

ПРОБЛЕМИ ВИМІРЮВАНЬ В НАРОДНОМУ ГОСПОДАРСТВІ

УДК 621.313:681.518.54

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

© В.Ю.Кучерук, 1999

Державний технічний університет (м. Вінниця), кафедра "Метрологія та промислова автоматика"

Розглядаються питання, які пов'язані з розробкою засобів вимірювання механічних характеристик електричних машин. Детально проаналізовано існуючі засоби вимірювання і на цій підставі запропоновано новий спосіб вимірювання механічних характеристик з полішеними метрологічними характеристиками. Запропонована структурна схема інформаційно-вимірювальної системи для його реалізації.

Рассматриваются вопросы, связанные с разработкой средств измерения механических характеристик электрических машин. Проведен тщательный анализ существующих средств измерения и на его основе предложен новый способ измерения механических характеристик с улучшенными метрологическими характеристиками. Предложена структурная схема информационно-измерительной системы для его реализации.

In the article the problems connected to development of means of a measurement of mechanical characteristics of electrical machines are considered. The careful analysis of existing means of a measurement is conducted and on it to a basis the new method of a measurement of mechanical characteristics with improved metrological performances is offered. The block diagram of the informational - measuring system for it of realization is offered.

Вступ. Відповідальними етапами на шляху створення інтегрованих систем вимірювання, контролю і управління якістю електричних машин (ЕМ) є розробка та впровадження сучасних методів і засобів для промислових випробовувань та діагностики. Під час різних видів випробовувань ЕМ виникає необхідність вимірювання характеристик руху, а саме: кутової швидкості ω_r ; обертового моменту M ; механічної характеристики $M(\omega_r)$; приведенного моменту інерції ротора J ; моменту механічних втрат M_0 . Згадані фізичні величини входять в загальне рівняння руху ЕМ. Дані параметри можуть вимірюватися як у статичному, так і у динамічному режимі роботи ЕМ.

Механічна характеристика (МХ) являє собою залежність між обертовим моментом і кутовою швидкістю $M = f(\omega_r)$ або $\omega_r = f(M)$, що отримана

при незмінних напрузі живлення і частоті мережі [1].

Із безлічі МХ, зумовлених різними початковими умовами і неінформативними параметрами, необхідно виділити *пускову* МХ. Пускова МХ, яка відповідає підімкненню ОВ до мережі із номінальними параметрами за відсутності на валу додаткових моментів інерції і моменту опору, називається *природною* МХ.

За допомогою динамічної МХ ЕМ при відповідних умовах можливо розраховувати статичні параметри ЕМ. Для трифазної асинхронної ЕМ МХ в режимі реверса за наявності належного додаткового моменту інерції є вельми близькою на ділянці розгону до МХ, що вимірюється в статичному режимі його роботи. Це дає можливість за короткий час визначити такі статичні параметри, як *початковий пусковий момент, максимальний момент* тощо.

Окрім того, МХ дозволяє оцінити деякі види браку. При несиметрії обмотки ротора асинхронної ЕМ внаслідок неякісної заливки у вигляді обриву стержнів ротора, форма МХ істотно відрізняється від зразкової, а при невірному з'єднанні секцій обмотки статора час розбігу затягнений порівняно із зразковим [2].

Вимірювання МХ в перехідному режимі роботи ЕМ має істотні особливості порівняно з виміром МХ у статичному режимі роботи ЕМ:

проведення динамічних вимірювань за короткий проміжок часу;

вимірювання інформативних параметрів у широкому діапазоні;

необхідність спільного вимірювання (наприклад, кутова швидкість - час);

необхідність вияву короточасних змін - «провалів» моменту (особливо так званих «голкових»), які значно погіршують якість механічної енергії, сприяючи виникненню ударів в механічній трансмісії, що має зазори (наприклад, у зубчастих передачах), з якою з'єднана ЕМ;

відсутність методик розрахунку динамічних метрологічних характеристик;

відсутність метрологічного забезпечення засобів вимірювання (ЗВ) МХ.

Окрім того, існують фактори, що значно ускладнюють процес вимірювань:

ручні операції закріплення, підключення, центрування об'єкта вимірювання (ОВ) та давачів;

безліч зовнішніх факторів, які впливають на чистоту проведення досліду (нестабільність напруги живлення, вплив муфти sprzęження (МС) та ін.).

Особливості вимірювань визначаються також і різноманітністю типів ЕМ, що контролюються:

різні висоти осей обертання валу ОВ; різні кути сполучення давачів із вертикально чи горизонтально розташованими валами;

різний діаметр первинного валу МС;

розкид діапазонів зміни вимірюваних параметрів;

різний час вимірювань, який визначається параметрами ОВ.

Розвиток інформаційно-вимірювальної техніки у напрямку все ширшого використання мікроконтролерів, персональних ЕОМ у вимірюваннях, ускладнення ОВ, і, як наслідок, алгоритмів та

процедур вимірювання вимагає використання інтелектуальних ЗВ [3, 4].

Аналіз наведених факторів свідчить про актуальність питань, пов'язаних із розробкою засобів експериментального визначення МХ ЕМ. Однак донині відома порівняно невелика кількість досліджень у цьому напрямку. Розроблені на їх основі ЗВ МХ існують в одиничних екземплярах і здебільшого мають метрологічні характеристики, які не відповідають повною мірою вимогам розробників, виготовлювачів та користувачів ЕМ.

Класифікація та аналіз способів і засобів вимірювання механічної характеристики

У ряді робіт порушується питання класифікації існуючих способів і засобів вимірювання МХ [2, 5-8]. Проте наведені в цих працях класифікації є неповними та незручними для проведення детального аналізу. Враховуючи це, запропонована класифікація ЗВ МХ, зображена на рис.1.

Для зручності введено такі класифікаційні ознаки: за режимом роботи ЗВ; за видом інформативних параметрів; за реагуючою частиною ОВ.

За видом інформативних параметрів ЗВ МХ розподіляються на вимірювання вхідних величин; вихідних величин; вхідних та вихідних величин.

Під вхідними величинами ОВ розуміють такі параметри, як струм в обмотках статора і, напруга U та частота мережі f . Під вихідними - кутову швидкість ω , або прискорення ϵ обертання ротора, обертовий момент на валу M .

За реагуючою частиною ОВ можна виділити такі ЗВ: за реакцією статора ОВ (табл.2-4, а); за реакцією ротора ОВ (табл.2-4, б); комбіновані (табл.2-4, в).

Різниця поміж цими ЗВ полягає у використанні різних первинних перетворювачів: давачі моменту - вимірювання сили тиску на опори; давачі частоти обертання ротора, акселерометри, скочзиметри, давачі кутового положення, тахометри.

Загальна суть способів, заснованих на вимірюванні вхідних величин [9-12] (табл. 1) полягає в тому, що, виходячи із математичної моделі або схеми заміщення ОВ, визначаються вхідні електричні та магнітні параметри, від яких залежить МХ і проводиться їх вимірювання. До переваг цих способів належить те, що відсутні механічні частини

вимірювальних приладів, які прикріплюються до вихідного валу чи до корпусу ОБ, тому ЗВ мало впливає на результати вимірювань. Такі способи

дозволяють використовувати неповну апріорку інформацію для проведення ідентифікації внутрішніх параметрів ОБ за його математичною моделлю.

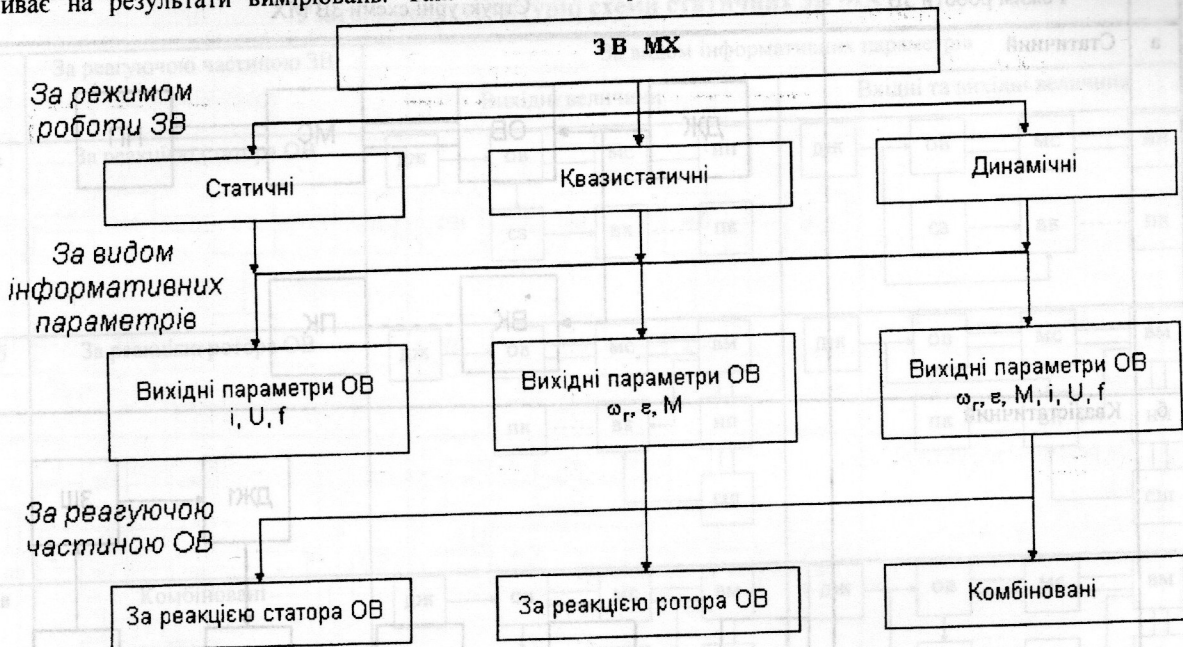


Рис. 1. Класифікація ЗВ МХ.

Проте істотним недоліком цих методів є неповна адекватність математичної моделі (схеми заміщення) ОБ реальному двигунові, що є причиною додаткових похибок, пов'язаних із спрощеним врахуванням реальних фізичних процесів в ЕМ. Додаткові похибки також вносить так звана "вторинна реакція якоря" - реакція статора на гармонічні складові поля ротора, що індукують в обмотках статора додаткові електрорушійні сили і струми, частота яких відмінна від частоти електричної мережі [13]. Це вимагає їх врахування при обробці результатів вимірювань. Внаслідок цих недоліків дані способи не знайшли широкого застосування на практиці.

Усе вищесказане стосується і способів, заснованих на вимірюванні вхідних та вихідних величин [14-16], в яких для точнішого визначення МХ, складові якої взагалі є вихідними величинами ОБ, вимірюються деякі параметри обмотки статора ОБ. Враховуючи ці параметри, можливо досягнути точнішого вимірювання скочвання; компенсації нестійкості напруги та частоти мережі живлення та компенсації параметрів, що впливають на похибку вимірювань, наприклад, температури.

За режимом роботи ЗВ всі ЗВ МХ можна поділити на статичні, квазистатичні і динамічні. Ці способи засновані на дослідженні залежностей $M = f(\omega_r)$ або $\omega_r = f(M)$, які впливають із основного рівняння руху ЕМ:

$$M_{руху}(\omega_r) = M_J(\omega_r) + M_0(\omega_r), \quad (1)$$

де $M_{руху}$ - момент, який розвивається випробовуваним двигуном, Н•м; M_J - момент, що створює кутове прискорення (динамічний момент навантаження), Н•м;

$$M_J(\omega_r) = J \frac{d\omega_r}{dt} = J\epsilon; \quad (2)$$

M_0 - момент механічних втрат (статичний момент навантаження), Н•м; J - момент інерції ротора, кг•м²; ω_r - кутова швидкість обертання ротора, 1/с; ϵ - кутове прискорення обертання ротора, 1/с².

При статичному способі вимірювань [1, 5-9, 17, 18] (табл.2) МХ знаходиться дискретно у статичному режимі ($\epsilon = 0$), коли

$$M_{руху}(\omega_r) = M_0(\omega_r), \quad M_J(\omega_r) = 0. \quad (3)$$

Таблиця 1

Узагальнені структурні схеми ЗВ за вхідними величинами ОВ

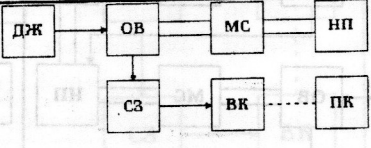
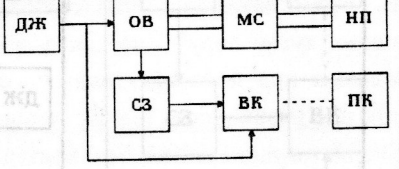
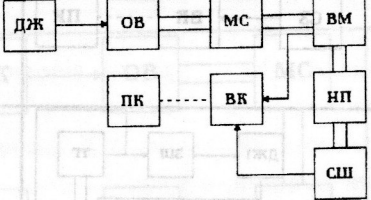
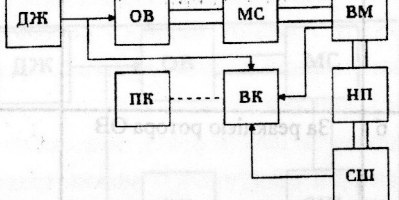
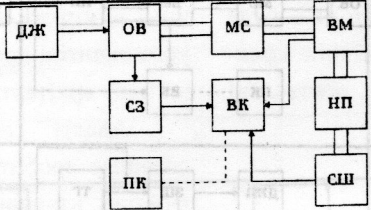
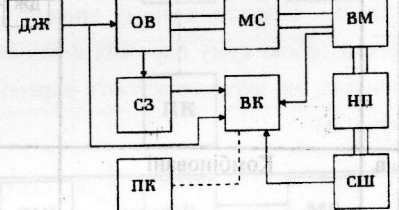
| | Режим роботи ЗВ | Структурні схеми ЗВ МХ |
|---|-----------------|--|
| а | Статичний | |
| б | Квазістатичний | |
| в | Динамічний | |
| | | <p>ДЖ, ДЖ1 - джерела живлення; ОВ - об'єкт вимірювання; МС - муфта спряження; НП - навантажувальний пристрій; ВК - вимрювальний канал; ПК - персональний комп'ютер; ТГ - тахогенератор; ЗШ - задавач швидкості</p> |

Як навантажувальні машини тут звичайно використовують машини постійного струму у балансірному виконанні та торсіонні моментоміри, які вмикаються за схемою ОВ-НП (об'єкт вимірювання - навантажувальний пристрій). Проте цей спосіб

вимірювань має такі недоліки: за наявності аномалій у фазовому портреті $M = f(\omega_r)$ випробуваного двигуна балансірні динамометри не повною мірою забезпечують вимоги стійкої роботи ЗВ у всьому діапазоні швидкостей.

Таблиця 2

Узагальнені структурні схеми статичних ЗВ МХ

| | За реагуючою частиною ЗВ | За видом інформативних параметрів | |
|---|--------------------------|--|---|
| | | Вихідні величини | Вхідні та вихідні величини |
| а | За реакцією статора ОВ |  |  |
| б | За реакцією ротора ОВ |  |  |
| в | Комбіновані |  |  |

ДЖ - джерело живлення; ОВ - об'єкт вимірювання; МС - муфта спряження; НП - навантажувальний пристрій; ВК - вимірювальний канал; ПК - персональний комп'ютер; ТГ - тахогенератор; ЗШ - задавач швидкості; СЗ - сенсор зусилля; СШ - сенсор швидкості; ВМ - вимірювач моменту

Природна жорсткість МХ двигуна постійного струму, включеного за схемою ВД-НП, становить не менше 10...15 % при основній швидкості і значно збільшується на низьких швидкостях. Це може привести до нечіткого визначення поточного моменту ЕМ [19];

при дискретному визначенні МХ часто провал моменту зовсім не виявляється, що вимагає зменшення кроку дискретизації. Це спричиняє збільшення часу проведення експерименту і виникнення додаткових інтерполяційних похибок;

сильне нагрівання ОВ під час експерименту, що приводить до спотворення отриманих результатів у зв'язку із залежністю параметрів ЕМ від температури і необхідності лімітування часу вимірювань (≤ 20 с);

інертність ЗВ, яка вносить запізнення у визначення моменту. Це ускладнює одержання інформації і є причиною додаткових похибок та нагрівання ОВ;

загальна коливальність випробувального стенду ЗВ;

неможливість одержання динамічних характеристик ЕМ;

трудомісткість та енергоємність випробувань.

Квазістатичний спосіб [5, 19-24] (табл.3) визначення МХ реалізується з'єднанням ВД через торсіонний моментомір (ТМ) з навантажувальним пристроєм (ВД-ТМ-НП), що працює на мережу із регульованою частотою. Якщо змінювати частоту у межах $(0.1+1)f_{ном}$, то можна отримати всю МХ.

Таблиця 3

Узагальнені структурні схеми квазістатичних ЗВ МХ

| За реагуючою частиною ЗВ | | За видом інформативних параметрів | |
|--------------------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| | | Вихідні величини | Вхідні та вихідні величини |
| а | За реакцією статора ОВ | | |
| б | За реакцією ротора ОВ | | |
| в | Комбіновані | | |

ДЖ, ДЖ1 - джерела живлення; ОВ - об'єкт вимірювання; МС - муфта sprzęження; НП - навантажувальний пристрій;
 ВК - вимірювальний канал; ПК - персональний комп'ютер; ТГ - тахогенератор; ЗШ - задавач швидкості; СЗ - сенсор
 зусилля; СШ - сенсор швидкості; ВМ - вимірювач моменту

Даний спосіб має ті самі недоліки, що і статичний метод. Крім того, виникає необхідність внесення поправок на величину моменту J_e , що витрачається на прискорення ротора.

Перевагами цього способу можна вважати те, що, підбираючи величину прискорення зміни частоти $f_{ном}$, можна проводити виміри як у статичному, так і в динамічному режимах роботи ОВ.

При динамічному способі вимірювань [2, 5-7, 25-33] (табл.4) реальна МХ визначається вимірюванням обертальних моментів за прискоренням, що розвинуто випробовуваним двигуном під час розбігу, коли

$$M_{руху} = M_J(\omega_r), \quad M_0(\omega_r) = const. \quad (4)$$

Таблиця 4

Узагальнені структурні схеми динамічних ЗВ МХ

| | За реагуючою частиною ЗВ | За видом інформативних пара метрів | |
|---|--------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| | | Вихідні величини | Вхідні та вихідні величини |
| а | За реакцією статора ОВ | | |
| б | За реакцією ротора ОВ | | |
| в | Комбіновані | | |

ДЖ - джерело живлення; ОВ - об'єкт вимірювання; МС - муфта спряження; ВК - вимірювальний канал; ПК - персональний комп'ютер; СЗ - сенсор зусилля; СШ - сенсор швидкості

припущення, що $J = \text{const}$ та $M_0 = \text{const}$, коли насправді момент інерції та момент механічних втрат є функціями від швидкості обертання ротора. Це є причиною додаткових похибок при визначенні МХ; складність алгоритмів обробки результатів (диференціювання та фільтрація $\omega_r(t)$).

Порівняльний аналіз способів та засобів вимірювання механічних характеристик

Для оцінки якості та порівняння способів і ЗВ істотне значення має вибір критерію оцінки їх ефек-

тивності. Вибір конкретних критеріїв ефективності залежить від призначення ЗВ і вимог, які до них висуваються. Відомі загальні рекомендації [34, 35], які доцільно враховувати, вибираючи критерії ефективності. Критерій ефективності повинен: відображати основне призначення ЗВ; бути критичним відносно до параметрів, які дозволяють його варіювати; мати певну конструктивність, яка дає змогу відносно просто визначати його чисельне значення для ЗВ; бути достатньо універсальним, дозволяти

порівнювати ефективність систем одного призначення і вибирати кращий варіант.

У теорії інформаційно-вимірювальних систем використовують різноманітні характеристики точності, швидкодії, надійності і вартості, кожна з яких може використовуватися як окремий показник якості ЗВ. Окремі показники характеризують ЗВ під тим чи іншим "кутом зору" і не дають достатньо повного уявлення про його ефективність загалом. Це свідчить про необхідність під час порівняльного аналізу використовувати узагальнені критерії ефективності.

Найбільш простим і зручним для проведення аналізу і вибору базового способу розробки ЗВ є узагальнений якісний критерій ефективності (УКЕ) [36]. Якісний критерій характеризує, досягнута чи не досягнута ціль (ефект), яка поставлена перед ЗВ. Критерій ефективності можна трактувати як такий, що набуває тільки два значення: 1 - якщо ціль досягнута, 0 - в протилежному випадку. Тоді УКЕ буде являти собою суму окремих якісних критеріїв ефективності, які характеризують окремі цілі, поставлені перед ЗВ:

$$УКЕ = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot ОКЕ_i, \quad (5)$$

де α - вагові коефіцієнти; n - загальна кількість ОКЕ.

Загальна ефективність буде виражатися відношенням ефективностей ЗВ на базі реального способу вимірювання МХ E_p і ЗВ на базі потенційного способу вимірювання МХ E_n :

$$E = \frac{E_p}{E_n} \quad (6)$$

При цьому обумовимо, що для досягнення якої-небудь окремої цілі ЗВ повинен реалізовувати усі свої потенційні можливості в рамках використаного ним способу вимірювання. Це положення дозволяє проводити порівняльний аналіз ЗВ на рівні реалізованих у них способів вимірювань. При цьому не виникає необхідності встановлювати зв'язок між ОКЕ і параметрами ЗВ, певні значення чи інтервал зміни яких визначали би числове значення ОКЕ: 1 чи 0.

Вважаючи, що ЗВ повинен забезпечувати як функціональні, так і економічні вимоги на одному рівні, прийmemo $\alpha_i = 1, i = 1(1)n$.

Виходячи із проведених класифікації та аналізу способів і ЗВ МХ, представимо результати їх порівняльної оцінки у табл.5.

Як показує порівняльний аналіз, наявні способи і ЗВ МХ на сучасному етапі їх розвитку не дозволяють повною мірою вирішити завдання підвищення ефективності і вірогідності вимірювань. Це пояснюється притаманними їм недоліками. На метрологічні характеристики ЗВ МХ дуже впливають систематичні та випадкові похибки. Вони спричинені дестабілізуючим впливом навантажувального пристрою, коливаннями амплітуди та частоти в промисловій мережі, втратами у механічній частині вимірювального перетворювача, впливом МС, а також неврахуванням у результатах вимірювань МХ впливу всіх складових частин рівняння руху.

З іншого боку, проведений аналіз показує, що ОВ, вимірювальні перетворювачі є необхідними компонентами розглянутих структур і визначають ту чи іншу архітектуру ЗВ МХ.

Аналіз особливостей вимірювання МХ дозволяє зробити висновок, що вимірювання МХ вимагає наявності відповідних алгоритмів управління ОВ, вимірювальних перетворень, розрахунків і обробки результатів вимірювань. Тому підвищення якості і достовірності вимірювання МХ, а, отже, підвищення показників якості виготовлених електродвигунів можливо тільки завдяки реалізації засобу вимірювання МХ як інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) з використанням ЕОМ.

У результаті проведеного порівняльного аналізу встановлено, що в промислових умовах найефективнішим є динамічний спосіб вимірювання МХ ($E=0.8$), який найбільш близький до потенційного ($E=1$). Властиві динамічному способу недоліки обмежують сферу його використання, але висока інформативність, швидкість і технологічність вигідно відрізняють цей метод від інших. Розглянутий метод має всі необхідні передумови для удосконалення і розробки на його основі інтелектуальних ІВС МХ ЕМ.

Вдосконалення динамічного способу вимірювання механічної характеристики

На підставі проведеного аналізу недоліків динамічного способу вимірювання МХ запропоновано його подальше вдосконалення [37-39], в якому враховуються параметри M_0 та J . Суть його полягає в такому.

Для реалізації способу необхідно мати два зразки моменту інерції, які виконані у вигляді простих тіл обертання (дисків або циліндрів). Моменти інерції зразків вираховують заздалегідь за їхніми геометричними і ваговими параметрами.

Таблиця 5

Оцінка методів та ЗВ МХ

| № | Назва критерію | Статичні методи | Квазістатичні методи | Динамічні методи | Потенційний метод |
|----|---|-----------------|----------------------|------------------|-------------------|
| 1 | Висока точність вимірювання МХ в динамічному режимі роботи ЕМ | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | Висока точність вимірювання МХ в статичному режимі роботи ЕМ | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | Відсутність впливу ЗВ на ОВ | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 4 | Недопускання перегріву ОВ | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 5 | Висока розрізнявальна здатність за швидкістю обертання | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | Забезпечення стійкої роботи у всьому діапазоні швидкостей обертання | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | Простота конструкції механічної частини ІВС | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 8 | Простота конструкції електричної частини ІВС | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 9 | Мала трудомісткість, енергоємність і собівартість проведення вимірювань | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 10 | Малий час вимірювань і обробки результатів | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | УКЕ | 3 | 4 | 8 | 10 |
| | E | 0.3 | 0.4 | 0.8 | 1 |

На вихідному кінці вала ЕМ встановлюють перший зразок моменту інерції J_{31} і вмикають ЕМ в мережу. Під час перехідного процесу реєструють ω_r ; після закінчення перехідного процесу ЕМ вимикають і в процесі його самогальмування також реєструють ω_r .

Коли ЕМ зупиниться, знімають перший зразок моменту інерції і так само встановлюють другий зразок J_{32} . Із ЕМ, з'єднаною з другим зразком моменту інерції, проводять такі самі досліди розгону і самогальмування та реєструють аналогічні параметри.

Рівняння руху ЕМ відповідно з першим і другим зразками мають вигляд:

$$\begin{cases} M(\omega_r) = M_0(\omega_r) + (J + J_{31}) \cdot \epsilon_{n1}(\omega_r); \\ 0 = M_0(\omega_r) + (J + J_{31}) \cdot \epsilon_{r1}(\omega_r); \\ M(\omega_r) = M_0(\omega_r) + (J + J_{32}) \cdot \epsilon_{n2}(\omega_r); \\ 0 = M_0(\omega_r) + (J + J_{32}) \cdot \epsilon_{r2}(\omega_r), \end{cases} \quad (7)$$

де $\epsilon_{n1}, \epsilon_{r1}$ - кутові прискорення розгону і самогальмування ЕМ з першим зразком відповідно; $\epsilon_{n2}, \epsilon_{r2}$ - кутові прискорення розгону і самогальмування ЕМ з другим зразком відповідно.

Здійснення експериментів розгону і самогальмування є методичною основою запропонованого способу і дозволяє скласти і розв'язати систему із трьох рівнянь з трьома невідомими M , M_0 та J . Для цього можна брати комбінацію з будь-яких трьох рівнянь системи (7). Виберемо для

знаходження невідомих перше, друге і четверте рівняння системи (7). Прийемо також, що $J_{31} = 0, J_{32} = J_3$. Розв'язок системи (7) матиме вигляд:

$$\begin{cases} M_0(\omega_r) = J_3 \cdot \frac{\epsilon_{r1}(\omega_k) \cdot \epsilon_{r2}(\omega_k)}{\epsilon_{r2}(\omega_k) - \epsilon_{r1}(\omega_k)}; \\ J = J_3 \cdot \frac{\epsilon_{r2}(\omega_r)}{\epsilon_{r2}(\omega_r) - \epsilon_r(\omega_r)}; \\ M = J_3 \cdot \left(\epsilon_{pi} + \frac{\epsilon_{r1}(\omega_k) \cdot \epsilon_{r2}(\omega_k)}{\epsilon_{r2}(\omega_k) - \epsilon_{r1}(\omega_k)} \right) - \\ - J_3 \cdot \left(- \frac{\epsilon_{r2}(\omega_r)}{\epsilon_{r2}(\omega_r) - \epsilon_r(\omega_r)} \right) \end{cases} \quad (8)$$

Зазначимо, що M - це динамічний електромагнітний момент без врахування моменту опору M_0 . Повний динамічний момент визначиться як $M_d = M + M_0$.

Для реалізації запропонованого способу ЗВ повинен містити лише канал вимірювання кутової швидкості. Практична реалізація вимірювального каналу наведена на рис.2, експериментальна МХ - на рис.3.

Висновки. Отже, порівняльний аналіз показав, що для вимірювання механічної характеристики найефективнішим є динамічний спосіб. Автором проведено його подальше вдосконалення, яке враховує вплив на результат вимірювання таких параметрів, як момент механічних втрат M_0 і момент інерції ротора J . Це дає змогу істотно підвищити метрологічні характеристики засобів вимірювання МХ на основі динамічного способу.

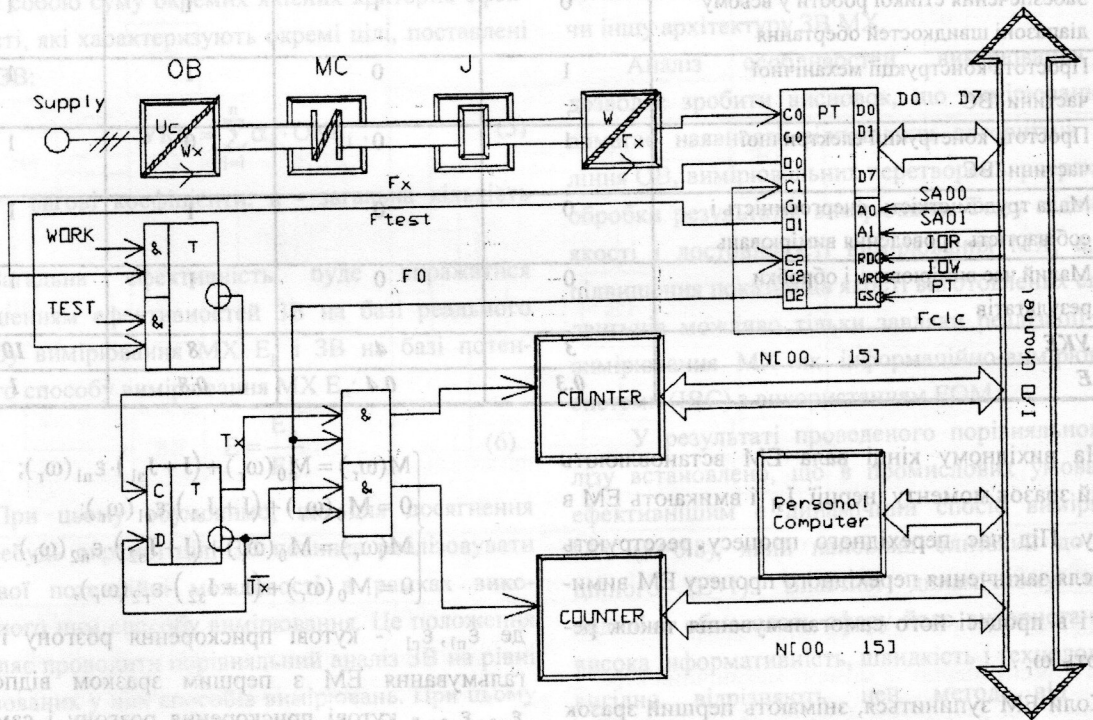


Рис.2. Вимірювальний канал кутової швидкості ω_r .

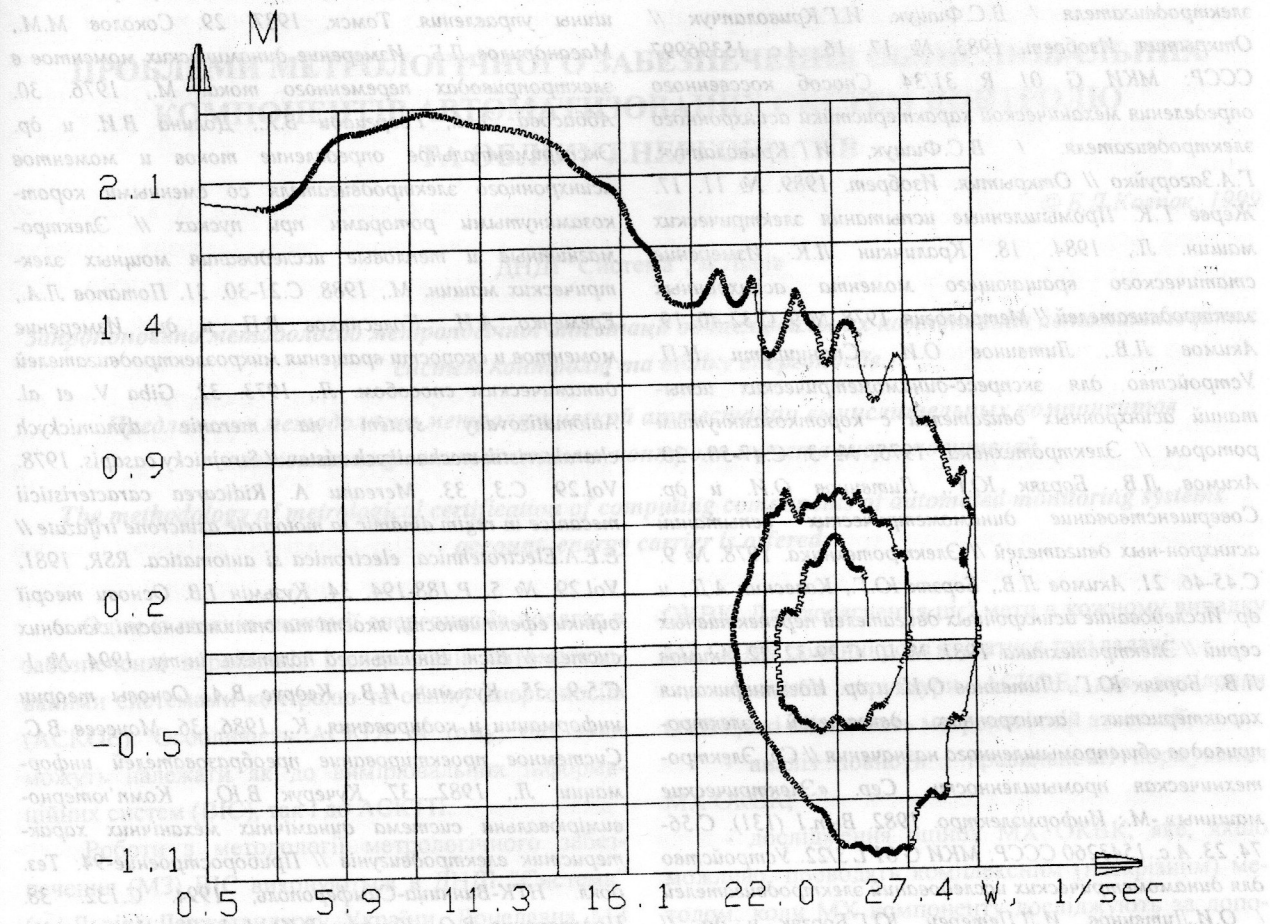


Рис.3. Экспериментальна МХ трифазного асинхронного двигуна.

1. ГОСТ 17154-71. Машины электрические вращающиеся. Характеристики, расчетные параметры и режимы работы. Термины и определения. М., 1971. 2. Потапов Л.А., Зотин В.Ф. Испытание микроэлектродвигателей в переходных режимах. М., 1986. 3. Соболев В.С. Актуальные вопросы развития теории интеллектуальных измерительных систем // Приборы и системы управления. 1983. № 3. С.16-19. 4. Цветков Э.И. Процессорные измерительные средства. Л., 1989. 5. Коварский Е.М., Янко Ю.И. Испытание электрических машин. М., 1990. 6. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. М., 1988. 7. Потапов Л.А., Юферов Ф.М. Измерение вращающихся моментов и скоростей вращения микроэлектродвигателей. М., 1977. 8. Одинец С.С., Томилин Г.Е. Средства измерения крутящего момента. М., 1977. 9. Долина В.И. Экспериментальное определение вращающихся моментов двигателей и моментов сопротивления механизмов средней и большой мощности в эксплуатационных условиях // Тр. ВНИИЭ. 1973. Вып.42.

С.103-116. 10. А.с. 1545107 СССР; МКИ G 01 L 3.00. Устройство для измерения электромагнитного момента асинхронного электродвигателя / М.Я.Кривицкий, А.М.Вачегин, С.В.Добрынин // Открытия. Изобрет. 1981. № 11. 11. Определение зависимости вращающегося момента от угловой частоты вращения ротора в процессе прямого пуска вхолостую / В.Б.Сопель, А.Е.Литвинов, В.И.Ярмоленко и др. Донецк, 1984. 27 с. Деп. в УкрНИИНТИ №649 - Ук85. 12. Хомерики О.К., Саонишвили Т.П., Иванов А.В. Структурные методы повышения точности устройств косвенного измерения крутящих моментов // Информационно-измерительные системы: Тезисы докладов. Винница, 1985. С.200-201. 13. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах / Пер. с англ. М., 1981. 14. А.с. 1499290 СССР; МКИ G 01 R 31/34. Способ косвенного определения механической характеристики асинхронного электродвигателя / А.Н.Даниленко, Н.И.Белобловский // Открытия. Изобрет. 1984. № 27. 15. А.с. 1499290 СССР; МКИ G 01 R 31/34. Косвенный способ определения

- механических и пусковых характеристик асинхронного электродвигателя / В.С.Фищук, И.Г.Криволапчук // Открытия. Изобрет. 1983. № 17. 16. А.с. 15396997 СССР; МКИ G 01 R 31/34. Способ косвенного определения механической характеристики асинхронного электродвигателя. / В.С.Фищук, И.Г.Криволапчук, Г.А.Загоруйко // Открытия. Изобрет. 1989. № 11. 17. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Л., 1984. 18. Краличкин Л.К. Измерение статического вращающего момента асинхронных электродвигателей // Метрология. 1978. № 9. С.32-40. 19. Акимов Л.В., Литвинов О.И., Спанцирети Н.П. Устройство для экспресс-динамометрических испытаний асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором // Электротехника. 1975. № 3. С.47-50. 20. Акимов Л.В., Борзяк Ю.Г., Литвинов О.И. и др. Совершенствование динамометрических испытаний асинхронных двигателей // Электротехника. 1978. № 9. С.45-46. 21. Акимов Л.В., Борзяк Ю.Г., Колесник А.Д., и др. Исследование асинхронных двигателей перспективных серий // Электротехника. 1981. № 10. С.29-32. 22. Акимов Л.В., Борзяк Ю.Г., Литвинов О.И. и др. Идентификация характеристик асинхронных двигателей электроприводов общепромышленного назначения // Сб. Электротехническая промышленность. Сер. «Электрические машины». -М.: Информэлектро. 1982. Вып.1 (131). С.56-74. 23. А.с. 1543260 СССР; МКИ G 01 L 3/22. Устройство для динамометрических исследований электродвигателей / О.И.Литвинов, И.Л.Петерец, Ю.Г.Борзяк и др. // Открытия. Изобрет. 1984. № 11. 24. А.с. 857754 СССР; МКИ G 01 L 3/22. Устройство для регистрации механических характеристик электродвигателей / А.А.Бимба, В.А.Лимба, А.А.Лукошевичюс и др. // Открытия. Изобрет. 1986. № 45. 25. Синельников Е.М., Сомихина Г.С. Измерение вращающих моментов асинхронных двигателей при разбеге // Электричество. 1950. № 7. С.48-53. 26. А.с. 43169 СССР; МКИ G 01 M 1/10. Способ определения зависимости вращающего момента от скорости двигателя. / С.З.Барский, Н.А.Мясников // Открытия. Изобрет. 1986. № 12. 27. Лейтман М.Б. Автоматическое измерение выходных параметров электродвигателей: (методы и аппаратура). М., 1983. 28. Костоков Ю.П., Костилов С.Н. Измерение динамических механических характеристик двигателей переменного тока // Электромеханические устройства и шины управления. Томск, 1987. 29. Соколов М.М., Масандрилов Л.Б. Измерение динамических моментов в электроприводах переменного тока. М., 1976. 30. Аббасова Э.М., Георгиади В.Х., Долина В.И. и др. Экспериментальное определение токов и моментов асинхронного электродвигателя со сменными короткозамкнутыми роторами при пусках // Электромагнитные и тепловые исследования мощных электрических машин. М., 1988. С.21-30. 31. Потапов Л.А., Еременко А.И., Колесников В.П. и др. Измерение моментов и скорости вращения микроэлектродвигателей динамическим способом. Л., 1973. 32. Giba V. et al. Automatizovaný systém na meranie dynamických charakteristik mechanických sústav // Strojnícky časopis. 1978. Vol.29. C.3. 33. Mereanu A. Ridicarea caracteristicii mecanice in regim dinamic la motoarele asincrone trifazate // E.E.A.Electrotehnica, electronica si automatica. RSR, 1981. Vol.29. № 5. P.188-194. 34. Кузьмін І.В. Основи теорії оцінки ефективності, якості та оптимальності складних систем // Вісн. Вінницького політехн. ін-ту. 1994. № 1. С.5-9. 35. Кузьмин И.В., Кедрус В.А. Основы теории информации и кодирования. К., 1986. 36. Мусеев В.С. Системное проектирование преобразователей информации. Л., 1982. 37. Кучерук В.Ю. Комп'ютерно-вимірювальна система динамічних механічних характеристик електродвигунів // Приборостроение-94: Тез. докл. НТК-Вінниця-Симферополь, 1994. С.132. 38. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю. Інформаційно-вимірювальна система механічних характеристик електричних машин // Новые технологии, материалы, оборудование (исследования, разработки, внедрение): Материалы докл. междунар. академических чтений. К., 1995. С.85-91. 39. 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, the High Tatras. Slovakia, 1996. P.633-637. 40. Kucheruk V.Yu., Podzharenko A.V. Computer-Measuring System for rotor balancing of Electromechanical Systems // Second Int. Scientific Conf. «Unconventional Electromechanical and Electrotechnical Systems» UEES'96, Proceeding volumes 2. Szczecin, 1996. P.483-488.

37. Кучерук В.Ю. Комп'ютерно-вимірювальна система динамічних механічних характеристик електродвигунів // Приборостроение-94: Тез. докл. НТК-Винница-Симферополь, 1994, с. 132.
38. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю. Інформаційно-вимірювальна система механічних характеристик електричних машин // Новые технологии, материалы, оборудование: Материалы докл. международных академических чтений. - К., 1995, с. 85-91.
39. V. Podzharenko, V. Kucheruk Computer-Measuring System of the Mechanical Characteristics of Electrical Drives // Proceeding of the EDPE'96 Int. Conf. on Electrical Drives and Power Electronics. KOSICE, 1-3 October 1996. - Technical University of Kosice, Slovakia, 1996. - V. 2., p. 633-637.
40. V. Kucheruk, V. Podzharenko Computer-Measuring System for rotor balancing of Electromechanical Systems // Second Int. Scientific Conf. "Unconventional Electromechanical and Electrotechnical Systems" UEES'96, Proceeding volumes 2, Szczecin, 1996, pp. 483-488.