

УДК 621.3:658.562

АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ МАШИН

Поджаренко В.О., Кухарчук В.В., Кулаков П.І.

Вінницький державний технічний університет, кафедра «Метрології та промислової автоматики»,
м.Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, 286021, Україна

Анотація. В статті систематизовано математичні моделі вимірювального перетворення кутової швидкості, пускового моменту, моменту інерції, динамічного моменту асинхронних машин, які дозволять розв'язати задачу аналізу та синтезу засобів контролю даних параметрів в дослідах холостого ходу та короткого замикання.

Аннотация. В статье систематизировано математические модели измерительного преобразования угловой скорости, пускового момента, момента инерции, динамического момента асинхронных машин, которые позволят решить задачу анализа и синтеза средств контроля данных параметров в опытах холостого хода и короткого замыкания.

Abstract. In clause is systematized mathematical models of measuring conversion of angular speed, starting moment, moment of inertia, dynamic moment of asynchronous machines, which will allow to decide the task of the analysis and synthesis of control tools of data of parameters in experiences of a single course and short closure.

ВСТУП

В структурі вимірювального перетворювача електрична машина розглядається у вигляді ідеалізованого двигуна. Його ротор не володіє масою та механічною інерцією, не має механічних втрат енергії і жорстко з'єднаний з реальним фізичним ротором, що відноситься до механічної частини перетворювача. Такий двигун представляється електромеханічним багатополюсником, що містить n пар електричних виводів за кількістю обмоток і одну пару механічних виводів. На механічних виводах в результаті електромеханічного перетворення енергії для швидкості ω розвивається електромагнітний момент $M_{\text{эм}}$. Момент $M_{\text{эм}}$ є вихідною величиною двигуна і вхідною для механічної частини перетворювача. Механічні змінні $M_{\text{эм}}$ і ω зв'язують електродвигун з механічною частиною вимірювального перетворювача в єдину взаємопов'язану систему.

В теперішній час для моделювання вимірювального перетворення параметрів електричних машин найчастіше застосовують систему диференціальних рівнянь асинхронного двигуна, що має вигляд [1]:

$$\begin{cases}
\frac{dI_{r\alpha}(t)}{dt} = k(L_m(-U_{s\alpha}(t) + R_s I_{s\alpha}(t)) - L_s(R_r I_{r\alpha}(t) + \omega_r(t)(L_r I_{r\beta}(t) + L_m I_{s\beta}(t))); \\
\frac{dI_{r\beta}(t)}{dt} = k(L_m(-U_{s\beta}(t) + R_s I_{s\beta}(t)) - L_s(R_r I_{r\beta}(t) - \omega_r(t)(L_r I_{r\alpha}(t) + L_m I_{s\alpha}(t))); \\
\frac{dI_{s\alpha}(t)}{dt} = k(L_r(U_{s\alpha}(t) - R_s I_{s\alpha}(t)) + L_m(R_r I_{r\alpha}(t) + \omega_r(t)(L_r I_{r\beta}(t) + L_m I_{s\beta}(t))); \\
\frac{dI_{s\beta}(t)}{dt} = k(L_r(U_{s\beta}(t) - R_s I_{s\beta}(t)) + L_m(R_r I_{r\beta}(t) - \omega_r(t)(L_r I_{r\alpha}(t) + L_m I_{s\alpha}(t))); \\
\frac{d\omega_r(t)}{dt} = \frac{p}{J} \cdot (M_{\text{эм}}(t) - M_o(t)); \quad k = \frac{1}{L_r L_s - L_m^2}; \\
M_{\text{эм}}(t) = 0.5 mpL_m [I_{s\beta}(t)I_{r\alpha}(t) - I_{r\beta}(t)I_{s\alpha}(t)]
\end{cases} \quad (1)$$

де $U_{s\alpha} = \sqrt{2}U_{\text{нф}} \cos(\omega t)$; $U_{s\beta} = \sqrt{2}U_{\text{нф}} \sin(\omega t)$; p - кількість пар полюсів; R_s, R_r, L_s, L_r - активні і реактивні опори, відповідно, статора і ротора; L_m - індуктивний опір, зумовлений взаємною індуктивністю обмоток статора і ротора; $M_{\text{эм}}$ - електромагнітний обертальний момент; M_o - момент опору (навантаження); ω_r - кутова швидкість ротора; J - момент інерції ротора та навантаження, що обертається разом з ним.

Модель (1) вибираємо в якості вихідної для моделювання таких найбільш важливих динамічних параметрів асинхронних машин (об'єкт контролю), як кутова швидкість, пусковий момент, момент інерції, динамічний момент.

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

В залежності від *величини моменту опору* на валу об'єкта контролю (ОК) мають місце суттєво різні фізичні процеси, що значно впливають на підходи до розробки математичних моделей засобів контролю.

Якщо ротор ОК загальмовано ($M_o \Rightarrow \infty$), а до обмоток статора підведена симетрична напруга номінальної частоти, то має місце дослід короткого замикання (КЗ). Для виконання КЗ в повному обсязі [2] необхідно виконати наступну послідовність дій. Проводять сумісні вимірювання залежності пускового $M_{\text{п}}$ моменту в функції кута повороту ротора α . Визначають екстремальне значення $M_{\text{н min}}$ і відповідний йому кут повороту ротора α_k . Далі встановлюють ротор випробуваного двигуна в кутове положення α_k з мінімальним пусковим моментом M_k і виконують сумісні вимірювання цього параметра в функції напруги живлення U_k .

Отже, відомі моделі вимірювального перетворення пускового моменту в залежності від *виду інформативного параметра*, можна розділити на дві групи: вимірювання залежності $M_{\text{п}} = f(\alpha)$ для отримання первинної вимірювальної інформації з метою визначення

мінімального пускового моменту M_k ; вимірювання залежності пускового моменту в функції напруги живлення $M_k = f(U_k)$ у кутовому положенні з мінімальним пусковим моментом.

Умовами досліду холостого ходу (XX) є практична відсутність моменту опору ($M_o \Rightarrow 0$) на роторі електричної машини та заживленість обмоток її статора напругою номінальної частоти.

За *видом інформативного параметра* в даному досліді необхідно виділити моделі вимірювального перетворення: кутової швидкості; моменту інерції; динамічного моменту.

За *архітектурою побудови* моделі вимірювального перетворення кутової швидкості поділяються на аналогові та дискретні, підходи до побудови яких суттєво впливають на синтез структурних схем та оцінку метрологічних характеристик тахометрів.

Вимірювальне перетворення моменту інерції може бути здійснено за методом крутильних коливань, допоміжного маятника, самогальмування, вільних крутильних коливань.

Функції перетворення динамічного моменту суттєво відрізняються в залежності від способу вимірювання - прямого або опосередкованого. В теперішній час найбільш розповсюдженим є опосередкований метод вимірювання M_d за відомою аналітичною залежністю $M_d = J_r \cdot (d\omega_r/dt)$.

Отже, запропонована класифікація математичних моделей вимірювального перетворення містить в собі всі необхідні в теперішній час моделі для вирішення проблеми розробки та практичної реалізації автоматизованих засобів контролю найбільш важливих вихідних параметрів електродвигунів. Розглянемо більш детально відомі теоретичні підходи до принципів побудови таких моделей.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ

Динамічний характер процесу вимірювання, широка номенклатура об'єктів контролю та їх конструктивні особливості вимагають особливого підходу до розробки вимірювального перетворення такого важливого параметра, як кутова швидкість.

Найбільш суттєвими елементами вимірювального перетворювача кутової швидкості ротора є об'єкт контролю, муфта спряження та сенсор кутової швидкості. Сенсор кутової швидкості перетворює вхідну неелектричну величину в електричну (частоту або напругу), що визначає архітектуру побудови аналого-цифрового перетворювача. В теперішній час більш перспективним є напрямок [3-5] перетворення кутової швидкості ω в частоту f за допомогою фотоелектричного вимірювального перетворювача, в якому здійснюється така послідовність вимірювального перетворення:

$$\omega_r(t) \Rightarrow \omega_m(t) \Rightarrow f_{\phi c} = [\omega_m(t) \cdot z]/2\pi \Rightarrow N_x(t) = (f_0 \cdot 2\pi)/[\omega_m(t) \cdot z].$$

Кутова швидкість $\omega_r(t)$ від об'єкта контролю передається на муфту [8]

$$\begin{cases} \frac{d\omega_r(t)}{dt} = \frac{M_e(t) - c \cdot [\varphi_r(t) - \varphi_m(t)] - b \cdot [\omega_r(t) - \omega_m(t)]}{J_r}; & \frac{d\varphi_r(t)}{dt} = \omega_r(t); \\ \frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{-M_0 + c \cdot [\varphi_r(t) - \varphi_m(t)] + b \cdot [\omega_r(t) - \omega_m(t)]}{J_m}; & \frac{d\varphi_m(t)}{dt} = \omega_m(t), \end{cases} \quad (2)$$

потім на фотоелектричний сенсор

$$f_{\phi c} = \frac{\omega_M(t) \cdot z}{2\pi}, \quad (3)$$

і на виході цифрового частотоміра отримують двійковий код (вихідну величину)

$$N_X(t) = \frac{f_0 \cdot 2\pi}{\omega_M(t) \cdot z}. \quad (4)$$

Тому математична модель такого вимірювального перетворення має вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{r\alpha}(t)}{dt} = k(L_m(-U_{s\alpha}(t) + R_s I_{s\alpha}(t)) - L_s(R_r I_{r\alpha}(t) + \omega_r(t)(L_r I_{r\beta}(t) + L_m I_{s\beta}(t))); \\ \frac{dI_{r\beta}(t)}{dt} = k(L_m(-U_{s\beta}(t) + R_s I_{s\beta}(t)) - L_s(R_r I_{r\beta}(t) - \omega_r(t)(L_r I_{r\alpha}(t) + L_m I_{s\alpha}(t))); \\ \frac{dI_{s\alpha}(t)}{dt} = k(L_r(U_{s\alpha}(t) - R_s I_{s\alpha}(t)) + L_m(R_r I_{r\alpha}(t) + \omega_r(t)(L_r I_{r\beta}(t) + L_m I_{s\beta}(t))); \\ \frac{dI_{s\beta}(t)}{dt} = k(L_r(U_{s\beta}(t) - R_s I_{s\beta}(t)) + L_m(R_r I_{r\beta}(t) - \omega_r(t)(L_r I_{r\alpha}(t) + L_m I_{s\alpha}(t))); \\ \frac{d\omega_r(t)}{dt} = \frac{p}{J} \cdot (M_{\gamma^*}(t) - M_o(t)); \quad k = \frac{1}{L_r L_s - L_m^2}; \\ M_{\gamma^*}(t) = 0.5 mpL_m [I_{s\beta}(t)I_{r\alpha}(t) - I_{r\beta}(t)I_{s\alpha}(t)]; \\ \frac{d\varphi_r(t)}{dt} = \frac{M_{\gamma^*}(t) - c \cdot [\varphi_r(t) - \varphi_m(t)] - b \cdot [\omega_r(t) - \omega_m(t)]}{J_r}; \quad \frac{d\varphi_r(t)}{dt} = \omega_r(t); \\ \frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{-M_o + c \cdot [\varphi_r(t) - \varphi_m(t)] + b \cdot [\omega_r(t) - \omega_m(t)]}{J_m}; \quad \frac{d\varphi_m(t)}{dt} = \omega_m(t); \\ N_X(t) = \frac{f_0 \cdot 2\pi}{\omega_M(t) \cdot z}, \end{array} \right. \quad (5)$$

де J_r - момент інерції ротора і фотоелектричного сенсора; J_m - момент інерції муфти спряження; $\omega_r(t)$ - швидкість обертання ротора; $\omega_m(t)$ - швидкість обертання муфти; c - коефіцієнт жорсткості муфти; b - коефіцієнт демпфування муфти; $\varphi_r(t)$ - кут повороту ротора; $\varphi_m(t)$ - кут повороту муфти, z - розрізнявальна здатність фотоелектричного сенсора.

Дане рівняння перетворення являє собою систему жорстких нелінійних рівнянь, розв'язування яких можна виконати лише чисельними методами (рис.1), наприклад, методом Рунге-Кутта в середовищі символічної математики Maple V4 [6]. Дана обставина не дозволяє отримати динамічні метрологічні характеристики засобу вимірювання, що робить неможливим в повній мірі реалізувати задачу аналізу цифрових тахометрів для динамічних вимірювань кутової швидкості. Оскільки кутова швидкість є вихідним параметром для визначення моменту інерції (в режимі самогальмування) та динамічного моменту (опосередкований метод), то виникає необхідність розробки більш придатних математичних моделей для розв'язування задачі аналізу та синтезу засобів контролю моменту інерції і динамічного моменту, прямих методів вимірювання даних інформативних параметрів.

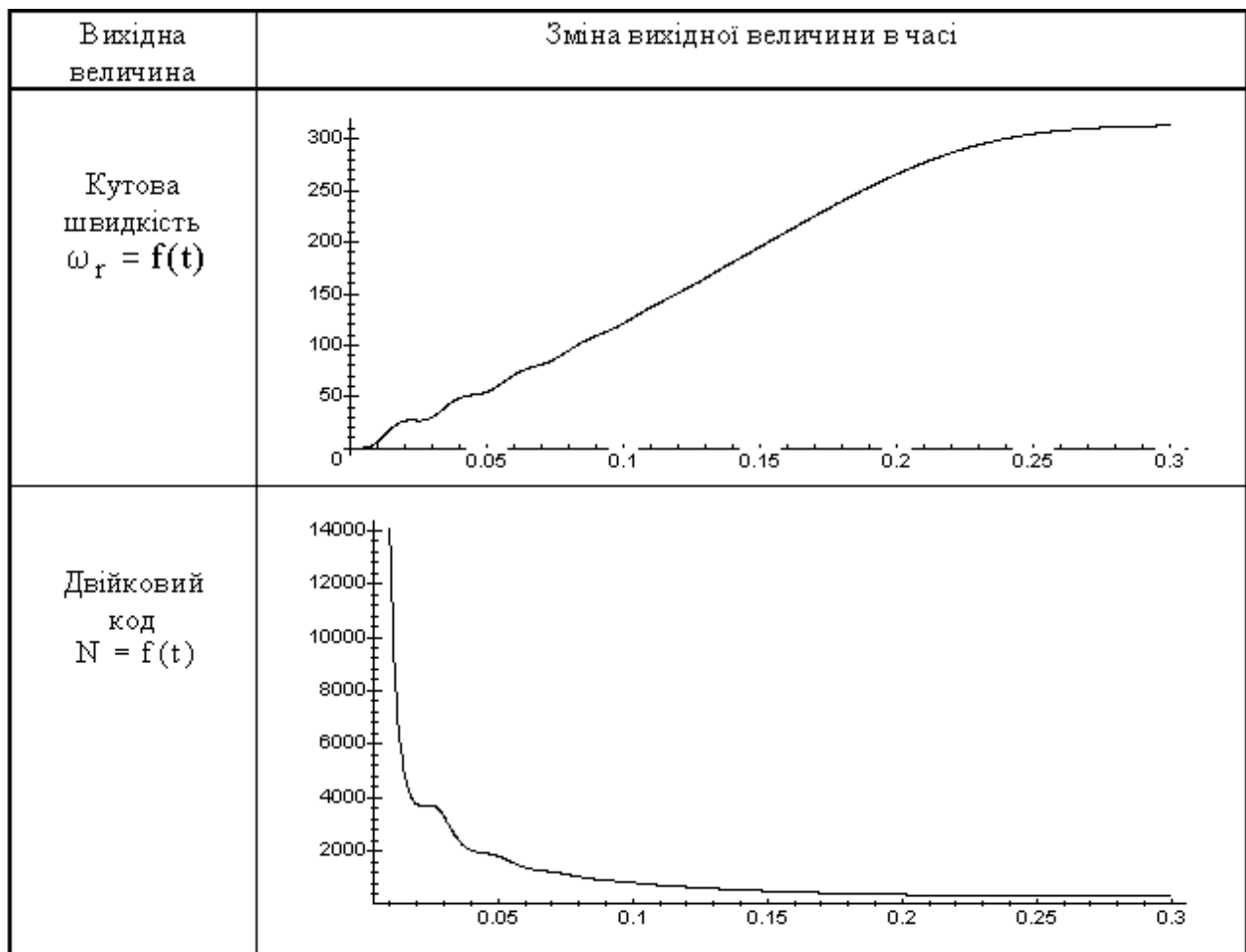


Рис. 1. До питання вимірювального перетворення кутової швидкості

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ПУСКОВОГО МОМЕНТУ

Пусковий момент визначають в досліді короткого замикання, для здійснення якого необхідно перш за все виміряти залежність пускового моменту в функції кутового положення ротора. Дана залежність є вихідною для визначення екстремального значення моменту і кутового положення ротора, що відповідає йому. Після встановлення ротора в дане кутове положення починається вимірювання залежностей досліді короткого замикання. Аналіз наведеної раніше послідовності перетворень показує, що автоматизація цієї процедури неможлива без математичного моделювання вимірювального перетворення пускового моменту.

В структурній схемі вимірювального перетворення M_n , в якій ротор об'єкта контролю за допомогою муфти спряження здійснює рівномірне обертання від приводного двигуна, на корпусі якого закріплено вимірювальний важіль. Приводний двигун складається із хвильового редуктора та асинхронного приводу. Об'єкт контролю у вимірювальному перетворювачі закріплено жорстко, а приводний двигун встановлено балансірно.

Математична модель вимірювального перетворення пускового моменту наведена в [7] і має вигляд

$$\begin{cases}
 \frac{dI_{r\alpha}(t)}{dt} = k(L_m(-U_{s\alpha}(t) + R_s I_{s\alpha}(t)) - L_s(R_r I_{r\alpha}(t) + n_r(t)(L_r I_{r\beta}(t) + L_m I_{s\beta}(t))); \\
 \frac{dI_{r\beta}(t)}{dt} = k(L_m(-U_{s\beta}(t) + R_s I_{s\beta}(t)) - L_s(R_r I_{r\beta}(t) - n_r(t)(L_r I_{r\alpha}(t) + L_m I_{s\alpha}(t))); \\
 \frac{dI_{s\alpha}(t)}{dt} = k(L_r(U_{s\alpha}(t) - R_s I_{s\alpha}(t)) + L_m(R_r I_{r\alpha}(t) + n_r(t)(L_r I_{r\beta}(t) + L_m I_{s\beta}(t))); \\
 \frac{dI_{s\beta}(t)}{dt} = k(L_r(U_{s\beta}(t) - R_s I_{s\beta}(t)) + L_m(R_r I_{r\beta}(t) - n_r(t)(L_r I_{r\alpha}(t) + L_m I_{s\alpha}(t))); \\
 \frac{dn_r(t)}{dt} = \frac{p}{J} \cdot (M_{\odot v}(t) - M_p(t)); \quad k = \frac{1}{L_r L_s - L_m^2}; \\
 M_p(t) = \frac{M_+(t) - M_{u-}(t)}{i \cdot \eta}; \quad J = J_{\text{вб}} + \frac{J_{\text{ш}} + J_{u-}}{i^2}; \\
 M_y(t) = M_{\text{эм}}(t) + M_+(t) - M_{u-}(t); \quad M_{u-}(t) = -e \cdot \cos(\Omega \cdot t); \\
 M_+(t) = KU^2 + a \cdot \sin(Wt) + b \cdot \cos(Wt); \quad K = \frac{pmR_1}{2\pi f [(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2]},
 \end{cases} \quad (6)$$

де $M_{\text{эм}}(t)$ - електромагнітний момент асинхронного приводу; $M_p(t)$ - момент на виході хвильового редуктора; $M_{\text{мс}}(t)$ - момент ексцентриситету муфти спряження; $M_{\Pi}(t)$ - залежність пускового моменту в функції кутового положення ротора об'єкта контролю; $M_y(t)$ - момент на корпусі приводного двигуна, що складається із асинхронного приводу та хвильового редуктора.

Представлена модель відтворює тільки фізичні процеси перетворення пускового моменту ОБ через муфту спряження, хвильовий редуктор, асинхронний привід.

Недоліком даної моделі є те, що вона не враховує операцію перетворення моменту $M_y(t)$ вимірювальним важелем і сенсором зусилля. Дана обставина може суттєво вплинути на кінцеві метрологічні характеристики засобу вимірювання залежності $M_{\Pi} = f(\alpha)$. Крім того, наведене рівняння перетворення не дозволяє описати процеси, що виникають в перетворювачі під час вимірювання залежності пускового моменту від зміни напруги живлення об'єкта контролю. Також тип приводного двигуна приводить до дещо іншого підходу побудови моделей. Наприклад, заміна асинхронного приводу на кроковий може суттєво змінити модель вимірювального перетворення, але дасть позитивний ефект - підвищення точності вимірювання. Тому виникає необхідність розробки більш універсальних математичних моделей засобів вимірювання пускового моменту.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ

Величина моменту інерції J ротора електричних машин суттєво впливає на вимірне значення динамічного моменту M_d , оскільки останній є невід'ємною складовою частиною під час встановлення залежності $M_d = f(t)$ і в процесі отримання динамічної механічної характеристики $M_d = f(\omega_r)$.

Розрахункові методи визначення J характеризуються досить низькою точністю, тому на практиці застосовуються рідко. Найбільш розповсюдженими є експериментальні методи [8-9]: допоміжного маятника; крутильних коливань; самогальмування.

Суттєвим недоліком перших двох експериментальних методів є невисока точність та складність автоматизації процесу вимірювання. Отже, розглянемо сутність методу та послідовність вимірювальних перетворень під час реалізації методу самогальмування [10].

Суть методу полягає в тому, що в режимі самогальмування електродвигуна вимірюють спочатку кутове прискорення ротора ξ_{r1} разом зі зразковим моментом інерції, а потім без нього ξ_{r2} . Рівняння руху для цієї вимірювальної процедури має вигляд

$$\begin{cases} 0 = M_0(\omega_r) + M_{вс}(\omega_r) + [J(\omega_r) + J_{вс}(\omega_r)] \cdot \xi_{r1}(\omega_r); \\ 0 = M_0(\omega_r) + M_{вс}(\omega_r) + [J(\omega_r) + J_{вс}(\omega_r) + J_3(\omega_r)] \cdot \xi_{r2}(\omega_r), \end{cases} \quad (7)$$

де M_0 - момент механічних втрат електродвигуна; $M_{вс}$ - момент механічних втрат вхідного вала вимірювального перетворювача (ВП); $J_{вс}$ - момент інерції вхідного вала ВП; J_3 - величина зразкового моменту інерції тіла, що визначається за його геометричними та ваговими параметрами.

З рівнянь (7) знаходять

$$J = J_3 \cdot \frac{\xi_{r1}}{\xi_{r2} - \xi_{r1}}. \quad (8)$$

Отже, визначення інформативного параметра J зводиться в даному випадку до вимірювання кутової швидкості ω_r , цифрового диференціювання $\xi = d\omega_r/dt$ та опосередкованого визначення J . Тому математична модель вимірювального перетворення моменту інерції описується раніше представленою системою (6) і рівнянням (8). Недоліком такого підходу є невисока швидкодія та низька точність. Час вимірювання, в даному випадку, є сумою таких найбільш суттєвих складових

$$t_B = 2 \cdot (t_{пp} + t_c + t_3 + t_{цд}), \quad (9)$$

де $t_{пp}$ - тривалість перехідного процесу об'єкта контролю; t_c - час самогальмування електричної машини (проміжок часу від моменту закінчення перехідного процесу до моменту повної зупинки ротора); t_3 - час, необхідний для виконання операції згладжування результатів вимірювання кутової швидкості; $t_{цд}$ - час на виконання операції цифрового диференціювання.

Тому тривалість процедури вимірювання моменту інерції за даним способом складає 5 хв., що не зовсім задовольняє вимоги замовника.

Невисока точність зумовлена, в першу чергу, невисокою точністю реалізації операції цифрового диференціювання.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ДИНАМІЧНОГО МОМЕНТУ

В теперішній час розповсюдженим є метод опосередкованого вимірювання динамічного моменту, суть якого полягає в наступному: спочатку знаходять одним з відомих методів величину моменту інерції ротора J [8]; потім в динамічному режимі роботи електродвигуна вимірюють кутову швидкість обертання ротора $\omega_r(t)$ і опосередковано знаходять величину динамічного моменту $J \cdot d\omega_r(t)/dt$. Для реалізації цього методу застосовують мікропроцесорні засоби вимірювання, що мають в своєму складі об'єкт контролю, муфту спряження, фотоелектричний сенсор з частотним виходом, цифровий частотомір і мікроконтролер.

Якщо в якості ОБ вибрати асинхронний двигун, математична модель якого розглянута раніше (1), і розв'язати її відносно $M_e(t)$ для нульового моменту опору на валу ротора, то матимемо (рис.2) величину динамічного моменту $M_d(t)$.

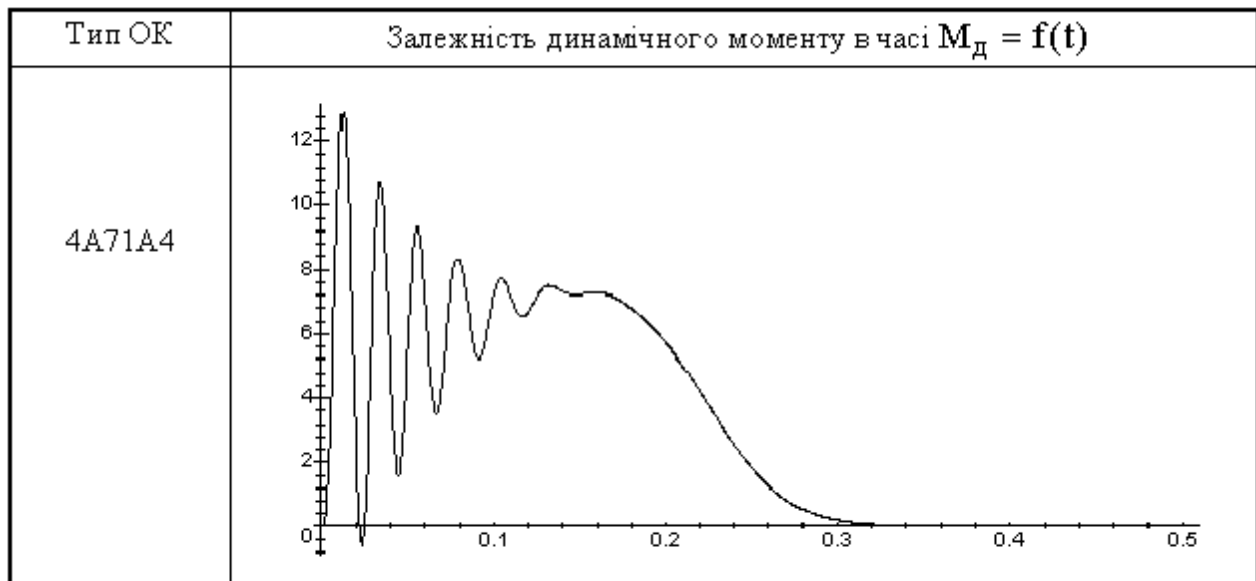


Рис.2. Зміни динамічного моменту в часі

Оскільки в даному методі використовується опосередковане вимірювання динамічного моменту

$$M_{dm}(t) = J \cdot [d\omega_m(t)/dt] , \tag{10}$$

то для визначення інформативного параметра необхідно виміряти залежність $\omega_m(t)$, виконати чисельне диференціювання $d\omega_m(t)/dt$ і знайти добуток кутового прискорення та моменту інерції ротора.

Отже, муфта спряження та чисельне диференціювання суттєво впливають на величину динамічного моменту. Дана обставина значно обмежує нижню межу вимірювання інформативного параметра опосередкованим методом. Тому більш перспективним є розробка прямого методу вимірювання динамічного моменту.

ВИСНОВКИ

Аналіз математичних моделей вимірювального перетворення вихідних параметрів ЕМ згідно з запропонованою класифікацією дозволяє дійти таких висновків:

1. В теперішній час достатньо теоретично розроблені та експериментально апробовані моделі вимірювального перетворення кутової швидкості, моменту інерції та залежності пускового моменту в функції кутового положення ротора з асинхронним приводом.
2. Математична модель вимірювального перетворення кутової швидкості є вихідною для визначення кутового прискорення, моменту інерції і динамічного моменту.
3. Засоби вимірювання, в основу побудови яких покладено дану модель, характеризуються невисокою швидкодією. Основними складовими похибки є вплив муфти спряження, похибка від реалізації операції цифрового диференціювання експериментальних даних. Тому похибки вимірювання моменту інерції та динамічного моменту значні.
4. Відомі методи вимірювання моменту інерції та динамічного моменту по своїй суті є опосередкованими і тому засоби контролю даних інформативних параметрів характеризуються низькими метрологічними характеристиками та достовірністю.
5. Математична модель вимірювального перетворення пускового моменту та засоби вимірювання залежності $M_{\Pi} = f(\alpha)$ не дозволяють в повному обсязі реалізувати вимірювальні процедури досліду короткого замикання.
6. Не розроблено та не досліджено математичні моделі вимірювального перетворення залежності пускового моменту в функції кутового положення ротора з кроковим, синхронним приводом. Дана обставина вимагає розробки та дослідження більш універсальної математичної моделі, яка б дозволила враховувати раніше виділені обставини.
7. В теперішній час відсутні моделі вимірювального перетворення залежності $M_K = f(U_K)$, що призвело до відсутності відповідних засобів контролю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Копылов И.П. Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчетах. (Электрические машины). -М.: Высшая школа, 1980. - 256с.
2. Кухарчук В.В. Аналіз засобів вимірювання пускового моменту електричних машин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 1997.- №2. -С.39-46.
3. Кирианаки Н.В., Гайдучок Р.М. Цифровые измерения частотно-временных параметров сигналов. -Л.: Выща школа, 1978. -168с.

4. Избыточные системы счисления, моделирование, обработка данных и системное проектирование в технике преобразования информации: Учеб. пособие / В.А.Поджаренко, А.Д.Азаров, В.А.Власенко, И.И.Коваленко.-К.: Выща шк., 1990.-С.7-61.

5. Кучерук В.Ю., Кухарчук В.В. Аналіз та практична реалізація мікропроцесорного засобу вимірювання кутової швидкості обертання електричних машин // Вісник ВПІ.-1995.-№2. -С.12-16.

6. Манзон Б.М. Maple V Power Edition. М.: Информационно-издательский дом «Филинь», 1988. -240с.

7. Кухарчук В.В. Математична модель вимірювального перетворювача пускового моменту електричних машин // Вісник ВПІ.-1995.-№1.-С.5-9

8. Потапов Л.А., Зотин В.Ф. Испытание микроэлектродвигателей в переходных режимах. -М.: Энергоатомиздат, 1986.-104с.

9. Гернет М.М., Ратобылский В.Ф. Определение моментов инерции. -М.: Машиностроение, 1985.-248с.

10. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю. Новий спосіб вимірювання моменту інерції електричних машин // Автоматизація технологічних процесів та промислова екологія. -1997.-вип.№1.-С.23-27.