

МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.317

^{1,2} О. М. Васілевський, к.т.н., доц.

МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ВИМІРЮВАНЬ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ОБЕРТАЮЧИХ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ

¹ Міністерство освіти і науки України, м. Київ.² Вінницький національний технічний університет, wasilevskiy @ mail.ru

Розроблено методику виконання вимірювань обертаючих параметрів електромоторів, яка дозволяє забезпечити міжнародну єдність вимірювань неелектричних обертаючих параметрів асинхронних електромоторів з підвищеною точністю вимірювання та відповідає вимогам міжнародних стандартів з оцінювання якості електротехнічної продукції.

Ключові слова: обертаючі параметри електромоторів, вимірювання обертаючих моментів, характеристики точності вимірювань, електромотори, якість вимірювань, невизначеність вимірювання.

Вступ та постановка проблеми. Розвиток науки і технології приводить до того, що існуюче метрологічне забезпечення вимірювань обертаючих параметрів електромоторів не відповідає вимогам міжнародних стандартів, що діють у сфері оцінювання характеристик точності вимірювань і представлення якості електротехнічної продукції. Цей факт унеможливує проведення сертифікації технологічного процесу, продукції чи послуги на відповідність міжнародним нормативно-технічним вимогам (документам), системі якості та системі управління якістю. Тому, розробка сучасної методики виконання вимірювань неелектричних обертаючих параметрів асинхронних електромоторів (ЕМ), яка дозволить реалізувати процедуру оцінювання характеристик якості електротехнічної продукції та забезпечить міжнародну єдність вимірювань, є актуальною науковою проблемою на шляху України до інтеграції існуючих стандартів, технічних умов і нормативно-технічних документів під міжнародні стандарти та європейські норми і правила.

Методика виконання вимірювань (МВВ) неелектричних обертаючих параметрів асинхронних ЕМ призначена для застосування її під час вимірювань значень обертаючих моментів (крутильного моменту, пускового моменту, динамічного моменту), моменту інерції та кутової швидкості ЕМ при випробуванні ЕМ в режимі короткого замикання і холостого ходу. Дана МВВ поширюється на обертаючі електричні машини змінного струму і призначена для застосування в лабораторіях установ, підприємств і організацій, що здійснюють випробування ЕМ або виконують атестацію (перевірку) вимірювальних систем (інформаційно-вимірювальних систем, вимірювальних каналів, систем технічної діагностики) в яких застосовуються ЕМ.

Ця МВВ не поширюється на обертаючі електричні машини постійного струму і крокові електричні машини, а також електричні машини, що призначені для використання в бортових системах рухомих засобів наземного водного і повітряного транспорту.

Враховуючи вищевикладене, *метою статті* є розробка методики виконання вимірювань неелектричних обертаючих параметрів асинхронних ЕМ, що дозволить забезпечити міжнародну єдність вимірювань обертаючих параметрів ЕМ з підвищеною точністю вимірювання.

Аналіз стану досліджень та публікацій. Нормативні документи, яким має відповідати МВВ неелектричних обертаючих параметрів ЕМ для забезпечення міжнародної єдності вимірювань, відповідності системі якості та системі управління якістю, а також загальні вимоги до визначення обертаючих параметрів ЕМ наведені в літературних джерелах [1 – 8]. Аналіз цих джерел показує, що існуючі на сьогоднішній день методики, процедури, методи вимірювань обертаючих параметрів ЕМ, а також методи оцінювання характеристик точності вимірювань і представлення якості електротехнічної продукції не відповідають вимогам міжнародних стандартів. Крім того, існуючі методи визначення обертаючих параметрів ЕМ, що регламентовані нормативно-технічними документами і стандартами є непрямими (опосередкованими), і саме тому засоби вимірювання зазначених параметрів ЕМ мають невисоку точність та низьку швидкодію. Сучасна елементна база вимагає перегляду існуючих способів вимірювань, вимог до характеристик точності вимірювань і методів їх оцінювання. Саме тому виникає необхідність у розробці нової МВВ неелектричних обертаючих параметрів ЕМ, яка б відповідала вимогам міжнародних стандартів, мала сучасне метрологічне забезпечення та дозволяла забезпечити міжнародну єдність вимірювань неелектричних обертаючих параметрів ЕМ з підвищеною точністю вимірювання.

Виклад основного матеріалу. МВВ встановлює загальні положення проведення вимірювань, вимоги до точності засобів вимірювань та результатів вимірювань, методів вимірювання кутової швидкості, моменту інерції, динамічного моменту, пускового та крутильного моментів ЕМ.

1. Загальні положення. При наявності декількох методів вимірювань одного і того ж неелектричного обертаючого параметра електромоторів установка (організація), яка виконує вимірювання неелектричних обертаючих параметрів ЕМ має право вибрати, виходячи з існуючих можливостей на місці проведення вимірювань, метод вимірювання, який для даної установки підходить найбільше, якщо інше не зазначено в стандартах чи технічних умовах на конкретні види електромоторів.

При рівних умовах перевага має надаватись методу вимірювання, який забезпечує отримання результатів з найвищою точністю вимірювання.

Під час виконання вимірювань неелектричних обертаючих параметрів ЕМ повинні виконуватися вимоги безпеки, у тому числі пожежної, що встановлені міжнародними [8] та міждержавними стандартами [7], а також в діючих «Правилах техніки безпеки при експлуатації електрообладнання у споживачів», які затверджені в установленому порядку в установі, що проводить вимірювання або випробування.

При виконанні вимірювань неелектричних обертаючих параметрів ЕМ температура оточуючого повітря не повинна перевищувати 40 °С, якщо в стандартах або технічних умовах на ЕМ певних типів не встановлено інші значення температури. Мінімальна температура оточуючого повітря не повинна бути меншою за значення, що встановлено в стандартах або технічних умовах на ЕМ певних типів в залежності від кліматичного виконання.

Висота над рівнем моря не повинна перевищувати 1000 м.

Максимальний крутильний момент асинхронних ЕМ загального призначення при номінальних значеннях напруги живлення і частоти повинен бути не меншим за 1,76 номінального крутильного моменту.

Якщо не оговорено інше, то ЕМ незалежно від режиму роботи і конструкції повинні витримувати протягом 15 с без зупинки чи різкої зміни частоти обертання перенавантаження за крутильним моментом, яке складає 60 % номінального значення (при поступовому збільшенні навантажувального моменту). При цьому напруга і його частота, що подаються на ЕМ, повинні зберігати номінальні значення.

Значення мінімального крутильного моменту асинхронних ЕМ в режимі пуску при номінальній напрузі живлення повинно бути не меншим за 0,3 номінального крутильного моменту ЕМ, якщо інше не оговорено стандартами чи технічними умовами на конкретний тип ЕМ.

Усі трьохфазні одношвидкісні короткозамкнуті асинхронні ЕМ до 250 габариту включно з номінальною напругою до 1000 В включно повинні забезпечувати довготривалу безпечну роботу без ризиків, пов'язаних із наданням шкоди експлуатаційному персоналу і оточуючому середовищу, при номінальних частотах обертання, які можуть приймати значення від 1800 до 5200 об/хв, в залежності від конкретного типу (габариту) ЕМ.

Вимірювання неелектричних обертаючих параметрів ЕМ виконують за допомогою вимірювальної системи, яка складається з вимірювального каналу частоти обертання до складу якого входить тахометричний перетворювач, вимірювальних каналів моменту інерції, динамічного моменту, пускового моменту, крутильного моменту до складу яких входить тензометричний перетворювач. Під час випробувань ЕМ в режимі холостого ходу вимірюються такі обертаючі параметри як кутова швидкість (частота обертання), крутильний момент, момент інерції, динамічний момент, а під час випробувань ЕМ в режимі короткого замикання вимірюється пусковий момент.

2. Точність засобів вимірювань та результатів вимірювань. Під час автоматизованих випробуваннях (вимірюваннях) неелектричних обертаючих параметрів ЕМ потрібно максимально використовувати автоматичні схеми вимірювання; при цьому окремі складові елементи вимірювальних каналів (інформаційно-вимірювальних систем), такі як вимірювальні пристрої та перетворювачі повинні мати клас точності не нижчий за 1,5, а максимальна похибка вимірювання або відносна комбінована невизначеність результатів вимірювання не повинні перевищувати 8 % від значення допустимого відхилення показників обертаючих параметрів ЕМ [6].

При вимірюваннях обертаючих параметрів ЕМ на частоті більшій за 60 Гц, допускається використання засобів вимірювання, які мають клас точності не вищий за 2,5.

Засоби вимірювальної техніки, що використовуються під час вимірювань (випробувань) неелектричних обертаючих параметрів ЕМ підлягають метрологічній атестації (повірці).

Отже, для забезпечення міжнародної єності вимірювань неелектричних обертаючих параметрів ЕМ необхідно застосувати методи вимірювання кутової швидкості, моменту інерції, динамічного моменту, пускового моменту та електромагнітного крутильного моменту, які дозволять отримувати результати вимірювання з відносною комбінованою невизначеністю вимірювання не більшою за 8 %.

Для цього, в першу чергу, необхідно використати такий метод вимірювання кутової швидкості частоти обертання), який дозволить отримувати результати вимірювання частоти обертання в динамічних режимах (в режимі пуску та режимі самогальмування ЕМ) з відносною комбінованою невизначеністю, яка не перевищує 8 %. Оскільки, саме від точності вимірювання частоти обертання (особливо в динамічних режимах роботи) буде залежати точність вимірювання моменту інерції, динамічного моменту та пускового моменту ЕМ.

З цією метою було розроблено тахометричний перетворювач з можливістю зміни розрізняючої здатності, в залежності від того на яких частотах обертання виконуються вимірювання (низьких, середніх або високих), який дозволяє вимірювати частоту обертання ЕМ з підвищеною точністю як в статичному, так і в динамічному режимах роботи. Математичний апарат та схеми побудови такого тахометричного перетворювача детально описані в [9].

3. Вимірювання частоти обертання ротора ЕМ. Для вимірювання частоти обертання ЕМ пропонується використати метод вимірювання частоти обертання, який заснований на використанні

тахометричного перетворювача в будову якого входить спеціальний модулятор, діафрагма, два фотоприймача, джерело світла та інші електронні елементи тахометричного перетворювача, які розташовані на платі. Опис роботи тахометричного перетворювача, його функціональна та принципова схеми, часові діаграми, алгоритм роботи та структура детально наведені (описані) в [9]. Для вимірювання частоти обертання ротора ЕМ, що випробовується, прикріплюється за допомогою муфти спряження тахометричний перетворювач. Рівняння перетворення якого описується виразом

$$n(t) = 60r^2 U_0 N_{\omega} [k S_0 R_{zz} I_0 \beta a \pi^2]^{-1} - 15\beta [\pi t]^{-1}, \quad (1)$$

де $n(t)$ – частота обертання ротора ЕМ (в об./хв.); R_{zz} – опір кола зворотного зв'язку ($R_{zz} = 1 \text{ МОм} \pm 10 \text{ Ом}$); k – коефіцієнт пропорційності; r – відстань від джерела світла до поверхні, що освітлюється ($r = 0,02 \pm 0,001 \text{ м}$); S_0 – інтегральна струмова чутливість фотодіоду ($S_0 = 2 \cdot 10^{-11} \text{ А/Лм} \pm 10 \%$); m – розрядність АЦП ($m = 12$); t – час вимірювання; β – кут, що характеризує конфігурацію діафрагми тахометричного перетворювача ($\beta = \pi/90 \pm 0,1\pi/180$); R_0 – радіус кола в центрі модулятора ($R_0 = 19 \cdot 10^{-3} \text{ м}$); $a = h1(2R_0 + h1)/(2\pi)$ – коефіцієнт, що визначає геометричні розміри прорізи модулятора, який входить до складу тахометричного перетворювача ($a = 0,034 \pm 0,001 \text{ м/рад}$); $h1$ – висота прорізи модулятора з початком на колі радіуса R_0 ($h = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$); U_0 – опорна напруга АЦП ($U_0 = 5 \text{ В} \pm 0,25 \text{ мВ}$); I_0 – сила світла ($I_0 = 0,1 \text{ кд} \pm 2,5 \%$); N_{ω} – кількість двікових імпульсів, що підраховуються лічильником.

Даний тахометричний перетворювач може використовуватися для усі типів ЕМ, різних габаритних розмірів. Він дозволяє вимірювати частоту обертання з достатньою точністю в сатичному та динамічному режимах роботи ЕМ. Результат вимірювання виводиться на рідкокристалічний дисплей (монітор). Вимірювання необхідно виконувати за нормальних умов, що встановлені нормативно-технічними документами. Діапазон вимірювання частот обертання складає від 3 до 10000 об/хв з відносною комбінованою невизначеністю вимірювання, яка не перевищує 0,5 % при ймовірності $P = 0,9$. Метрологічні характеристики засобу вимірювання частоти обертання ЕМ та характеристики зміни впливних величин описані (наведені) в роботі [9, 10]. Метод метрологічної атестації та опрацювання результатів вимірювання на основі концепції невизначеності вимірювань описано (наведено) в роботі [10]. Бюджет невизначеності вимірювання частоти обертання наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Бюджет невизначеності вимірювання частоти обертання ЕМ

Вхідні та впливні величини	Оцінка вхідних та впливних величин	Стандартні невизначеності	Коефіцієнти чутливості	Вклади невизначеностей
$n_{\text{вх}}$	10000 об/хв	$< 3 \text{ об/хв}$	1	$u_{A_{\text{max}}}(\bar{n}_{\text{max}})$
r	0,02 м	0,58 мм	$29,88 \cdot 10^3 \text{ об/м} (\partial \bar{n} / \partial r)$	$u_{B_r} \partial n / \partial r$
U_0	5 В	0,14 мВ	99,62 об/(хв В)	$u_{B_{U_0}} \partial n / \partial U_0$
m	12	$0,05 \cdot 10^{-1}$	-207,15 об/хв	$u_{B_m} \partial n / \partial m$
a	0,034 м/рад	0,51 мм/рад	$-8,79 \cdot 10^3 \text{ об/рад} (\text{хв} \cdot \text{м})$	$u_{B_a} \partial n / \partial a$
I_0	0,1 кд	$1,27 \cdot 10^{-1} \text{ кд}$	$-29,88 \cdot 10^3 \text{ об} (\text{хв} \cdot \text{кд})$	$u_{B_{I_0}} \partial n / \partial I_0$
R_{zz}	1 МОм	5,77 Ом	$-0,29 \cdot 10^{-1} \text{ об} (\text{хв} \cdot \text{Ом})$	$u_{B_R} \partial n / \partial R_{zz}$
β	$\pi/90$ рад	$1,01 \cdot 10^{-1}$ рад	$-8,57 \cdot 10^3 \text{ об} (\text{хв} \cdot \text{рад})$	$u_{B_\beta} \partial n / \partial \beta$
S_0	$2 \cdot 10^{-11} \text{ А/Лм}$	$1,02 \cdot 10^{-11} \text{ А/Лм}$	$-1,19 \cdot 10^3 \text{ Лм} \text{ об} / (\text{хв} \cdot \text{А})$	$u_{B_S} \partial n / \partial S_0$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Комбінована невизначеність	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
\bar{n}	10000 об/хв	$< 50 \text{ об/хв}$	1,64	$< 42 \text{ об/хв}$

Контроль точності вимірювань з урахуванням вимог [1 – 4] пропонується виконувати за методикою, що описана (наведена) в [10]. Значення міжнорічного інтервалу засобу вимірювання частоти обертання ЕМ відповідає 21 місяцю. Для зручності сприйняття отриманих результатів вимірювання частоти обертання рекомендується розраховувати відносну комбіновану та відносну розширену невизначеності за формулами:

$$\tilde{u}_c = \frac{u_c}{\bar{n}} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$\tilde{U} = \frac{U_c}{\bar{n}} \cdot 100\% \quad (3)$$

де u_c та U_c – комбінована та розширена невизначеності, відповідно; \bar{n} – оцінка вимірюваної величини.

Відповідно до [1 – 4] результат вимірювання частоти обертання потрібно представляти у вигляді

$$\bar{n} = k u_{cc}, P \text{ або } -ku_{cc} \leq \bar{n} \leq ku_{cc} \cdot P, \quad (4)$$

де k – коефіцієнт охоплення, який необхідний для одержання інтервалу з рівнем довіри P .

Вибирається коефіцієнт охоплення з таблиці Стюдента на основі рівня довіри P та ефективного числа

$$v_{\text{eff}} = (q-1) \frac{u_{cc}^4}{u_{\lambda}^4(n)}, \quad (5)$$

де q – кількість результатів спостережень; $u_{\lambda}(n)$ – стандартна невизначеність типу А (стандарне середньоквадратичне відхилення).

4. Вимірювання моменту інерції. Для вимірювання моменту інерції ЕМ пропонується використати метод самогальмування. Метод самогальмування може використовуватися для вимірювання моменту інерції обертаючих частин ЕМ потужністю від 0.05 до 100 кВт.

Суть методики виконання вимірювання моменту інерції ротора ЕМ полягає в тому, що в момент підключення напруги живлення до обмоток статора на роторі випробовуваного ЕМ створюється електромагнітний крутильний момент, який описується формулою Клосса. Цей момент через вимірювальний важіль діє на сенсор зусилля (СЗ), і оскільки СЗ є пружним елементом, то в даний момент часу виникає перехідний процес, тривалість якого, певний відповідас значенню t_1^1 . Після закінчення перехідного процесу ($t = t_1^1$) випробовуваний ЕМ знеструлюють ($U = 0$), в результаті чого крутильний момент на виході вимірювального перетворювача, внаслідок інерційних властивостей СЗ, зменшується від величини M_k до повної зупинки ротора протягом проміжку часу t_1^2 . Оскільки ротор випробовуваного ЕМ здійснює вільні затухаючі коливання, тривалість яких зумовлена величиною моменту інерції ротора J_{EM} випробовуваного ЕМ і жорсткістю C сенсора зусилля, то, вимірявши величини крутильного моменту

M_k і проміжку часу t_1^2 від моменту закінчення перехідного процесу t_1^1 до повної зупинки ротора, та знаючи коефіцієнт жорсткості C (щільності) СЗ, стає можливим знаходження величини моменту інерції ротора випробовуваного ЕМ.

Структурна схема засобу вимірювання моменту інерції, що дозволяє реалізувати метод вимірювання моменту інерції ротора випробовуваного ЕМ в режимі самогальмування наведена на рис. 1.

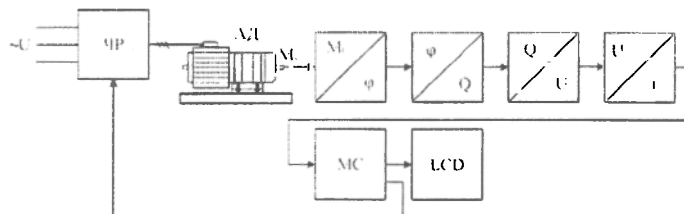


Рис. 1. Структурна схема засобу вимірювання моменту інерції

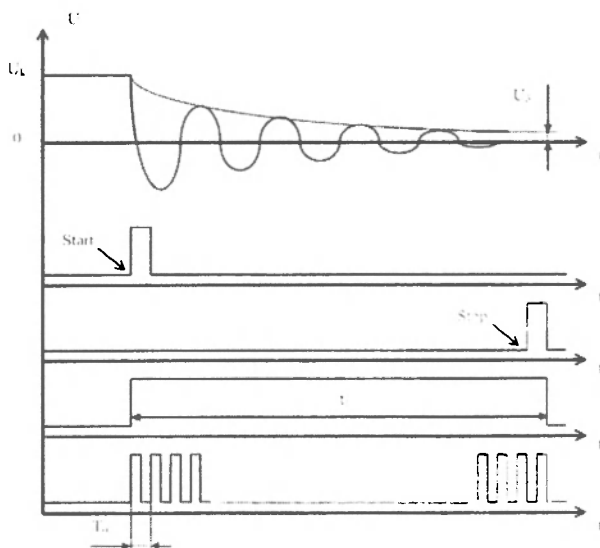


Рис. 2. Часова діаграма роботи засобу вимірювання моменту інерції

Часова діаграма роботи засобу вимірювання моменту інерції представлена на рис. 2.

Рівняння перетворення засобу вимірювання моменту інерції описується виразом

$$J = \frac{PN_1}{2f_0 \ln \left(M_k \frac{gKI}{\Delta \delta C} \right)}, \quad (6)$$

де J – момент інерції, що вимірюється; f_0 – зразкова частота, що формується кварцевим резонатором мікроконтролера (МС) (16 МГц); N_1 – кількість імпульсів зразкової частоти f_0 , що надходить на вхід двійкового лічильника-таймера мікроконтролера (МС) протягом часового інтервалу t_1^0 (часу самогальмування ЕМ); g – прискорення вільного падіння (9.81 м/с^2); P – коефіцієнт заспокоєння; $KI = \ln^4 e / (gch)$ – коефіцієнт перетворення сенсора зусилля, який залежить від радіусу r і товщини мембрани h СЗ, $e=0.17$, модуля

пружності C_3 ξ та довжини вимірювального важеля l , що використовується для вимірювального перетворення крутильного моменту M_k ; C – штивність (жорсткість) сенсора зусилля; $\Delta \delta$ – нормоване значення похибки C_3 ; M_k – крутильний момент ЕМ при ковзанні $S=1$, який діє на сенсор зусилля під час режиму самогальмування ЕМ (на початку вимірювань відповідає номінальному значенню електромагнітного крутильного моменту ЕМ, що описується формулою Клосса).

До складу ЗВ моменту інерції входить перетворювач крутильного моменту в кут повороту (M_k/ϕ) у вигляді вимірювального важеля, перетворювач кута в зусилля (ϕ/Q), перетворювач зусилля в напругу (Q/U), перетворювач огинаючої напруги в часовий інтервал (U/t), мікроконтролер (МС), рідкокристалічний дисплей (LCD) та частотний регулятор (ЧР) або замість частотного регулятора також можна використати варіатор напруги.

Вимірювання необхідно виконувати за нормальних умов, що встановлені нормативно-технічними документами.

Діапазон вимірювання засобу вимірювання моменту інерції знаходиться в межах від $2 \cdot 10^{-3}$ до 0.02 Нм^2 з відносною комбінованою невизначеністю вимірювання, яка не перевищує 6 % при ймовірності $P = 0,9$.

Метрологічні характеристики засобу вимірювання моменту інерції та характеристики зміни впливних величин описані (наведені) в роботі [9, 11]. Метод метрологічної агестації та опрацювання результатів вимірювання на основі концепції невизначеності вимірювань описано (наведено) в роботі [11]. Бюджет невизначеності вимірювання моменту інерції при номінальному значенні електромагнітного крутильного моменту ЕМ 5 Нм наведено в таблиці 2.

Контроль точності вимірювань з урахуванням вимог [1 – 4] пропонується виконувати за методикою, що описана (наведена) в [11]. Значення міжпіврічного інтервалу засобу вимірювання моменту інерції відповідає 20 місяцям. Результати вимірювання моменту інерції рекомендовано представляти у вигляді аналогічному до форми подання, що описана виразом (4). Для зручності сприйняття отриманих результатів вимірювання моменту інерції рекомендується розраховувати відносну комбіновану та відносну розширену невизначеності аналогічно до виразів (2) та (3), відповідно.

5. Вимірювання крутильного та пускового моментів. Для вимірювання крутильного і пускового моментів ЕМ пропонується використати метод вимірювання моментів при зміні напруги живлення ЕМ за певним законом за допомогою варіатора напруги або частотного регулятора, при цьому ЕМ повинен бути нерухомим із загальмованим ротором. Для цього ротор ЕМ загальмовується спеціальним вимірювальним важелем, який діє на тензометричний сенсор зусилля, аналоговий вихід якого з'єднано з входом аналого-цифрового перетворювача (АЦП), що вбудований в мікроконтролер. Під керуванням мікроконтролера здійснюється зміна напруги живлення ЕМ починаючи з пониженого значення напруги живлення, яке повинно відповідати 0,4 від номінального значення, до номінального значення напруги і одночасно вимірюються значення пускового моменту ЕМ. Вимірювання із загальмованим ротором ЕМ потрібно виконувати протягом часу, який не повинен перевищувати 10 с. Після вимірювань крутильного моменту ЕМ із загальмованим ротором необхідно негайно вимкнути джерело напруги живлення ЕМ і залишити ЕМ для охолодження до температури оточуючого середовища.

За результатами вимірювань крутильного моменту при зміні напруги живлення випробовуваного ЕМ будується залежність пускового моменту від напруги. За нормоване значення пускового моменту ЕМ приймається найбільше значення пускового моменту при номінальній напрузі живлення ЕМ. Якщо під час випробувань ЕМ із загальмованим ротором не можливо довести (змінювати) значення напруги живлення ЕМ до номінального значення за ≤ 10 с, то крутильний момент ЕМ необхідно визначати шляхом екстраполяції або інтерполяції отриманих залежностей крутильного моменту і напруги живлення ЕМ за час, що не перевищує ≤ 10 с до номінального значення напруги живлення ЕМ. При цьому за номінальне значення початкового пускового моменту приймається найбільше вимірне значення пускового моменту, що отримане при номінальній напрузі живлення випробовуваного ЕМ.

Вимірювання значень напруги пропонується виконувати відповідно до методики та розробленого вимірювального каналу напруги, які детально описані (розглянуті) в роботі [12].

Таблиця 2

Бюджет невизначеності вимірювання моменту інерції

Вхідні та впливні величини	Оцінка вхідних та впливних величин	Стандартні невизначеності	Коефіцієнти чутливості	Вклади невизначеностей
J_{max}	$0,02 \text{ Нм}^2$	$\leq 35,72 \cdot 10^{-6} \text{ Нм}^2$	1	$u_{J_{max}}(\bar{J}_3)$
γ	0,15 %	$8,67 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$	$13,22 \cdot 10^{-4} \text{ Нм/кг}$	$\frac{\partial J}{\partial \Delta \delta} u_{\gamma}$
l	$0,01 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$5,77 \cdot 10^{-6} \text{ м}$	$-2,64 \cdot 10^{-4} \text{ Нм}$	$\frac{\partial J}{\partial l} u_{l}$

T_0	$0.05 \cdot 10^{-6}$ с	$0.22 \cdot 10^{-6}$ с	$7.93 \cdot 10^7$ Нм ² /с	$\frac{\partial J}{\partial T_0} u_{B,T}$
Δt	$0.5 \cdot 10^{-6}$ с	$0.14 \cdot 10^{-6}$ с	$7.93 \cdot 10^7$ Нм ² /с	$\frac{\partial J}{\partial T_0} u_{B,\Delta t}$
M_k	5 Нм	$5.21 \cdot 10^{-2}$ Нм	$-39.47 \cdot 10^{-6}$ м	$\frac{\partial J}{\partial M_k} u_{c_2}(M_{св})$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Комбінована невизначеність	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
\bar{J}	0.02 Нм ²	$< 11.17 \cdot 10^{-4}$ Нм ²	1.64	$< 1.83 \cdot 10^{-3}$ Нм ²

Структурна схема засобу вимірювання крутильного і пускового моменту ЕМ, що побудований на основі прискореного методу вимірювання моментів із загальмованим ротором наведена на рис. 3.

Рівняння перетворення засобу вимірювання моментів описується виразом

$$M_{п} = \frac{4kRgS_c U_{оп} N_{\Delta} C \xi h}{U_{ж} r^4 (2^m - 1) \epsilon} \tag{7}$$

де $M_{п}$ – крутильний момент, що вимірюється; R – опір мостової схеми тензорезистивного перетворювача ($R = 3,25 \pm 0,01$ кОм); N_{Δ} – кількість двійкових імпульсів, що відповідають діючій напрузі на вході АЦП, яка відповідає значенню діючого на сенсор зусилля моменту; g – прискорення вільного падіння ($9,81$ м/с²); S_c – чутливість сенсора зусилля; $U_{оп}$ – опорне значення напруги АЦП ($U_{оп} = 3$ В $\pm 0,25$ мВ); r – радіус мембрани сенсора зусилля (СЗ); h – товщина мембрани СЗ; $\epsilon = 0,17$; ξ – модуль пружності СЗ; C – штивність (жорсткість) сенсора зусилля; $U_{ж}$ – напруга живлення тензорезистивного перетворювача ($U_{ж} = 6.5$ В ± 0.25 мВ); m – розрядність АЦП ($m = 16$); k – коефіцієнт підсилення операційного підсилювача ($k = 10^4$).

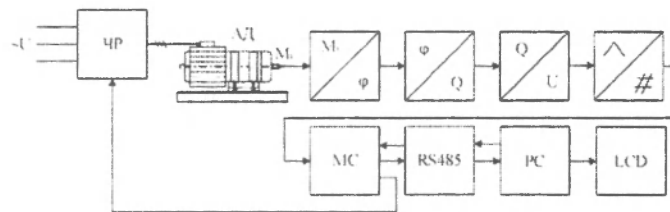


Рис. 3. Структурна схема засобу вимірювання моментів

В комплект засобу вимірювання моментів входить сенсор зусилля, який використовується для вимірювального перетворення зусилля в напругу. Його клас точності не повинен перевищувати значення 0,15.

Діапазон вимірювання засобу вимірювання моментів знаходиться в межах від 0,1 до 30 Нм з відносною комбінованою невизначеністю вимірювання, яка не перевищує $\bar{u}_c = 0.3$ %.

Метод метрологічної атестації та опрацювання результатів вимірювання на основі концепції невизначеності вимірювань описано (наведено) в роботі [13]. Бюджет невизначеності вимірювання моментів наведено в таблиці 3.

Метрологічні характеристики засобу вимірювання моментів та характеристики зміни впливних величин описані (наведені) в роботі [14].

Таблиця 3

Бюджет невизначеності вимірювання пускового моменту

Вхідні та впливні величини	Оцінка вхідних та впливних величин	Стандартні невизначеності	Коефіцієнти чутливості	Вклади невизначеностей
M_1	30 Нм	$< 19.27 \cdot 10^{-2}$ Нм	1	$u_{c_1}(M)$
γ	0,15 %	$8.67 \cdot 10^{-3}$ кг	9.81 м/с ²	$g \Delta u_{c_2}$
$U_{оп}$	9 нВ/°С	130.06 мкВ	-3.33 Нм/В	$\frac{\partial M_c}{\partial U_{оп}} u_{B,U_{оп}}$
m	16	9.34 мкВ	-6.93 Нм/В	$\frac{\partial M_c}{\partial m} u_{B,m}$
$\Theta_{сж}$	± 0.25 мВ	0.14 мВ	-1.54 Нм/В	$\frac{\partial M_c}{\partial U_{сж}} u_{B,\Theta_{сж}}$
Θ_R	± 0.01 кОм	5.77 Ом	$3.08 \cdot 10^{-7}$ Нм/Ом	$\frac{\partial M_c}{\partial R} u_{B,R}$

ω	$2,5 \cdot 10^4 \text{ K}^{-1}$	117,41 МОм	3,08 10^{-3} Ом	$\frac{\partial M_D}{\partial R} U_{B,R1}$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Комбінована невизначеність	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
\bar{M}	30 Нм	$< 88,99 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}$	1,64	$< 0,15 \text{ Нм}$

Контроль точності вимірювань з урахуванням вимог [1 – 4] пропонується виконувати за методикою, що описана (наведена) в [13]. Значення міжповірочного інтервалу засобу вимірювання моментів відповідає 21 місяцю.

Результати вимірювання моментів рекомендовано представляти у вигляді аналогічному до форми подання, що описана виразом (4).

Для зручності сприйняття отриманих результатів вимірювання моментів рекомендується розраховувати відносну комбіновану та відносну розширену невизначеності аналогічно до виразів (2) та (3), відповідно.

Мінімальний і максимальний крутильний момент, що розвивається випробовуванню ЕМ в процесі пуску між нулевою частотою обертання, і частотою обертання, що відповідає найбільшому значенню крутильного моменту в кінці пуску, необхідно вимірювати при умові, коли напруга і частота електричного струму під час пуску залишаються незмінними і відповідають своїм номінальним значенням.

6. Вимірювання динамічного моменту. Для вимірювання динамічного моменту ЕМ пропонується використати поєднання методів вимірювання моменту інерції в режимі самогальмування та крутильного моменту, що розглянуті вище. Даний метод вимірювання динамічного моменту ЕМ можна реалізувати на основі вимірювального перетворювача за реакцією статора випробовуваного ЕМ. Вимірювальний перетворювач за реакцією статора являє собою рухома частину, що встановлена на ножкових опорах балансірно, та станину (основну крпусну частину ЕМ), що з'єднана з рухомаю частиною за допомогою СЗ [15].

Метод вимірювання динамічного моменту реалізується аналогічно до методу вимірювання моменту інерції, тобто, спочатку ротор випробовуваного ЕМ загальмовують і подають напругу живлення на обмотки статора, після завершення перехідного процесу, обмотки статора знеструмлюють і виконується вимірювання тривалості вільних затухаючих коливань рухомаю частини (самогальмування), в результаті чого отримується значення сумарного момент інерції рухомаю частини разом із моментом інерції статора ЕМ за формулою (6). Далі вводиться поправка на величину моменту інерції рухомаю частини вимірювального перетворювача і визначається момент інерції статора випробовуваного ЕМ

$$J_{\text{ст}} = J \frac{t_{\text{СЗ}} P}{2 \ln \left(M_k \frac{r^2 e}{\Delta \delta \xi h C} \right)}, \quad (8)$$

де $t_{\text{СЗ}} = \frac{1}{\omega \omega} \ln \left(\frac{g \xi h}{c l r^4 \sqrt{\frac{v^2}{1-v^2} + 1}} \Delta \delta_{\text{СЗ}} \right)$ – тривалість перехідного процесу, що виникає у вимірювальному

перетворювачі під час знеструмлення обмоток статора (в режимі самогальмування); $v = \frac{v}{2 \cdot \sqrt{JC}}$ – ступінь

заспокоєння вільних коливань; $\omega = \sqrt{C/J}$ – власна частота вільних (недемпфованих) коливань вимірювального перетворювача.

Потім на основі отриманого значення моменту інерції статора ЕМ (8) вимірюють значення динамічного моменту ЕМ, аналогічно до методу вимірювання крутильного і пускового моменту, що описаний вище. Рівняння перетворення засобу вимірювання динамічного моменту ЕМ має вигляд

$$M_D = \frac{4kRgS_c U_{II} N_M \xi h}{U_r r^4 (2^m - 1) c} J_{\text{ст}} \omega^2, \quad (9)$$

Діапазон вимірювання засобу вимірювання динамічного моменту знаходиться в межах від 30 до 0,1 Нм з відсною комбінованою невизначеністю вимірювання, яка не перевищує $\bar{u}_C = 0,5\%$ [16].

Метод оцінювання складових невизначеності вимірювань описано (наведено) в роботі [33].

Оцінювання динамічної невизначеності результатів вимірювань динамічного моменту ЕМ рекомендується виконувати за методикою, що описана (наведена) в [15, 16].

Висновки

В роботі розроблено проект документа на методику виконання вимірювань неелектричний обертаючих параметрів асинхронних електромоторів, який враховує вимоги міжнародних стандартів з

ювання характеристик точності вимірювань та подання результатів вимірювань. Запропонована одиця виконання вимірювань дозволяє забезпечити міжнародну єдність вимірювань неелектричних електричних параметрів електромоторів. В розробленні МВВ вперше, на відміну від діючих стандартів і нормативно-технічних документів, які будуються на використанні опосередкованих способів визначення електричних параметрів ЕМ, що характеризуються значною похибкою вимірювання, використовуються інші методи вимірювання неелектричних електричних параметрів ЕМ, які дозволяють підвищити точність вимірювання і забезпечують міжнародну єдність вимірювань.

Список літературних джерел

1. ISO/IEC 17025:2005 «General requirements for the competence of testing and calibration laboratories». – Geneva (Switzerland): ISO, 2005. – 28 p.
2. ISO/IEC Guide 98-1:2009 «Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement». – Geneva (Switzerland): ISO, 2009. – 32 p.
3. IEC GUIDE 115-2007 «Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in electrotechnical sector». – Geneva (Switzerland): IEC, 2007. – 54 p.
4. ISO 5725-1:1994 «Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 1: General principles and definitions». – Geneva (Switzerland): ISO, 1994. – 17 p.
5. ISO 9000:2000 «Quality management systems – Fundamentals and vocabulary». – Geneva (Switzerland): ISO, 2000. – 30 p.
6. ГОСТ 11828-86 Машинны электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 32 с.
7. ГОСТ 7287-87 Машинны электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 52 с.
8. IEC 60034-1:2009 Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance (IEC 60034-1, Ed. 1:2004) MOD). – Geneva (Switzerland): IEC, 2009. – 62 p.
9. Васілевський О. М. Елементи теорії підвищення точності вимірювання та синхронізації кутових швидкостей роторів взаємозв'язаних електромоторів : [монографія] / О. М. Васілевський, П. І. Кулаков. – Вінниця: ВНТУ, – 2011. – 176 с. – ISBN 978-966-641-420-8.
10. Васілевський О. М. Методологічні засади метрологічного забезпечення вимірювань параметрів швидкості електромоторів у статичному режимі роботи / О. М. Васілевський // Вісник Вінницького літехнічного інституту. – 2014. – № 5. – С. 42 – 52. – Режим доступу: [p://visnyk.vntu.edu.ua/article/view/3760/5495](http://visnyk.vntu.edu.ua/article/view/3760/5495).
11. Васілевський О. М. Метрологічна атестація засобу вимірювання моменту інерції електромоторів на основі міжнародних стандартів з оцінювання точності вимірювань / О. М. Васілевський // Збірник наукових праць «Вісник Вінницького літехнічного інституту». – 2014. – № 75. – С. 111 - 118.
12. Васілевський О. М. Метрологічне забезпечення засобу вимірювання параметрів швидкості електроенергії загального призначення / О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук // Системи обробки інформації. – Харків. – 2012. – № 1 (99). – С. 125 - 129.
13. Васілевський О. М. Методика визначення міжповітряного інтервалу засобів вимірювання на основі нової концепції невизначеності / О. М. Васілевський // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 6. – С. 81 - 88.
14. Васілевський А. Н. Исследование статических метрологических характеристик средства измерения электрического момента / А. Н. Васілевський // Оралдың ғылым жаршысы. – Казахстан. – 2013. – № 18 (66). – С. 15 – 22.
15. Васілевський О. М. Засіб вимірювання динамічного моменту електромоторів та аналіз його точності / О. М. Васілевський // Збірник наукових праць «Вісник Вінницького літехнічного інституту». – 2012. – № 73. – С. 52 - 56.
16. Васілевський А. Н. Способ выражения динамической неопределенности средств измерений / А. Н. Васілевський // Приборы и методы измерений. – Минск. – 2013. – № 2 (7). – С. 109 – 113.

Машинобудування	
Васілевський О. М. МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ВИМІРЮВАНЬ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ОБЕРТАЮЧИХ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ	186
Квасников В. П., Орнатский Д. П., Михалко Н. В. АНАЛОГОВЫЙ ИНТЕРФЕЙС ДЛЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СИГНАЛОВ ГЕНЕРАТОРНЫХ ДАТЧИКОВ	194
Мисак С.Й., Клуб М.В. РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМИ РОЗРАХУНКУ СУШИЛЬНОЇ ТА РОЗМЕЛЮВАЛЬНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ПІЛОСИСТЕМ З КБМ(Ш-50) КОТЛІВ ТП-100 ЕНЕРГОБЛОКІВ 200МВт	200
Соловей В.В., Васильев А.И. МЕТАЛЛОГИДРИДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТРАНСФОРМАЦИИ ТЕПЛОТЫ НИЗКОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОТЕНЦИАЛА	207
Черновська К.О. РОЗРОБКА МОДЕЛІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ НА МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ	214
Черновська К.О. ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ НА МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ	217
Енергетика	
Варченко О.І., Юрчук А.О., СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ	221
Васильев А.И. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОГИДРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСФОРМАЦИИ ТЕПЛОТЫ НИЗКОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОТЕНЦИАЛА	225
Данчук М.І., Озарків І.М., Кочубей В.В., Мисак Й.С., Унгелін А.Ю. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СУМІШЕЙ СОЛЕЙ-КРИСТАЛОГІДРАТІВ	231
Охорона навколишнього середовища (інженерна екологія) і ресурсозбереження	
Резт Д. Т., Древецький В. В. ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ НЕПЕРЕРВНОГО ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ МІКРОПЛАНКТОНУ	237
Шавурський Ю.О. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ПІРОЛІЗУ АВТОМОБІЛЬНИХ ШИН НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИМ МЕТОДОМ ДЛЯ ОТРИМАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА	241
Матеріалознавство	
Зенкін М.А. ФОРМАЛІЗОВАНИЙ ВИБІР ЗМІЦНЮЮЧИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	246
Німченко Т.В. ДІАГНОСТИКА ТА МОНІТОРИНГ ЗНОШУВАННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ В ПРОЦЕСІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ	250
Технологія легкої промисловості	
Марченкова С.В. СИНТЕЗ ПРИНЦИПУ ВРАХУВАННЯ ПЕРЕДІСТОРИЇ В ТЕХНІЧНІЙ ДІАГНОСТИЦІ МОБІЛЬНОГО РОБОТА	254
АНОТАЦІЇ	218
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ	262
ВИМОГИ ДО СТАТЕЙ	266

ТЕОРЕТИЧНИЙ І НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ
ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ

THEORETICAL AND APPLIED SCIENCE JOURNAL
ENGINEERING ACADEMY OF UKRAINE



В І С Н И К

ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ

ВИПУСК 3-4

***BULLETIN OF ENGINEERING
ACADEMY OF UKRAINE***

Issue 3-4

Київ 2014 Kyiv