент опору $M_1(\omega_r) = M_{ИД}(\omega_r)$ відносно вісі ротора привідного двигуна 4, який передається на його статор і за допомогою вимірювального важеля 7 з довжиною плеча L діє на сенсор зусилля. На виході останнього з'являється напруга, пропорційна силі опору $\Delta Q_{C1}(\omega_r)$, яка через аналого-цифровий перетворювач записується у пам'ять мікроконтролера.

Другий крок. З'єднання напівмуфт електромагнітної муфти 5 при $t \in [t_1 \dots t_2]$ і очікування кінця перехідного процесу.

Третій крок. ОД 2 знеструмлений і механічно зв'язаний із валом привідного двигуна 4. Обертання привідного двигуна 4 у всьому діапазоні $\omega_r \in [\omega_{ном} \dots 0]$ на протязі часу $t \in [t_2 \dots t_3]$ при з'єднаній електромагнітній муфті 5. При цьому на роботу пристрою впливають дисипативні сили $\Delta Q_{C2}(\omega_r)$ (сума сил тертя в підшипниках привідного двигуна 4, в підшипниках 3 і моменту опору ОД). Ці сили $\Delta Q_{C2}(\omega_r)$ створюють момент опору $M_1(\omega_r) = M_{ИД}(\omega_r) + M_0(\omega_r)$ відносно вісі ротора привідного двигуна 4, який передається на його статор і за допомогою вимірювального важеля 7 з довжиною плеча L діє на сенсор зусилля. На виході останнього з'являється напруга, пропорційна силі опору $\Delta Q_{C2}(\omega_r)$, яка через АЦП записується у пам'ять мікроконтролера.

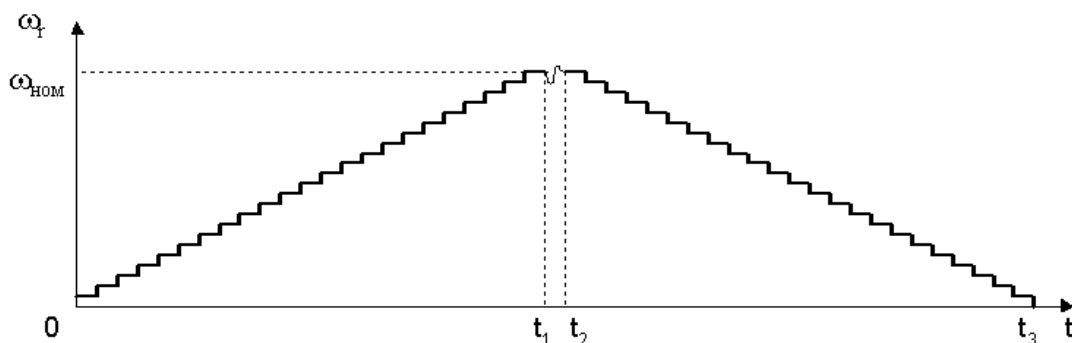


Рис. 2. До пояснення визначення залежності $M_0(\omega_r)$

Для виключення похибок, пов'язаних із нерівномірністю швидкості обертання валу привідного двигуна 4, проводиться п вимірювань і усереднення сил $\Delta Q_{C1i}(\omega_r)$, $\Delta Q_{C2i}(\omega_r)$ за період квантування i . Ці значення записуються у пам'ять мікроконтролера.

По закінченні вимірювань проводяться обчислення залежності $M_0(\omega_r)$

$$M_0(\omega_r) = M_2(\omega_r) - M_1(\omega_r). \quad (18)$$

Таким чином, можна запропонувати таку послідовність роботи засобу вимірювання моменту інерції ротору ЕМ:

1. Визначення моменту опору $M_0(\omega_r)$.

2. Апроксимація вимірної залежності $M_0(\omega_r)$ і вибір найбільш придатної моделі $M_0(\omega_r)$ із варіантів (4), (7), (10), (15), (17) за критерієм мінімізації середньоквадратичної похибки апроксимації.

Залежно від обраної моделі, проводиться обчислення моменту інерції з наступним його усередненням.

Структурну схему для реалізації запропонованого способу вимірювання моменту інерції наведено на рис. 1. Мікропроцесорна система MPU проводить спільні виміри кутової швидкості ω_r і часу t , які необхідні для визначення моменту інерції.

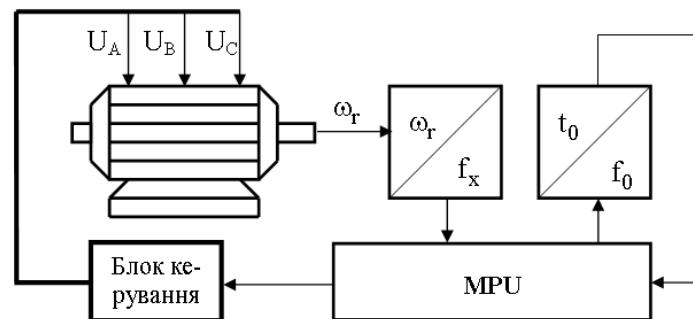


Рис. 3. Структурна схема засобу вимірювання для реалізації частотного методу

Висновки. Для вимірювання моменту інерції запропоновано використовувати наперед визначену залежність моменту опору від кутової швидкості. На відміну від існуючих, даний метод не потребує використання операції диференціювання кутової швидкості, що дозволяє суттєво підвищити точність визначення моментних характеристик.

Список літературних джерел

1. Потапов Л.А., Зотин В.Ф. Испытание микроэлектродвигателей в переходных режимах. – М.: Энергоатомиздат, 1986. –104с.
2. Гернет М.М., Ратобильский В.Ф. Определение моментов инерции. – М.: Машиностроение, 1985. –248с.
3. В.В.Кухарчук Элементы теории контролю динамических параметров электрических машин (монография). – Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 1998. –125с.
4. Кучерук В.Ю., Кухарчук В.В., Дудикевич В.Б., Поджаренко А.В. Методология построения средств измерения момента инерции роторов электрических машин //Проблеми створення нових машин і технологій. Наукові праці Кремен-чущького державного політехнічного інституту.- Випуск 1/2000 (8). - С.113-118.
5. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю. Інформаційно-вимірювальна система механічних характеристик електричних машин// Матеріали докладов міжнародних академічних читинь "Новые технологии, материалы, оборудование (исследования, разработки, внедрение)". - Киев.- 1995.- С.85-91.
6. Podzharenko V.A., Kucheruk V.Yu. Computer-Measuring System of the Mechanical Characteristics of Electrical Drives// Int. Conf. «Electrical Drives and Power Electronics» EDPE'96.- Proceeding volumes 2.- High Tatras (Slovakia).- P.633-637.
7. Kucheruk V.Yu., Podzharenko A.V. Computer-Measuring System for rotor balancing of Electromechanical Systems// Second Int. Scientific Conf. «Unconventional Electromechanical and Electro-technical Systems» UEES'96.- Proceeding volumes 2.- 1996.- Szczecin (Poland).- P.483-488.
8. Кучерук В.Ю., Поджаренко В.О. До питання про визначення моментів інерції електричних машин// Мат. НТК "Современная контрольно-испытательная техника промышленных изделий и их сертификация".- Вып. 1.- Том 2.- Мукачево. - 1997. - С.166-168.
9. Г.Д.Бондаренко Повышение точности определения параметров неуравновешенности роторов при балансировке на выбеге //Автоматизация и современные технологии. - 1995. - №6. - С.15-19.
- 10.Кучерук В.Ю. Спосіб визначення моменту опору електричних машин та пристрій для його реалізації// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. - №3. – С.49-52.