

ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

---

На правах рукопису



ПОДЖАРЕНКО ВОЛОДИМИР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Спеціальність: 05.11.16 - Інформаційно-вимірвальні системи  
(в науці та промисловості)

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Вінниця - 1995

78 31, 616

ЛННБ України ім. В. Стефаніка



00756361 (S)

опис.  
у Вінницькому державному технічному  
університеті ім. Петра Могили  
дрі "Автоматика та інформаційно-вимі-  
рювальна техніка"

Офіційні опоненти :

доктор технічних наук, професор Дудикевич В.Б.  
доктор технічних наук, професор Іваненко В.І.  
доктор технічних наук, професор Скрипник Ю.О.

Провідна організація - Конструкторське бюро "ШТОРМ",  
м. Київ.

Захист відбудеться "28" січня 1995 р. о 10  
годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д ІО.ОІ.ОІ.  
Вінницького державного технічного університету за адресою  
(28602І, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, № 95, ГУК)

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Він-  
ницького державного технічного університету.

Автореферат розісланий "27" листопада 1994 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Оухимчук С. В.

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. В сучасних умовах господарювання важливого значення набуває проблема забезпечення виробничих технологій високоефективними методами та засобами контрольновимірвальної техніки, які сумісно з засобами обчислювальної техніки створюють новий клас засобів вимірювання - інтелектуальні вимірвальні системи (ІВС). Реалізація можливостей такого з'єднання потребує відповідного алгоритмічного та метрологічного забезпечення, орієнтованого на програмну частину засобів вимірювання (ЗВ), яке, в свою чергу, визначається об'єктом вимірювання (ОВ). В дисертаційній роботі ОВ є електромеханічні перетворювачі енергії (ЕМПЕ), до яких відносяться двигуни постійного струму, крокові двигуни, синхронні та асинхронні двигуни, інформаційні електричні машини.

Масовий випуск та практичне застосування ЕМПЕ в усіх сферах народного господарства вимагає підвищення їх якості і ставить дуже важливе завдання автоматизації випробувань, як в умовах серійного виробництва (приймально-здавальні випробування, періодичні, типові, інспекційні, міжвідомчі, кваліфікаційні, атестаційні випробування та інш.), так і при лабораторних дослідженнях. Випробування ЕМПЕ являють собою надзвичайно трудомісткий процес зі складною методикою визначення окремих параметрів і пов'язані з великими затратами часу та матеріальних ресурсів. Ця проблема ускладнюється і тим тим, що серійно не випускаються ЗВ основних характеристик ЕМПЕ, які необхідні для укомплектування вимірвальних систем, не випускаються також і випробувальні стен-

ди, а їх промислові випробування не достатньо автоматизовані.

Дослідженню та створенню ІВС, в тому числі ІВС характеристик ЕМПЕ, присвячена велика кількість робіт вітчизняних та зарубіжних вчених. Значний вклад в розробку теорії таких систем внесли вчені Т.М.Алієв, О.Д.Гольдберг, Є.І.Гітис, В.Б.Дудкевич, В.С.Гутников, В.Н.Іванов, І.П.Клиторін, В.Р.Кноррінг, А.І.Кондалев, К.Л.Куликовський, В.Т.Маликов, Б.Н.Малиновський, В.Н.Малиновський, П.П.Орнацький, А.А.Потапов, Ю.М.Туз, Ю.О.Скрипник, Б.І.Стадник, О.Д.Трубенко, М.П.Цапенко, Е.І.Цветков, В.Д.Циделко, В.М.Шляндін та їх учні. Однак із-за недостатньої теоретичної опрацьованості загальних принципів побудови, а також відсутність програмно-апаратних засобів та метрологічного їх забезпечення обумовлюють відсутність ІВС в практиці випробувань ЕМПЕ.

Тому дослідження та розробка ІВС характеристик ЕМПЕ на сьогодні є завданням актуальним, що має важливе народногосподарське значення.

Ступінь дослідженості тематики дисертації.

На сьогоднішній день невіршеними проблемами випробування ЕМПЕ є :

І. В математичному аспекті - не досліджена математична модель ОВ - асинхронного двигуна (нелінійна жорстка система) в плані визначення інформативних параметрів та репрезентативних режимів його роботи, а також не розроблені методи ідентифікації параметрів роторного кола;

2. В *технічному аспекті* - не розроблені програмно-апаратні засоби ІВС характеристик АД, які б у повній мірі задовольняли сучасні технічні та метрологічні вимоги;

3. В *метрологічному аспекті* - не розв'язана задача метрологічного забезпечення ІВС та її компонентів, а саме каналу вимірювання кутової швидкості та механічних моментів (крутного, пускового, моменту інерції)

**МЕТА РОБОТИ** - вирішення важливої науково-технічної проблеми створення інтелектуальних вимірювальних систем характеристик електромеханічних перетворювачів енергії та впровадження їх в практику вимірювань.

Основне завдання наукового дослідження пов'язане з необхідністю розробки концепції інтелектуалізації вимірювань характеристик ЕМПЕ, синтез структури ІВС, а також створення програмно-апаратних її засобів і математичного та метрологічного забезпечення.

**НАУКОВА НОВИЗНА** роботи полягає в розробці наукових основ, методів і рекомендацій, спрямованих на створення нового класу вимірювальних систем характеристик електро-механічних перетворювачів енергії.

Найістотніші наукові результати, що вперше представлені в дисертації і мають повну новизну :

-розроблена концепція інтелектуалізації вимірювань ЕМПЕ шляхом систематизації, узагальнення методів та засобів вимірювання, що використовуються при випробуваннях;

-обгрунтовано вибір математичної моделі асинхронного електродвигуна (АД) як ОБ і проведені її дослідження на

предмет визначення інформативних параметрів та репрезентативних ділянок механічної характеристики;

- за результатами досліджень математичної моделі АД у чотирьох режимах його роботи (розбігу, усталеному, ударного навантаження та вибігу), сформульовані рекомендації по вибору найефективнішого режиму роботи для вимірювання характеристик з метою подальшого визначення параметрів, що не піддаються вимірюванням;

- розроблені та досліджені методи ідентифікації ОБ, що описуються нелінійними жорсткими диференціальними рівняннями, з використанням функцій чутливості та нелінійного фільтру Н. Дистефано;

- узагальнені та розвинуті основи теорії тахометрії, розроблена і досліджена метрологічна модель вимірювального каналу кутової швидкості та синтезована його структура з адаптацією на інваріантність;

- узагальнені та розвинуті основи теорії динамометрії, розроблена метрологічна модель вимірювального каналу обертового моменту та синтезована його структура, як складової ІВС ХАД;

Вірогідність результатів наукових положень і висновків, сформульованих в дисертації, обумовлюється експериментальним підтвердженням розроблених в дисертації теоретичних положень, реалізацією на ЕОМ комплексу алгоритмів та програм ідентифікації параметрів роторного кола ОБ. Опрацьовані в дисертації апаратні та програмні засоби ІВС характеристик АД після метрологічної їх атестації апробовані на виробництві і в навчальному процесі, а також впроваджені в практику.

Практична цінність. До розроблених в дисертації конкретних результатів, що мають важливе значення і знайшли практичну реалізацію належать :

-методика структурного синтезу вимірювальних перетворювачів (тахометричних, динамометричних) як компонентів ІВС характеристик ЕМРЕ перетворювачів енергії з оптимальним розподілом функціональних можливостей між апаратними та програмними засобами;

-методика дослідження та знаходження інформативних параметрів ЕМРЕ а також вибір репрезентативних режимів їх роботи ОВ;

-методика ідентифікації внутрішніх параметрів ОВ, що описуються жорсткими нелінійними диференціальними рівняннями, та програмне забезпечення для визначення параметрів, які не можливо виміряти;

-способи вимірювання механічної та пускової характеристики АД в динамічному режимі його роботи;

-методика метрологічної атестації та перевірки вимірювальних каналів ІВС характеристик АД.

Впровадження ІВС характеристик АД та її компонентів дало змогу автоматизувати вимірювання при випробуванні АД, значно скоротити час випробувань (з 36 нормогодин до десятка хвилин), а також підвищити при цьому і точність вимірювань. Розроблені в дисертації методики та засоби вимірювань можуть застосовуватись також і при випробуванні газотурбинних двигунів, гідродвигунів, двигунів внутрішнього згорання та інш., що значно розширює можливості практичного застосування результатів роботи.

## РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

Основний зміст дисертаційної роботи складають результати досліджень, що виконувались на кафедрі "Автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки" Вінницького державного технічного університету в період з 1975 по 1994 р.

Під керівництвом та за участю автора розроблені, метрологічно атестовані та впроваджені :

- засоби вимірювання швидкості обертання валу електродвигуна на Вінницьком електротехнічному заводі (ВЕЗ);

- інформаційно-вимірювальний комплекс електромеханічних параметрів електродвигунів на ВЕЗ;

- система автоматизованого контролю механічних характеристик електродвигунів в інституті електродинаміки АН УССР;

- автоматизований стенд налагодження програмного забезпечення ІВС у ВО "Альтаір", м. Москва;

- система автоматизованого контролю мінімального обертового моменту асинхронних електродвигунів в СКБ "Укрелектромаш", м. Харків;

- пристрій спряження для засобів вимірювання пускового моменту електродвигунів на заводі "Електродвигун", м. Ужгород;

- засіб вимірювання частоти, який використовується для реалізації способу дослідження гуморальних середовищ. (позитивне рішення на видачу патенту Росії № 94-006876/І4(006851) від 28.02.94)

Матеріали дисертації впроваджені в навчальний процес у Вінницькому державному технічному університеті і знайшли відображення у чотирьох навчальних посібниках.

**Апробація роботи.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 4 Міжнародних, 17 Всесоюзних, 8 Республіканських науково-технічних конференціях, а також на конференціях Вінницького політехнічного інституту в 1980-1994 р.

Засоби вимірювання, що розроблялися за участю автора неодноразово експонувалися на ВДНГ; автор нагороджений срібною медаллю.

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 89 робіт, в тому числі одна монографія та 22 винаходи.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, шести глав, висновків по роботі, переліку літератури та додатку.

**Особистий внесок дисертанта.** Основні результати отримано автором самостійно, або при його безпосередній участі.

**Методи дослідження.** Для розв'язування поставлених задач використовувалися методи теорії інформаційно-вимірювальної техніки, теорії ідентифікації, фільтрації та кореляційного аналізу, теорія розв'язок інтегро-диференціальних рівнянь, теорія матриць, апарат математичного програмування.

**Об'єкт дослідження** - метрологічні моделі, структура, програмні та апаратні засоби вимірювальних каналів ІВС характеристик АД, а також сам ОВ.

#### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У вступній частині обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, формулюється головна мета, доводиться

наукова новизна та практична цінність роботи, розкриваються методи дослідження, реалізація та апробація результатів дисертаційної роботи.

В першій главі проведено аналіз застосування засобів обчислювальної техніки в практику вимірювання та розглядаються напрямки розвитку комп'ютерно-вимірювальних систем. Сучасний рівень комп'ютеризації вимірювань пов'язаний з наданням процесорним ЗВ можливості цілеспрямованого вибору раціонального алгоритму вимірювання, який визначається властивостями ОВ, умовами вимірювань, а також вимогами та обмеженнями щодо процедури вимірювання. Розуміючи під інтелектуальністю здатність технічного засобу спілкуватися з оператором та приймати рішення про характер подальшої дії, які ґрунтуються на знаннях, можна зробити висновок про те, що комп'ютеризація вимірювань полягає в їх інтелектуалізації. Природньо, що для створення ІВС необхідне подальше їх ускладнення та розширення граничних функціональних можливостей за рахунок апаратної та програмної надлишковості. Оскільки ІВС повинні бути наділені знаннями і, перш за все, знаннями про вимірювання, то виникає проблема формування та раціональної організації цих знань, охоплюючих відомості про об'єкти та умови вимірювань, алгоритми і засоби вимірювань.

Аналізуючи стан цього питання за результатами публікацій в періодичній літературі, а також на підставі практичних знань можна дійти висновку, що дослідження у цій галузі інтенсивно розвиваються в трьох основних напрямках:

1. теоретичні та методологічні аспекти інтелектуалізації вимірювальної техніки;

2. питання, створення технічних засобів, наділених елементами інтелекту, що відповідають необхідним вимогам для реалізації ІВС;

3. проектування вимірювальних інформаційних систем з використанням експертних систем.

В ряді робіт сформульована загальна концепція у цій галузі, до основних положень якої відносяться морфологічні та функціональні ознаки, включення до складу ІВС експертних систем та інш. Разом з тим слід відзначити про відсутність концепції проектування ІВС для конкретних об'єктів дослідження, таких як, наприклад, ЕМПЕ, які представляють широкий клас технологічних об'єктів.

Під інтелектуальною вимірювальною системою характеристик електромеханічних перетворювачів енергії (ІВС ХЕМПЕ) будем розуміти сукупність взаємодіючих об'єктів різної природи наділених системними властивостями. Із цього випливає перший принцип концепції побудови ІВС ХЕМПЕ - принцип *єдності* (цілосності), суть якого полягає у тому, що композиція і декомпозиція направлені на генерування характеризуючої системи інформації більш високої якості:

Оскільки в структурі системи ОВ є змінним елементом зі своїми властивостями, то виконання принципу єдності потребує, щоб така система була адаптивною і параметри її вибиралися з урахуванням властивостей ОВ. Тобто виникає необхідність у попередньому тестовому замірі параметрів ОВ з подальшим уточненням параметрів ІВС ХЕМПЕ.

Другий принцип концепції це принцип *цілеспрямованості*, який полягає у тому, що в ІВС ХЕМПЕ як в будь-якій вимірю-

вальної системи взаємодія підсистем підпорядкована глобальній цілі - одержанню вимірної інформації з заданою точністю та вірогідністю. При цьому можуть не враховуватися будь-які фактори і властивості підсистем, які не працюють на досягнення поставленої мети.

Надзвичайно важливим в концептуальному плані проектування ІВС ХЕМПЕ є принцип моделювання. Будь-яка технічна система відображається кінцевою множиною моделей, кожна з яких відбиває певну грань її сутності, але не всі характеристики можуть бути вимірними. В ЕМПЕ ряд параметрів принципово неможливо виміряти без спеціального ускладнення їх конструкції. До таких параметрів відносяться, наприклад, опір та індуктивність ротора, коефіцієнт взаєміндукції та інш. Тому для вирішення цієї проблеми необхідна математична модель ЕМПЕ як ОБ, яка б зберігалася у пам'яті комп'ютера, і підтримувалась відповідним математичним та програмним забезпеченням.

Ще один принцип важливий для інтелектуалізації ІВС ХЕМПЕ це принцип розвитку. Він полягає у тому, що структура та принципові рішення, прийняті для технічних засобів і математичного забезпечення ІВС ХЕМПЕ, повинні забезпечувати її розвиток, нарощування та ускладнення покладених на неї завдань.

Запропонована концепція створює передумови для систематизації та аналізу публікацій, присвячених проблемі інтелектуалізації вимірювань характеристик електродвигунів.

В результаті ретроспективного аналізу та з урахуванням концептуальних принципів розроблена класифікація методів та

комп'ютерних засобів вимірювання характеристик ЕМРЕ. Із класифікації випливає, що завдяки комп'ютерізації вимірювань стає можливим використання емпірико-теоретичних методів дослідження ЕМРЕ. Для реалізації вказаних методів необхідні додаткові дослідження як ОБ, так і вимірювальних каналів ІВС, а також розробка математичного, програмного та метрологічного забезпечення.

У другій главі методом чисельного експерименту досліджується математична модель ОБ - асинхронного двигуна (АД), як найбільш масового та складного представника класу ЕМРЕ. Головною метою досліджень класичної моделі АД є визначення найбільш інформативних параметрів, а також репрезентативних ділянок механічної характеристики в плані ефективного використання їх для визначення параметрів, що не піддаються вимірюванню. Розглядаються чотири режими роботи : режим розбігу ротора, усталений режим, ударного навантаження та режим вибігу.

Параметрична модель скінченомірної неперервної системи має вигляд системи нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку.

$$\frac{dx_i}{dt} = g_i(x_1, \dots, x_n, t, a_1, \dots, a_m), \quad i = \overline{1, n} \quad (1)$$

або як векторне рівняння

$$\frac{dx}{dt} = g(x, t, a) \quad (2)$$

де  $x = \{x_1, \dots, x_n\}$  - вектор стану,  $a = (a_1, \dots, a_m)$  - вектор параметрів.

У загальному випадку розв'язок рівняння (2) залежить від початкового моменту  $t_0$  і початкового значення  $x_0 = x(t_0)$ .

тому його можна записати у вигляді

$$x = x(t, t_0, x_0). \quad (3)$$

Загальний розв'язок (3) для рівняння (2) залежить від  $(n+m+1)$  скалярних параметрів  $t_0, x_0, \dots, x_{0n}, a_1, \dots, a_m$ , які в сукупності є повною групою параметрів, тобто їх задання однозначно визначає деякий розв'язок рівняння (2).

У загальному випадку довільне сімейство параметрів  $\mu_1, \dots, \mu_k$  є повним, якщо задані однозначно співвідношення

$$t_0 = (t_0(\mu_1, \dots, \mu_k)), \quad x_0 = x_0(\mu_1, \dots, \mu_k), \quad a = a(\mu_1, \dots, \mu_k). \quad (4)$$

У цьому випадку задання  $k$  параметрів  $\mu_1, \dots, \mu_k$  однозначно визначає початкові умови і вектор  $a(\mu)$ , тобто однозначно визначає відповідний розв'язок  $x = (t, \mu)$ .

З урахуванням співвідношень (4) початкові умови для рівняння (2) можуть бути подані у вигляді

$$t_0 = t_0(\mu), \quad x_0 = x_0(\mu). \quad (5)$$

У випадку, коли є тільки один скалярний параметр  $\mu = a$ , параметр  $a$  визначає повну групу і, отже, визначає однопараметричне сімейство розв'язків, якщо початкові умови однозначно залежать від  $a$

$$t_0 = t_0(a), \quad x_0 = x_0(a). \quad (6)$$

Якщо функції (6) неперервно диференційовані по  $a$ , то розв'язок рівняння (2) задовольняє умови

$$x(t_0(a), a) = x_0(a) \quad (7)$$

неперервно диференційований по  $a$  на довільному замкнутому інтервалі  $[0, t]$ , при якому розв'язок  $x[t, a]$  належить області, в якій права частина рівняння (2) неперервно диференційована по  $x, a$ . При цьому функція чутливості

$$s(t, a) = \frac{\partial x(t, a)}{\partial a} \quad (8)$$

задовольняє рівняння

$$\frac{ds}{dt} = \frac{\partial g}{\partial x} \Big|_{x=x(t,a)} \cdot s + \frac{\partial g}{\partial a} \Big|_{x=x(t,a)} \quad (9)$$

і початкові умови

$$s(t_0) = \frac{dx_0}{da} - X \frac{dt_0}{da} = \frac{dx_0}{da} - g(x_0(a), t_0(a), a) \frac{dt_0}{da} \quad (10)$$

В (9) похідна  $\partial g/\partial x$  вектора  $g$  по вектору  $x$  є квадратна матриця (якобіан)

$$\frac{\partial g}{\partial x} = \left\| \left\| \frac{\partial g_i}{\partial x_k} \right\| \right\|, \quad i, k = \overline{1, n} \quad (11)$$

З (10) випливає, що для випадку не залежних від параметрів постійних початкових умов (6)  $t_0 = \text{const}$ ,  $x_0 = \text{const}$ , функція чутливості (8) задовольняє нульові початкові умови.

Якщо рівняння (2) в загальному вигляді залежить від векторного параметра  $a$ , то природньо розглядати всеможливі змішані функції чутливості  $n$ -го порядку

$$s^{(1, \dots, 1_n)}(t, a) = \frac{\partial^2 x(t, a)}{\partial a^{1_1} \dots \partial a^{1_n}}, \quad 1_1 + 1_2 + \dots + 1_n = n \quad (12)$$

Достатні умови існування неперервних функцій чутливості (12) для сімейства розв'язків (3) рівняння (2) з заданими початковими умовами

$$t_0 = t_0(a), \quad x_0 = x_0(a) \quad (13)$$

можуть бути сформульовані таким чином. Нехай задане вихідне рівняння (2) і початкові умови (13) і потрібно встановити достатні умови існування функції чутливості (12). Для цього продиференціюємо послідовно рівняння (2) по параметрах відповідне число разів (допускається, що це можливо). В результаті одержимо рівняння, яке має вигляд

$$\frac{ds^{(1, \dots, l_m)}}{dt} = R(s^{(1, \dots, l_m)}, s, x, t, a) \quad (I4)$$

і воно лінійне відносно кожної функції чутливості  $s^{(1, \dots, l_m)}$ . Крім того, формально застосовуючи послідовно співвідношення (I0), одержимо співвідношення, що має вигляд

$$s^{(1, \dots, l_m)}(t_0) = g(y_0, t_0, a). \quad (I5)$$

Якщо при цьому праві частини (I4) і (I5) виявляються неперервними по сукупності всіх змінних, то відповідна функція чутливості існує і не залежить від порядку диференціювання по різних параметрах. При цьому рівняння (I4), буде шуканим рівнянням чутливості, а співвідношення (I5) визначає необхідні початкові умови.

Задача дослідження математичної моделі АД зводиться до виведення рівнянь чутливості з подальшим числовим експериментом.

Для кожного із режимів проведено чисельне дослідження правих частин рівнянь чутливості по параметрах: моменту інерції  $J$ , опору ротора  $R_r$ , індуктивності ротора  $L_r$  та взаємної індуктивності  $L_m$ , тобто параметри які неможливо виміряти без внесення в ОБ конструктивних змін.

Представимо математичну модель АД у вигляді:

$$\frac{dX}{dt} = g(x, a, t) \quad (16)$$

де  $X$  - вимірний вектор стану  $X = (x_1; x_2; x_3; x_4; x_5)^T = (i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta})^T$ ,  $g$  - нелінійна гладка вектор-функція відповідної розмірності,  $a$  - постійний вектор невідомих параметрів розмірності  $m$ .  $a = (a_1; a_2; a_3; a_4)^T = (J, R_r, L_r, L_m)^T$ .

Рівняння чутливості для моделі АД мають вигляд :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS_{R_r}}{dt} = \frac{\partial g}{\partial x} \cdot S_{R_r} + \frac{\partial g}{\partial R_r}; \quad \frac{dS_{L_r}}{dt} = \frac{\partial g}{\partial x} \cdot S_{L_r} + \frac{\partial g}{\partial L_r}; \\ \frac{dS_{L_m}}{dt} = \frac{\partial g}{\partial x} \cdot S_{L_m} + \frac{\partial g}{\partial L_m}; \quad \frac{dS_J}{dt} = \frac{\partial g}{\partial x} \cdot S_J + \frac{\partial g}{\partial J} \end{array} \right. \quad (17)$$

Одержані рівняння вектор-функції градієнта правої частини у розгорнутому вигляді по кожному із параметрів.

Наприклад,  $\frac{\partial g}{\partial R_r}$  - вектор-функція градієнта правої частини по параметру  $R_r$  в розгорнутому вигляді має таке зображення :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial g_1}{\partial R_r} = -L_m \cdot x_3 / (L_m^2 - L_r \cdot L_s); \\ \frac{\partial g_2}{\partial R_r} = -L_m \cdot x_4 / (L_m^2 - L_r \cdot L_s); \\ \frac{\partial g_3}{\partial R_r} = L_s \cdot x_3 / (L_m^2 - L_m \cdot L_s); \\ \frac{\partial g_4}{\partial R_r} = L_s \cdot x_4 / (L_m^2 - L_r \cdot L_s); \\ \frac{\partial g_5}{\partial R_r} = 0. \end{array} \right. \quad (18)$$

Розроблено програмне забезпечення та проведений чисельний експеримент, за результатами якого встановлено, що для оцінки моменту інерції найбільш інформативним є режим вибігу АД. Режим ударного навантаження та розбігу є найбільш показниковим для оцінки імпедансу роторного кола та взаємної індуктивності.

В ТРЕТІЙ ГЛАВІ викладені результати розробки математичного забезпечення ІВС характеристик АД, а саме, методів ідентифікації внутрішніх параметрів при неповному спостереженні вектору його стану.

Суть першого методу полягає у вирішенні комплексно-операторного рівняння електромагнітного стану АД відносно поточкозчеплення і оптимізаційного пошуку параметрів моделі, при яких мінімізується нев'язка, сформована з використанням виміральної інформації тахометричного перетворювача, що працює в динамічному режимі. Для вирішення цієї задачі використовувався принцип максимуму Л.С. Понтрягіна. Проте для реалізації такого алгоритму необхідно вводити додаткові ознаки, для визначення точки мінімуму на функції, що належить деякому незкінченновимірному функціональному простору. Введення додаткових ознак (параметрів ОВ, які часом важко вимірювати) обмежує використання запропонованого методу ідентифікації.

Метод ідентифікації, що ґрунтується на використанні функцій чутливості також обмежений у застосуванні, тому що не для всіх ОВ задовольняються умови Розенвассера.

Досліджена також задача ідентифікації, що формується у вигляді задачі фільтрації з додатковим введенням до загальної моделі АД статичних рівнянь для параметрів, що визначаються.

Задача нелінійної фільтрації для систем однорідних диференціальних рівнянь (ОДР) формується так. Для динамічних об'єктів, що моделюються системою ОДР

$$\frac{dx}{dt} = g(x, a), \quad (19)$$

де  $g$  - задана функція,  $a$  - вектор невідомих постійних параметрів, система з розширеним вектором стану  $y = (x, a)$  має вигляд

$$\frac{dy}{dt} = g(y) \quad (20)$$

Фільтрація стану  $y$  системи (20) забезпечує фільтрацію вектора стану  $x = x(x_1, \dots, x_n)$  та ідентифікацію вектора невідомих параметрів  $a = (a_1, \dots, a_m)$  системи (19).

Система неперервного спостереження за станом має вигляд

$$w = \Gamma \cdot y + \eta \quad (21)$$

де  $\eta$  - вектор похибки спостереження;  $\Gamma$  - задана прямокутна матриця;

За результатами спостереження  $w$  на проміжку  $0 \leq t \leq T$  визначається оптимальна оцінка стану  $y(t)$  при  $t = T$  така, що мінімізується функція квадратичної похибки

$$f(y(T), T) = \int_0^T (w - \Gamma y, w - \Gamma y) dt + (y(0) - b, -L(x(0) - b)), \quad (22)$$

де  $b$  - найкраща апріорна оцінка  $y(0)$ ,  $L$  - невідроджена матриця, що характеризує ступінь впевненості в цій оцінці.

Рівняння нелінійної фільтрації для оптимальної за критерієм (22) оцінки  $e$  набуває виду

$$\begin{cases} \frac{de}{dt} = g(e) + Q(t)\Gamma^T(w - \Gamma e), e(0) = b, \\ \frac{dQ}{dt} = g_c(e)Q + Qg_c^T(e) - Q\Gamma^T\Gamma Q, Q(0) = L^{-1}, \end{cases} \quad (23)$$

Н.Дистефано використовував цей алгоритм фільтрації стосовно до задачі ідентифікації невідомих параметрів нелінійної в'язкопружної пружини в умовах динаміки. При цьому рівняння моделі (20) характеризувалось слабкою нелінійністю, структурною спостережливостю частини,

частинною спостережністю стану та нежорсткістю рівнянь моделі, що забезпечувало задовільну збіжність алгоритму фільтрації. Дослідження збіжності алгоритму проводилося для моделі.

В нашому випадку вперше дослідження алгоритму нелінійної фільтрації (23) проводилися стосовно задачі ідентифікації більш складної системи - моделі АД, що вписана відносно струмів

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = A \cdot i + B \cdot u \\ \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} + M_c = pM_\vartheta; M_\vartheta = \frac{m}{2} L_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}), \end{cases} \quad (24)$$

$$\text{де } A = \frac{1}{L_m^2 - L_r L_s} \begin{bmatrix} L_r R_s & -L_m^2 \omega_r & -L_m R_r & -L_m \omega_r L_r \\ L_m^2 \omega_r & L_r R_s & L_m \omega_r L_r & -L_m R_r \\ -L_m R_s & L_m \omega_r L_s & L_s R_r & L_r L_s \omega_r \\ -L_m \omega_r L_s & -L_m R_s & -L_r L_s \omega_r & L_s R_r \end{bmatrix},$$

$$B = \frac{1}{L_m^2 - L_r L_s} \begin{bmatrix} -L_s u_{s\alpha} & -L_r u_{s\beta} & L_m u_{s\beta} & L_m u_{s\beta} \end{bmatrix}^T.$$

$u$  - напруга;  $i$  - струм;  $L, r$  - індуктивність та опір обмоток відповідно;  $\omega_r$  - кутова швидкість ротора;  $J$  - момент інерції на валу;  $M_c$  - момент опору;  $p$  - число пар полюсів;  $m$  - число фаз. Індокси  $r, s$  відносяться до ротора і статора відповідно.  $\alpha, \beta$  - обмотки  $\alpha$  і  $\beta$  узагальненої електричної машини.

Матриця спостереження  $\Gamma$  має вигляд :

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 0 & 0 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Обмежуючи задачу, що розглядається АД з коротко-

замкненим ротором приймаємо  $u_{r\alpha} = u_{r\beta} = 0$ ;  $u_{s\alpha} = 220\sqrt{2}\cos(314t)$ ;  $u_{s\beta} = 220\sqrt{2}\sin(314t)$ . Система рівнянь (24,25) перетворюється до виду

$$\begin{cases} \mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6] = [i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}, \omega_r, J] \\ \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, u_{s\alpha}, u_{s\beta}), \mathbf{x} \in \mathbb{R}^6, \mathbf{g}: \mathbb{R}^6 \times \mathbb{R}^6 \rightarrow \mathbb{R}^6, \end{cases} \quad (27)$$

де  $\mathbf{g}$  - наступна вектор-функція :

$$g_1 = (R_S L_r x_1 - L_m^2 x_5 x_2 - L_m R_r x_3 - L_m L_r x_5 x_4 - L_r u_{s\alpha}) / (L_m^2 - L_r L_S);$$

$$g_2 = (L_m^2 x_5 x_1 + L_r R_r x_2 + L_m L_r x_5 x_3 - L_m R_r x_4 - L_r u_{s\beta}) / (L_m^2 - L_r L_S);$$

$$g_3 = (-R_S L_m x_1 + L_S L_m x_5 x_2 + L_S R_r x_3 + L_S L_r x_4 x_5 + L_m u_{s\alpha}) / (L_m^2 - L_r L_S);$$

$$g_4 = (-L_S L_r x_5 x_1 - L_m x_2 R_S - L_S L_r x_5 x_3 + L_S R_r x_4 + L_m u_{s\beta}) / (L_m^2 - L_r L_S);$$

$$g_5 = p^2 m L_m (x_2 x_3 - x_1 x_4) / (2x_6) - p M_c / x_6;$$

$$g_6 = 0.$$

Найбільш цікавим з точки зору складності виконання прямих вимірювань є задача ідентифікації параметрів роторного кола  $L_r$ ,  $R_r$ , моменту інерції  $J$  та взаємної індуктивності  $L_m$ . Для цього вектор стану початкової моделі  $\mathbf{x} = [i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}, \omega_r, a]$ , де  $a$  - один із параметрів  $L_r$ ,  $R_r$ ,  $L_m$ ,  $J$ .

Фільтрація розширеного вектору стану  $\mathbf{y}$  не завжди є ефективною, так як рівняння моделі (27) є жорстким і суттєво нелінійним з поганою структурною спостереженістю правої частини, а матриця спостереження (26) має неповний ранг розмірності 3. Жорсткість обумовлена наявністю швидких електричних (рівняння (24) для струмів) та повільного механічного (рівняння (25) для кутової швидкості) рухів.

По відношенню до рівняння (23) для параметрів ротора  $L_r$ ,  $R_r$  можна стверджувати, що жорсткість системи ще підсилю-

ється, так як матриця Якобі містить в знаменнику деяких елементів многочлени  $(X_0^2 - L_r L_s)^2$ ,  $(L_m^2 - X_0 L_s)^2$ , що може складати малі величини більш високого порядку у порівнянні із знаменником  $(L_m^2 - L_r L_s)$  матриці А для електричних складових.

В роботі розроблено програмне забезпечення для моделювання роботи фільтру. За результатами числового експерименту розроблені рекомендації по застосуванню нелінійного фільтру Н. Дистефано для ідентифікації параметрів ЕМРЕ.

В четвертій главі розв'язується задача аналізу та синтезу структури частотного вимірювального каналу ІВС - каналу вимірювання кутової швидкості ротора АД.

Розроблена його метрологічна модель рис.І, яка дала змогу проаналізувати всі складові похибок, що виникають в колі послідовності перетворення ОВ - числовий вимірювальний перетворювач. До основних складових результуючої похибки відносяться: інструментальні похибки тахометричного перетворювача (ТП), похибки аналого-числового та числового перетворювачів. Додаткові похибки обумовлюються неідеальністю роботи АД, причиною яких є збурення в мережі живлення. Ці похибки детально проаналізовані в попередніх роботах автора як і похибки ТП. Похибки ж, що вносяться числовим вимірювальним перетворювачем визначаються розрядною сіткою і значно менше усіх інших. Тому детально розглядаються похибки аналого-цифрового перетворення та похибки, що вносить муфта спряження.

Основною похибкою АЦП є похибка квантування. Квантування сигналу в АЦП послідовної лічби здійснюється при перетворенні частоти  $f$  чи часового інтервалу  $T$  в цифровий

еквівалент  $N$ , залежність якого від останніх визначається співвідношенням

$$N = T \cdot f - \delta_1 + \delta_2 \quad (28)$$

де  $\delta_1 = \Delta t_1 f$ ,  $\delta_2 = \Delta t_2 f$ ,  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  - відповідно часові інтервали між переднім та заднім фронтами "воріт" та найближчим із попередніх імпульсів послідовності. Сумарна статична похибка квантування визначається

$$\Delta = \delta_2 - \delta_1 = T f - \text{Ent}[T \cdot f + \delta_1] \quad (29)$$

Закон розподілу величини  $\Delta$  має вигляд

$$p(\Delta) = \begin{cases} \sum_{k=1}^{\infty} P_{Tf}(k+\Delta)(1-\Delta), & 0 \leq \Delta < 1 \\ \sum_{k=1}^{\infty} P_{Tf}(k+\Delta)(1+\Delta), & -1 \leq \Delta < 0, \end{cases} \quad (30)$$

де  $k$  - номер інтервалу квантування.

Із (30) випливає, що щільність розподілу ймовірностей похибки перетворення в загальному випадку залежить від закону розподілу параметру, що вимірюється. Для визначення загальних властивостей щільності розподілу ймовірностей похибки використовувався апарат характеристичних функцій.

Одержано рівняння характеристичної функції похибки

$$\tilde{P}_{\Delta}(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} P_{Tf}(2\pi k) \left[ \sin \frac{\omega - 2\pi k}{2} / \frac{(\omega - 2\pi k)}{2} \right]^2 \quad (31)$$

Вираз (31) співпадає з характеристичною функцією закону Сімпсона при умові  $\tilde{P}_{Tf}(2\pi k) = 0$  при  $k \neq 0$ . Ця умова задовільняє розподіл  $Tf$  з рівномірною щільністю ймовірності при цілому  $(Tf)_{\max}$  і розподіл  $Tf$ , одержаний як сума декількох випадкових величин, одна з яких має рівномірний закон розподілу при цілому  $Tf$ . Якщо середньоквадратичне

відхилення  $Tf$  багато більше одиниці, то закон розподілу похибки квантування наближається до закону Сімпсона. Другий початковий момент похибки перетворення має вигляд :

$$M(\Delta^2) = \frac{1}{3} - \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{k=+\infty} P_{Tf}(2\pi k) \frac{\sqrt{4\pi^2 k^2 + 1}}{4\pi^2 k^2} \quad (32)$$

В динамічному режимі роботи похибка квантування є випадковою функцією.

Так як залежність  $\Delta$  від  $x \in Tf$  є функція періодична, то вона представлена у вигляді ряду Фур'є

$$\Delta = \frac{q}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k} \sin\left(\frac{2\pi k}{q} x\right) \quad (33)$$

Похибка, що вносить муфта спряження за рахунок ексцентриситету є систематична періодична похибка, величина її пропорційна ексцентриситету  $E$ , абсолютне значення якої

$$\bar{\Delta} = -(E \cdot \cos \frac{2\pi i}{z}) \cdot \gamma, \quad i=1, 2, \dots, z, \quad (34)$$

де  $z$  - стала тахометричного перетворювача,  $\gamma$  - коефіцієнт пропорційності, який визначає співвідношення між значеннями ексцентриситету і вихідного сигналу.

Випадкова складова похибки вимірювання

$$\Delta_{\omega} = \sqrt{\frac{\omega^6 z^4 + 6\Delta\alpha_0^2 z^4 f_0^2 \omega^4 + 24\pi^4 \epsilon_{\max}^2 f_0^2}{2\sqrt{6}\pi f_0 \omega^2 z}} \quad (35)$$

де  $\Delta\alpha_0$  - результуюча середньоквадратична похибка модулятора ТП;  $f_0$  - частота опорного генератора;  $\epsilon_{\max}$  - максимальне кутове прискорення вала;  $\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{6}}$ ;  $\sigma_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}$  - середньоквадратичний відхил відповідно для трикутного і рівномірного

законів розподілу.

Функція (35) має екстремум по аргументу  $Z$  і оптимальне число штрихів модулятора ТП, при якому мінімальна результуюча похибка визначається :

$$Z_{\text{опт}} = \frac{\pi \sqrt{6} \sqrt{2 f_0 \epsilon_{\text{max}}}}{\omega^4 \sqrt{\omega^2 + 6 \Delta \alpha_0^2 f_0^2}} \quad (36)$$

Із аналізу (36) випливає, що на кожній робочій швидкості для одержання  $\Delta \omega_{\text{min}}$  необхідно встановлювати певне число штрихів модулятора, тобто змінювати його. Крім того при зміні ОВ буде змінюватись прискорення валу  $\epsilon_{\text{max}}$ , що також необхідно враховувати при нормуванні результуючої похибки. Ці висновки покладені в основу синтезу структур та алгоритмів вимірювання кутової швидкості (табл. I). Алгоритм табл. I.2 поєднує два класичних алгоритма вимірювання кутової швидкості, причому значення критичної кутової швидкості  $\omega_k$ , на які здійснюється перехід від одного методу вимірювання до іншого, залежить від динамічних властивостей ОВ, інформацію про які несе перший період  $T$ , інформативного сигналу ТП.

Застосування структури табл. I.4 та наведеного алгоритму дають змогу вимірювати кутову швидкість інваріантно до нестабільності напруги та частоти джерела живлення ОВ.

Алгоритм табл. I.3 реалізує зміну  $Z$  сталої ТП в динамічному режимі роботи з метою обмеження результуючої похибки вимірювання кутової швидкості.

Для реалізації такого алгоритму необхідне квантування інформативного сигналу ТП з програмною зміною кроку квантування. Це, в свою чергу, дає змогу одержувати інформацію

Таблица 1

Принципи побудови тахометрів

Структурна схема	Алгоритм	Рівняння генерування
<p>1</p> <p>ЦТСЗ</p> <p>ЦТМЗ</p> <p>RC N-12K2395</p> <p><math>N_{\omega} = \frac{4k}{\omega_r} \cdot \frac{60}{\omega_r} \cdot 2</math></p>	<p>2</p> <p>Початок</p> <p>ЦТМЗ</p> <p><math>\omega_r &lt; \omega_n</math></p> <p>ЦТСЗ</p> <p><math>\omega_r = \omega_n</math></p> <p>Кінець</p>	$\omega_{cr} = \sqrt{\frac{g}{J}} \sqrt{\left(\frac{4}{T_1}\right)^2 T_1^2 - 2}$ $\alpha = \frac{(2 - \sqrt{2})^2}{2}$ $\beta = \frac{2\pi f_0}{\sqrt{6} Z^2 f_0}$
<p>3</p> <p>ЦТМЗ</p> <p>ЦТМЗ</p> <p>RC N-830746    RC N-1615617</p> <p>RC N-1151880    RC N-1345121</p> <p>RC N-1352371</p>	<p>Початок</p> <p>ЦТМЗ з пам'яттю</p> <p>Визначення періоду</p> <p>Визначення <math>\alpha = N_{н.р.}/N_{н}</math></p> <p><math>N_{н} &gt; N_{н.р.}</math></p> <p><math>\alpha = 1 - \epsilon_1 / Z^2</math></p> <p><math>Z_1 &gt; 1 + 2\alpha\epsilon_1</math></p> <p><math>Z_1 &gt; 1 + 2\alpha\epsilon_1</math></p> <p>Індикація помилки</p> <p>Кінець</p> <p><math>Z_1 &gt; 1 + 2\alpha\epsilon_1</math></p> <p><math>Z_1 &gt; 1 + 2\alpha\epsilon_1</math></p>	$Z_{1+1} = Z_1 / \alpha^2$ $\alpha = N_{н.р.}/N_{н}$
<p>4</p> <p>ЦТМЗ</p> <p>ЦТМЗ</p> <p>ЦТМЗ</p> <p>ЦТМЗ</p> <p>RC N-684445    RC N-1345121</p> <p>RC N-830743    RC N-1364932</p>	<p>Початок</p> <p>ЦТМЗ = n</p> <p><math>N_{н} = 0</math></p> <p><math>N_{н} = n</math></p> <p><math>N_{н} = 0</math></p> <p><math>N_{н} = n</math></p> <p>ЦТМЗ = n-1</p> <p><math>n = 0</math></p> <p>Кінець</p>	$\omega_{D1} = \omega_{\phi} + \Delta\omega_{\phi} + \Delta\omega_{\phi}$ $\omega_{D2} = \omega_{\phi} - \Delta\omega_{\phi} - \Delta\omega_{\phi}$ $\omega_{D3} = \omega_{\phi} + \Delta\omega_{\phi} - \Delta\omega_{\phi}$ $\omega_{D4} = \omega_{\phi} - \Delta\omega_{\phi} + \Delta\omega_{\phi}$

про зміну фази сигналу за один період і застосувати вагові методи підвищення точності вимірювання частоти. Числовий еквівалент, що відповідає значенням кутової швидкості у цьому випадку визначається співвідношенням

$$N_{\omega} = \frac{T_x \cdot f_0}{k} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} a_i \quad (37)$$

де  $a$  - вагові коефіцієнти,  $k$  - число ділянок вагової функції.

Застосування вагових методів підвищує точність вимірювання у  $v$  раз, де

$$v = \sqrt{\frac{(k+1) \cdot (k+2)}{\sigma \cdot k}}$$

За результатами аналізу похибок і з урахуванням розроблених алгоритмів синтезована структурна схема вимірювального каналу кутової швидкості. Використання числового вимірювального перетворювача дало змогу опосередковано виміряти механічну характеристику динамічного режиму  $M_d = f(\omega_r)$ .

У п'ятій главі наводяться результати аналізу складових частин вимірювального каналу пускового моменту. Його метрологічних характеристик і запропоновано новий спосіб вимірювання пускової характеристики ОБ.

Вимірювання пускового моменту є складною і теоретично маловивченою проблемою. Тому перш ніж вибрати метод вимірювання та розглянути основи побудови структурної схеми засобу вимірювання пускового моменту  $M_n$ , здійснено теоретичні та експериментальні дослідження вимірювального перетворювача.

Вхідною величиною, що діє на вимірювальний перетворювач пускового моменту (ВППМ) є момент ОВ, математична модель якого має вигляд

$$M_{п\text{ ов}} = \bar{M} + A \cdot \sin k_1 \alpha - B \cdot \cos k_2 \alpha, \quad (38)$$

де  $\bar{M}$  - постійна складова моменту ОВ;  $A, B, k_1, k_2$  - коефіцієнти, що залежать від конструкції ОВ;  $\alpha$  - кут повороту ротора відносно статора.

Вихідною величиною ВППМ є момент  $M_{п}$ , що виникає на корпусі ПД. Момент  $M_{п}$  на виході вимірювального перетворювача визначається з його математичної моделі, що наведена системою рівнянь

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\psi_{\alpha}^n}{dt} &= U_n \cos \omega t - \frac{R^n \cdot L^r}{L^n L^r - M} \cdot \psi_{\alpha}^n + \frac{R^n \cdot M}{L^n L^r - M^2} \cdot \psi_{\alpha}^r \\ \frac{d\psi_{\beta}^n}{dt} &= U_n \sin \omega t - \frac{R^n \cdot L^r}{L^n L^r - M^2} \cdot \psi_{\beta}^n + \frac{R^n \cdot M}{L^n L^r - M} \cdot \psi_{\beta}^r \\ \frac{d\psi_{\alpha}^r}{dt} &= - \frac{R^r \cdot L^n}{L^n L^r - M} \cdot \psi_{\alpha}^r + \frac{R^n \cdot M}{L^n L^r - M^2} \cdot \psi_{\alpha}^n - \omega_p \psi_{\beta}^r P \\ \frac{d\psi_{\beta}^r}{dt} &= - \frac{R^r \cdot L^n}{L^n L^r - M} \cdot \psi_{\beta}^r + \frac{R^n \cdot M}{L^n L^r - M} \cdot \psi_{\beta}^n - \omega_p \psi_{\alpha}^r P \\ M_{эм} &= \frac{m \cdot P}{2} \cdot \frac{M}{L^n L^r - M} \cdot (\psi_{\beta}^n \cdot \psi_{\alpha}^r - \psi_{\alpha}^n \cdot \psi_{\beta}^r) \\ \frac{d\omega_{пл}}{dt} &= \frac{P}{J} \cdot (M_{пл} - M_p^*) \\ M_{пл} &= M_{эм} - M_{пл}^n \\ M_p^* &= \frac{M_p}{I \cdot \eta} = \frac{M_{п\text{ ов}} + M_{ов}^n + M_{вп}^n + M_{эм}^n + M_{пл}^n}{I \cdot \eta} \\ J &= J_{пл} + \frac{J_{ов}}{I^2} + \frac{J_{эм}}{I^2} \\ M_{п} &= M_{пл} + M_{п\text{ ов}} + \Delta M_c \end{aligned} \right. \quad (39)$$

де  $M_{эм}$  - електромагнітний момент АД, який виражено через потокозчеплення  $\Psi$ ;  $M_{пл}$  - обертовий момент приводного двигуна;  $M_p$  - обертовий момент на виході редуктора;  $J$  - зведений момент інерції ротора ОБ  $J_{об}$  та муфти спряження  $J_{эм}$ ;  $J_{пл}$  - момент інерції приводного двигуна;  $M_p^*$  - обертовий момент на виході хвильового редуктора, зведений до приводного двигуна;  $\omega_{пл}$  - частота обертання вихідного валу редуктора приводного двигуна;  $\omega_p$  - частота обертання ротора асинхронного привода;  $i$  - передаточне число редуктора;  $\eta$  - коефіцієнт корисної дії редуктора;  $\Delta M_c = M_{об}^п + M_{вп}^п + M_{эм}^п + M_{пл}^п$  - момент опору, що викликають дисипативні моменти ОБ, вимірювального перетворювача, муфти спряження та приводного двигуна.

Рішення систем рівнянь (39) для різних об'єктів вимірювання наведені на Рис.2. Аналіз одержаних результатів показує, що математична модель вимірювального перетворювача пускового моменту з високою точністю відтворює фізичні процеси розглянутого засобу вимірювання. Похибка моделі не перевищує 2,5%. Встановлено, що перехідний процес у ВППМ суттєво впливає на величину інформативного параметра  $M_n$ . В зв'язку з цим визначено час  $t_y$  перехідного процесу перетворювача і одержано рівняння перетворення в статичному режимі роботи

$$M_n = M_{эм} + M_{п об} \cdot (1 + 1 / i\eta) + \Delta M_c \quad (40)$$

Визначені числові значення  $t_y$ , які для АД малої та середньої потужності складають (0,2-0,4)сек. Запропоновано час  $t_y$  вилучати із загального часу вимірювання пускового моменту.

Оцінено вплив методичної похибки на результати вимірювання  $M_{п}$ , що виникає за рахунок відхилення ковзання приводного двигуна від номінального значення ( $s_{н}=1$ ). В залежності від видів випробовувань ОВ виділено дві зони роботи приводного двигуна : приймальні  $0.986 \leq s \leq 1$ ; прийнятно-здавальні  $0.972 \leq s \leq 1$ . Встановлено, що відносна методична похибка під час роботи приводного двигуна в зоні  $0.986 \leq s \leq 1$  не перевищує 0.5% і суттєво не впливає на значення пускового моменту ОВ.

В усталеному режимі роботи вимірювальний перетворювач пускового моменту описується рівнянням (3). Процес знаходження  $M_{п}$  ОВ полягає у вимірюванні залежності  $M_{п}=f(\alpha)$  за один повний оберт його ротора з наступним визначенням екстремуму ( $M_{п \text{ min}}$ ). В зв'язку з цим визначено момент часу (кутове положення), в якому значення пускового моменту буде мінімальним

$$M_{п \text{ min}} = \frac{G \cdot U_{cн}^2}{f_{cн}} - \sqrt{A^2 + B^2} , \quad (4I)$$

де  $G$  - конструктивні параметри ОВ в режимі короткого замикання;  $A, B$  - параметри математичної моделі (38) пускового моменту.

Аналіз (4I) показує, що для допустимих (ДЕСТ І6264.0-85) відхилень напруги  $U_{cн}$  і частоти  $f_{cн}$  промислової мережі живлення ОВ відносна похибка вимірювання пускового моменту складає (1.1-2.1)%. Для нормування випадкової похибки запропоновано змінювати частоту дискретизації з урахуванням зміни частоти обертання ротора приводного двигуна, що викликані відхиленнями  $U_{cн}$  і  $f_{cн}$  від номінальних значень.

Дослідження метрологічних характеристик вимірювального перетворювача пускового моменту дозволили зробити наступний висновок. На вимірюванні значення  $M_{\Pi}$  суттєво впливають наступні фактори: перехідний процес у вимірювальному перетворювачі; випадковий характер моменту опору  $\Delta M_c$ ; відхилення параметрів  $U_{cн}$  і  $f_{cн}$  від номінальних. Тому запропоновано новий спосіб вимірювання пускового моменту ЕМПЕ. Фізична суть способу полягає у тому, що ротор ОБ обертають з раніше визначеною швидкістю  $\omega_{пд}$  за допомогою приводного двигуна і одночасно вимірюють кутове положення та обертовий момент. На протязі першого оберту ОБ обезструмлений, а на протязі другого оберту живиться від стабілізованої електричної мережі змінного струму.

Значення пускового моменту  $M_{\Pi}$  в заданому кутовому положенні ротора визначають як різницю

$$M_{\Pi} = M_k - \Delta M_c \quad (42)$$

де  $M_k$  - обертаючий момент на роторі об'єкта вимірювання;  $\Delta M_c$  - момент опору вимірювального перетворювача.

Для зменшення похибки від випадкового характеру моменту опору, в межах кожного кутового положення ротора, здійснюється  $k$  вимірювань  $\Delta M_c$  і визначається середнє значення в кожному заданому кутовому положенні

$$\Delta M_{c1} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k \Delta M_{ci} \quad (43)$$

В шостій главі описані основні компоненти ІВС характеристик АД - засоби вимірювання механічної та пускової характеристик, а також приводиться узагальнена функціональна схема системи (рис.3).

Оскільки інформативні параметри, що визначають якість АД це переважно неелектричні величини, то в дисертаційній роботі розроблене метрологічне забезпечення вимірювальних каналів ІВС, яке включає як методики метрологічної атестації та перевірки, так і засоби вимірювання, стенди, що використовувались для її проведення.

Для атестації каналу кутової швидкості розроблено оригінальну схему програмно керованого генератора імпульсної послідовності, сигнал на виході якого імітує вихідний сигнал ТП. Програмно змінюється як частота імпульсів, так і швидкість її зміни. Крім методу зразкових сигналів у роботі використовувався метод зразкових мір. Започатковано новий спосіб та засіб його реалізації таріровки ЗВ момента інерції. Діапазон зміни зразкових мас, моменти інерції яких відомі  $-(5-60) \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot 10^{-4}$

Запропоновано новий спосіб метрологічної атестації засобу вимірювання пускового момента ЕМПЕ.

За розробленими методиками метрологічної атестації та з використанням технічних засобів для її здійснення у Вінницькому центрі метрології та стандартизації було проведено метрологічну атестацію вимірювальних каналів.

В роботі представлені результати метрологічних досліджень та відповідні свідоцтва.

### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

В дисертаційній роботі на підставі виконаних автором досліджень розв'язано значну науково-технічну проблему, що має важливе народногосподарське значення і полягає у вирі-

шенні задач інтелектуалізації вимірювань характеристик електромеханічних перетворювачів енергії.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному.

1. Розроблена нова концепція інтелектуалізації вимірювань характеристик асинхронних двигунів, як найбільш розповсюдженого різновиду ЕМПЕ, в основу якої покладено використання принципів єдності, цілеспрямованості, моделювання та розвитку.

Практична цінність результату полягає у тому, що він є основою для аналізу взаємодії підсистем ІВС з метою визначення всіх складових результуючої похибки, розробки вимог до складових вимірювальної підсистеми ІВС, а також синтезу їх структур.

2. Для об'єкту вимірювання виведені рівняння чутливості, що дало змогу при розробленій програмній підтримці визначити найбільш інформативні параметри, які вимірюватимуться. До таких параметрів відносяться добротність обмоток статора, струми в обмотках статора, кутова швидкість ротора, а також пусковий момент. Вперше методом чисельного експерименту визначені репрезентативні ділянки механічної характеристики  $\omega_r = f(t)$  з точки зору можливості ідентифікації параметрів роторного кола та моменту інерції. Для оцінки моменту інерції найбільш інформативним є режим вибігу АД, а режими ударного навантаження та розгону є найбільш показниковими для оцінки імпедансу роторного кола і взаємної індуктивності.

Практична цінність результатів полягає у тому, що вони є методологічною основою для розробки математичного забезпечення ІВС ХАД - методів ідентифікації, а також обґрунтовують необхідність вимірювання механічної характеристики у динамічному режимі роботи АД.

3. Розроблені та досліджені методи ідентифікації внутрішніх параметрів АД, проведено їх порівняльний аналіз і встановлено, що найбільш ефективним в плані його реалізації є нелінійний фільтр Н. Дистефано. Детальне дослідження останнього методом обчислювального експерименту дає змогу дійти висновку, що процеси ударного навантаження та розгону АД однаково репрезентативні з точки зору ідентифікації опору ротора  $R_r$ . Слід відмітити, що в цих випадках спостерігається повільна збіжність алгоритму фільтрації, в результаті чого рекомендується послідовно-ітеративний алгоритм фільтрації. Початкові умови для наступної ітерації відповідають фінальним значенням оцінок попередньої ітерації. Проведені експерименти дозволяють рекомендувати кількість ітерацій не меншу чотирьох-п'яти.

Новизна методу ідентифікації полягає у тому, що вперше алгоритм Н. Дистефано використовується для оцінки параметрів технічних систем, які описуються системою нелінійних жорстких рівнянь.

Практична цінність полягає у можливості застосування алгоритму для визначення параметрів АД, які неможливо безпосередньо виміряти. У порівнянні з існуючими методами алгоритм Н. Дистефано дає змогу підвищити точність визначення параметрів АД при неповному векторі спостережень.

4. Дослідження ОВ-АД та визначення його інформативних параметрів створили передумову для побудови структурної схеми ІВС ХАД, основними вимірювальними каналами якої є канал вимірювання кутової швидкості та канал вимірювання пускового моменту. Розроблено комплекс засобів вимірювання, які працюють у складі ІВС ХАД. Розроблені елементи теорії цифрової тахометрії на основі побудови метрологічної моделі вимірювального каналу кутової швидкості ІВС ХАД. В основу побудови моделі покладені послідовність вимірювальних перетворювачів та структура з'єднань вимірювальних перетворювачів з елементами їх спряження. Проведений аналіз основних складових похибок, що виникають у вимірювальному каналі.

5. Установлено, що при цифровому вимірюванні кутової швидкості на основі перетворення частоти і часового інтервалу сигналу ТП у цифровий еквівалент метрологічний аналіз слід проводити відносно змінної  $\chi T_f$ . Ця змінна має рівномірну щільність розподілу ймовірності при цілому  $(T_f)_{\max}$  і розподіл  $T_f$  одержаний як сума декількох випадкових величин, одна із яких має рівномірний закон розподілу при цілому  $T_f$ . Якщо середнє квадратичне відхилення  $T_f$  набагато більше за одиницю, то закон розподілу похибки квантування наближається до закону Сімпсона. Також встановлено, що похибка квантування некорельована із вхідною вимірюваною величиною.

Одержано рівняння похибки цифрових засобів вимірювання кутової швидкості, аналіз якого показав, що функція похибки має екстремум по аргументу  $Z$  (сталой ТП) і оптимальне число  $Z$  необхідно змінювати з метою нормування похибки.

6. За результатами аналізу похибок цифрових засобів вимірювання кутової швидкості синтезовано ряд структур і адаптивних алгоритмів їх функціонування з урахуванням динамічних властивостей ОВ. З метою підвищення точності вимірювання при збереженні швидкодії запропоновано використовувати метод вагових коефіцієнтів з формуванням оптимальних ступеневих вікон, що у порівнянні з використанням вікна Діріхле (П-подібна ВФ) дало змогу зменшити середньоквадратичну похибку квантування в  $K/6$  разів. Для одержання додаткової інформації про зміну фази інформативного сигналу сенсора кутової швидкості на протязі одного періоду розроблено метод підвищення розрізняльної здатності вихідного сигналу сенсора, що водночас призводить до зменшення динамічної похибки вимірювання.

7. Розроблено алгоритм визначення моменту інерції ротора ОВ на основі використання інформації про зміну кутової швидкості в режимі його самогальмування. Використання інформації про зміну кутової швидкості в режимі розбігу АД та знання моменту інерції його ротора дало змогу з використанням числового вимірювального перетворювача здійснити вимірювання механічної характеристики динамічного режиму. Синтезована структура частотного вимірювального каналу ІВС ХАД та розроблена його програмна підтримка.

8. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень ОВ, що є складовою частиною вимірювального перетворювача пускового моменту  $M_{\Pi}$  уточнена математична модель пускової характеристики  $M_{\Pi} = f(\alpha)$ . Проведено аналіз та одержані аналітичні залежності, що однозначно визначають

зв'язок вхідної та вихідної величин вимірювального перетворювача пускового моменту. Проведено метрологічний аналіз та одержані аналітичні залежності оцінки основних складових похибок вимірювального перетворювача пускового моменту. Установлено, що на вимірювальне перетворення пускового моменту в електричний сигнал суттєво впливає нестабільність джерела живлення як ОВ, так і ПД, при цьому похибки вимірювального перетворення можуть перевершувати десятки відсотків. Обгрунтовано вплив дисипативних сил на результати вимірювального перетворення пускового моменту в електричний сигнал і за результатами експериментальних досліджень вимірювального перетворювача започатковано новий спосіб вимірювання пускового моменту.

9. Розроблено метрологічне забезпечення ІВС ХАД, основою якого є нові способи таріровки ЗВ механічних характеристик АД; практична їх реалізація та методики метрологічної атестації.

10. Метрологічно атестовані засоби вимірювання та ІВС в цілому впроваджені на ряді провідних підприємств України, що дало змогу автоматизувати процес випробування ЕМПЕ та підвищити його вірогідність.

Результати роботи використовуються також у навчальному процесі Вінницького державного технічного університету.

Основні положення дисертації опубліковані у таких роботах :

І. Поджаренко В.А. Системное проектирование тахометров - В сб. Избыточные точные системы счисления, моделирование,

обработка данных и системное проектирование в техн. преобразование информ.: К. Вища школа, 1990 с.5-61. (Новое в науке и технике - студентам и учащимся ; Вып. 18).

2. Поджаренко В.А. Оптимизация алгоритма контроля характеристик электродвигателей - В сб проблемы комплексной автоматизации /труды четвертой международной НТК К., 1990 с.75-80

3. Поджаренко В.А. Измерение момента сопротивления на валу электродвигателя // В сб. "Материалы внедрения НИР в практику" // Винницкий региональный межвузовский центр: Винница, 1979 с. 6-8.

4. Поджаренко В.А. Измерение угловой скорости в переходном режиме // В сб. "Информационные и модулирующие системы в электронике и электроэнергетике, К.:Наукова думка, 1980, с.85-90

5. Поджаренко В.А. Об идентификации электромеханического преобразователя при неполном векторе наблюдений состояния. // В сб. "Адаптивные системы автоматического управления " 1991, №19. -с.37-43.

6. Podzharenko V. ABOUT ELECTRICAL-TO-MECHANICAL ENERGY CONVERTERS IDENTIFICATION // INTERNATIONAL CONFERENCE Organized by AMSE, Assosiation for the Advancement of Modelling and Simulation techniques in Enterprises. (Fran) LVIN. 1993, p98-99.

7. Маликов В.Т., Поджаренко В.А., Мельничук П.Л., Кухарчук В.В. Микропроцессорный регистратор быстропротекающих процессов // В сб. Микропроцессорные системы, Каунас-Вильнюс, 1985, с.104-110.

8.Маликов В.Т., Поджаренко В.А. Микропроцессорная система контроля характеристик электродвигателей / В сб. докладов III польско-советской НТК "Комплексная автоматизация промышленности" /часть III/ Вроцлав, 1988 с.399-403.

9.Поджаренко В.А., Кухарчук В.В., Дидык А.Н Автоматизированная метрологическая аттестация компьютерно-измерительной системы // В сб. Автоматизация средств метрол. обеспечения народного хозяйства /материалы ВНТК/ Тбилиси 1989 с.55-62.

10.Маликов В.Т., Капицкий Я.И., Поджаренко В.А. Бордюженко В.С. Измерение параметров закона распределения амплитуд высших гармоник напряжения в электрической сети // "Метрология" №6, 1985, с. 54-60

11.Андреев Н.В., Поджаренко В.А., Скелягин А.В. Задача идентификации параметров электромеханических систем // "Автоматика" ( АН Украины, "Институт кибернетики"), 1993. -с.32-38.

12.Поджаренко В.А., Кучерук В.Ю., Джарадат Райд Хасад. Динамічний метод визначення параметрів обмоток електричних машин // Вісник Вінницького політехнічного інституту, №1, 1993 с.59-61.

13.Поджаренко В.А., Кучерук В.Ю. До питання про ідентифікацію параметрів електричних машин. //Вісник ВПІ, №1(2), 1994, с.10-13

14.Поджаренко В.А., Кухарчук В.В. Обзор методов измерения пускового момента электродвигателей // Депон. рук. №1855-кр. 86-рус.УкрНИИТИ, с.20 Библиогр. 42 назв.

15. Маликов В.Т., Поджаренко В.А., Кухарчук В.В. Имитационное моделирование пускового момента асинхронного электродвигателя / Деп. рукопись №1792-Икр. 87 42с-рус. УкрНИИТИ.

16. Поджаренко В.А., Кулик А.Я., Обзор методов и средств измерения разности частот вращения / Депонир. рук. №595-Ук87. Библиограф. указ. ВИНТИ "Деп. научн. работы" 1987, №3 /187 б/о 1364/

17. Поджаренко В.А., Кулик А.Я. Анализ структур средств измерений разности частот вращения / Деп. рукоп. №3358-Ук87 библиограф. указ. ВИНТИ 1988, №4 /198/ б/984.

18. Поджаренко В.А., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю. Автоматизированная система измерения и контроля параметров электродвигателя // В сб. "Контроль и управление в технических системах": Винница 1992 с.124-125.

19. Поджаренко В.А., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю. Способ косвенного определения параметров математической модели электромеханических преобразователей с использованием функций чувствительности // В сб. "Контроль и управление в технических системах": Винница 1992. с.130-131.

20. АС №712628, МКИ G 01F 3/22. Устройство для измерения момента на валу электродвигателя / Поджаренко В.А., 1978

21. АС №669291, МКИ G 01P 3/48 Устройство для измерения угловой скорости / Поджаренко В.А., Харитоненко Ю.П., Лысогор В.Н., Гоменюк А.С., 1979..

22. АС №684445, МКИ G 01P 3/46. Устройство для измерения скорости вращения вала / Поджаренко В.А., Харитоненко В.П., Хомчук А.Ф., 1979.

23.АС №1613959, МКИ G 01P 3/489. Устройство для измерения разности частот вращения / Поджаренко В.А., Кухарчук В.В., Кулик А.Я., Дидык А.Н., 1986.

24.АС I613960, МКИ G 01P 3/56. Устройство для измерения параметров вращения / Маликов В.Т., Поджаренко В.А., Шаповалов А.П., Овчинников В.С., Кулик А.Я., 1986.

25.АС №830246 МКИ G 01P 3/48. Датчик скорости вращения // Поджаренко В.А., Овчинников В.С., Сало В.Е., 1981.

26.АС 830243, МКИ G 01P 3/48I, Устройство для измерения скорости вращения / Поджаренко В.А., Маликов В.Т., 1981.

27.АС №1151888 МКИ G 013/489 Цифровой тахометр/ Поджаренко В.А., Мельничук П.Л., 1984.

28.АС №1364992 МКИ G 01P 3/48I. Устройство для измерения скорости вращения / Поджаренко В.А., Кухарчук В.В., 1984.

29.АС №1262385, МКИ G 01P 3/489 Устройство для измерения скорости вращения / Карпов Е.А., Поджаренко В.А., Кухарчук В.В., Мельничук П.Л., 1986.

30.АС №1328695, МКИ G 01L 3/10. Способ определения пускового момента электродвигателя / Поджаренко В.А., Кухарчук В.В., 1987.

31.АС I345827 МКИ G 01L 3/10 Устройство для измерения пускового момента асинхронных электродвигателей / Маликов В.Т., Поджаренко В.А., Кухарчук В.В., 1987.

32.АС I345121, МКИ G 01P 3/48. Устройство для измерения скольжения асинхронных электродвигателей / Маликов В.Т., Панов Ю.Ф., Шаповалов А.П., Поджаренко В.А., Кулик А.Я., Кухарчук В.В., 1986.

33.АС І35237І МКИ с 01Р 3/489. Цифровой тахометр / Маликов В.Т., Панов Ю.Ф., Поджаренко В.А., Мельничук П.Л., Кухарчук В.В., Кобзев А.Г., 1987..

34.АС №ІІ6І56І7 МКИ с 01Р 3/48. Устройство для измерения скольжения/Поджаренко В.А.,Кулик А.Я.,Присяжнюк В.В., 1988.

35.АС №І364992 МКИ с 01Р 3/46. Устройство для измерения скорости вращения / Поджаренко В.А., Кухарчук В.В., 1988.

36.АС №І485І3І МКИ с 01Р 3/48. Устройство для измерения скольжения асинхронных машин / Поджаренко В.А., Кулик А.Я., Овчинников В.С., Присяжнюк В.В., 1989.

37.АС №І5335ІІ. Устройство измерения пускового момента электродвигателя / Кухарчук В.В., Маликов В.Т., Панов Ю.Ф., Поджаренко В.А., Шаповалов А.П., 1987.

38.АС №І566237 МКИ с 01L 25/00. Способ градуировки измерителя крутящего момента / Дидык А.Н., Маликов В.Т., Поджаренко В.А., Шаповалов А.П., Кобзев А.Г., 1987.

39.АС №І56692І МКИ с 01Р 3/48 Система для испытания асинхронных электрических машин / Поджаренко В.А., Кулик А.Я., Трофимов А.В., 1988.

40.АС І658098 МКИ с 01Р 3/48. Устройство для измерения скольжения / Поджаренко В.А., Кулик А.Я., Мельничук П.Л., Овчинников В.С., 1988.

41.АС №І624330 МКИ с 01Р 3/48. Устройство для измерения скольжения / Поджаренко В.А., Кулик А.Я., 1988.

42.Поджаренко В.А. О контроле характеристик электро-механических преобразователей //В сб. ИИС-85 /тез.докл.ВНТК/ Винница, 1985.

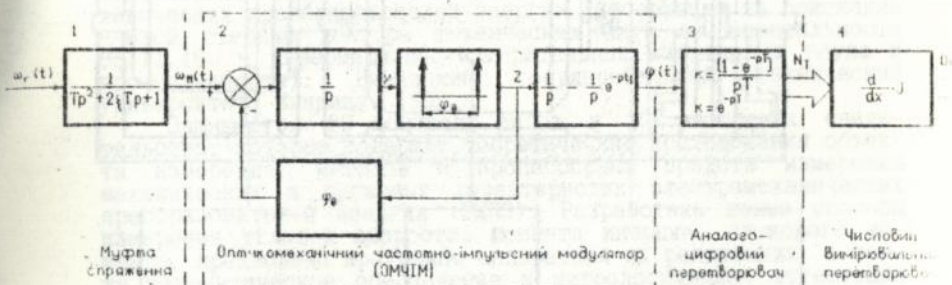


Рис. 1.

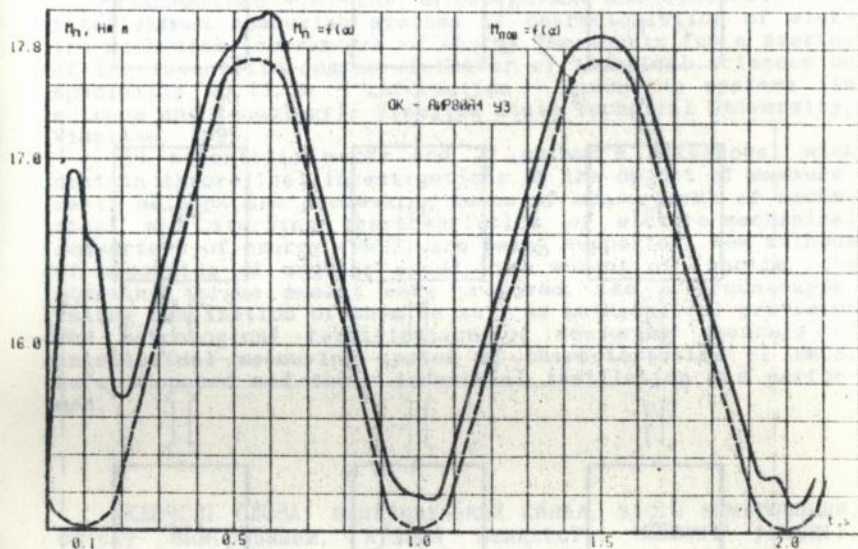


Рис. 2.

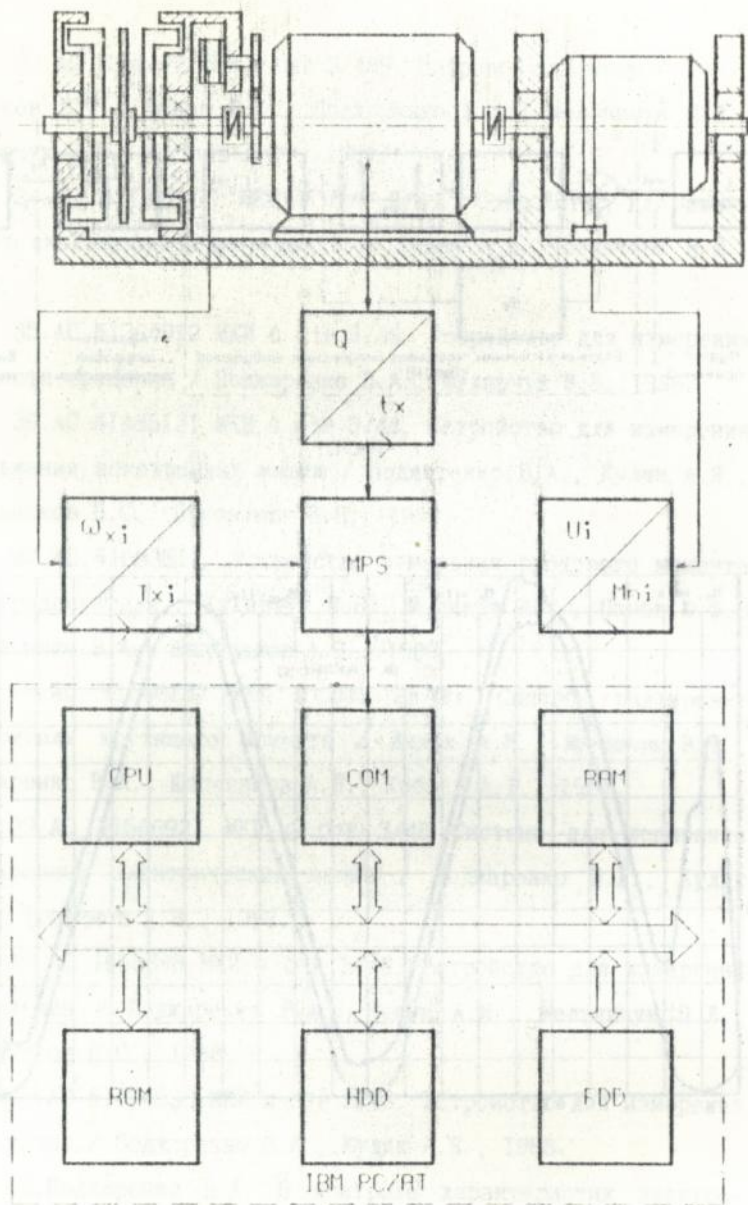


Рис. 3.

Поджаренко В.А. Исследование и разработка интеллектуальных измерительных систем характеристик электро-механических преобразователей энергии. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.16. - Информационно-измерительные системы (в науке и промышленности); Винницкий государственный технический университет, Винница, 1995.

Защищается 89 научных работ и 22 авторских свидетельства, которые содержат теоретические исследования объекта измерения, методов и процессорных средств измерения механических и пусковых характеристик электро-механических преобразователей энергии (ЭМПЭ). Разработаны новые способы измерения угловой скорости, момента инерции, пускового момента; предложена программно-аппаратная их реализация, а также математическое обеспечение и метрологическая аттестация измерительных каналов интеллектуальной измерительной системы характеристик ЭМПЭ и осуществлено промышленное внедрение.

PODZHARENKO V.A. The investigation and elaboration of intellektual measuring systems of characteristics of elektro-mechanical converters of energy. The thesis for a seeking of the scientific degree of Doktor of technical sciences on speciality 05.11.16 - information - measuring systems (in science and tehnology); Vinnitsa State Technical University, Vinnitsa, 1995.

89 scientific works and 22 author's evidences, wich contain theoretical investigations of the object of measurement, methods and processing means of measurement of mechanical and starting characteristics of elektro-mechanical converters of energy (EMCE) are being supported. New methods of measuring of angular speed, the moment of inertia, the starting torque moment were proposed; the programme-apparating realization of them as well as mathematical provision and metrological certification of measuring channels of intellektual measuring system of characteristics of EMCE, were proposed and their industrial instilation was performed.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: вимірювальний канал, засіб вимірювання, об'єкт вимірювання, кутова швидкість, момент інерції, пусковий момент, ідентифікація.





AB 31 616

**AB 31.616**