

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**  
**Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки**  
**Кафедра метрології та інформаційно-вимірювальної техніки**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до кваліфікаційної роботи  
магістра

на тему: «Комп'ютеризована система вимірювання та контролю механічних параметрів асинхронного електроприводу центробіжних насосів.»

Виконав: студент 2 курсу, групи МТ-1м

Спеціальності: 152 «Метрологія та  
інформаційно-вимірювальна техніка»

Магалецький Я.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор, зав. каф. М та ІВТ

Подчашинський Ю.О.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Рецензент: к.т.н., доцент,

в.о. декана факультету КІТМР

Ткачук А.Г.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Житомир – 2023

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**  
**Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки**  
**Кафедра метрології та інформаційно-вимірювальної техніки**  
**Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри метрології та  
інформаційно-вимірювальної техніки  
д.т.н., професор Подчашинський Ю.О.

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу магістра

Студент \_\_\_\_\_ Магалецький Ярослав Валентинович

1. Тема роботи: «Комп'ютеризована система вимірювання та контролю  
механічних параметрів асинхронного електроприводу  
центробіжних насосів.»

Керівник роботи: завідувач кафедри М та ІВТ доктор технічних наук,  
професор Подчашинський Ю.О.

затверджена наказом по університету від « 09 » листопада 2023 р. № 648/с

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру « 19 » грудня 2023р.

3. Вихідні дані до роботи: паспортні характеристики та параметри  
електродвигунів, що будуть використовуватись у  
дослідженнях.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці):

1. Дослідити сучасний стан проблеми на основі аналізу науково-технічних  
джерел

2. Проаналізувати основні параметри та характеристики двигунів насосного  
обладнання.

3. Обґрунтувати та вибрати методику здійснення вимірювань.

4. Запропонувати варіант здійснення процесу вимірювань та синтезувати на  
основі цього структуру інформаційно - вимірювальної системи та алгоритми  
її функціонування.

5. Створити програмне забезпечення для дослідження математичної моделі  
на ЕОМ.

5. Перелік графічного матеріалу:

Презентаційний матеріал - 14 слайдів

6. Консультанти кваліфікаційної роботи магістра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

| Розділ | Консультант        | Підпис, дата   |                  |
|--------|--------------------|----------------|------------------|
|        |                    | Завдання видав | Завдання прийняв |
| 1-5    | Подчашинський Ю.О. |                |                  |
|        |                    |                |                  |
|        |                    |                |                  |

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                                          | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1     | Огляд та аналіз джерел інформації                                            | 01.10.23 – 05.10.23            | Виконано |
| 2     | Формулювання завдань кваліф. роботи                                          | 06.10.23 – 10.10.23            | Виконано |
| 3     | Аналіз будови та конструкції центробіжних насосів                            | 25.10.23 – 09.11.23            | Виконано |
| 4     | Аналіз основних параметрів електродвигунів насосного обладнання              | 11.10.23 – 15.10.23            | Виконано |
| 5     | Розробка структури та алгоритмів роботи інформаційно - вимірювальної системи | 16.10.23 – 24.10.22            | Виконано |
| 6     | Побудова математичних моделей функціонування системи                         | 10.11.23 – 22.11.23            | Виконано |
| 7     | Розробка програмного забезпечення для дослідження математичних моделей       | 23.11.23 – 03.12.23            | Виконано |
| 8.    | Проведення моделювання та експериментальних досліджень                       | 04.12.23 – 10.12.23            | Виконано |
| 9     | Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу                | 11.12.23 – 17.12.23            | Виконано |

Студент

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Магалецький Я.В.

(прізвище та ініціали)

Подчашинський Ю.О.

(прізвище та ініціали)

## ВСТУП

*Метою даної роботи є* підвищення точності та швидкодії вимірювання механічних параметрів асинхронного електроприводу центробіжних насосів.

*Для досягнення даної мети необхідно вирішити наступні задачі:*

1. Дослідити сучасний стан проблеми на основі аналізу науково-технічних джерел.
2. Проаналізувати основні параметри та характеристики двигунів насосного обладнання.
3. Обґрунтувати та вибрати методику здійснення вимірювань.
4. Запропонувати варіант здійснення процесу вимірювань та синтезувати на основі цього структуру інформаційно-вимірювальної системи та алгоритми її функціонування.
5. Створити програмне забезпечення для дослідження математичної моделі на ЕОМ.

*Об'єкт дослідження* – процеси вимірювання механічних параметрів асинхронного електроприводу центробіжних насосів.

*Предмет дослідження* – комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система вимірювання та контролю механічних параметрів асинхронного електроприводу, що оснований на вимірюванні частоти обертання двигунів центробіжних насосів.

Методи дослідження базуються на аналітичному виведенні рівнянь математичної моделі вимірювального каналу, використанні методів ЦОС з ВІ, використанні обчислювальних блоків у вимірювальному каналі, застосуванні методів комп'ютерного моделювання з наступною статистичною обробкою отриманих результатів.

*Наукова новизна даної роботи полягає в тому, що:*

1. Запропоновано структуру та програмно-алгоритмічне забезпечення частотного вимірювального каналу комп'ютеризованої системи для визначення частоти обертання асинхронних електродвигунів.

2. Удосконалено методику та структурну схему установки для вимірювання пускових моментів та контролю працездатності асинхронних електродвигунів, що працюють з центробіжними насосами.

***Практична цінність*** даної роботи полягає в:

Розроблена комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система та програмно – алгоритмічне забезпечення дозволяють проводити вимірювання частоти обертання асинхронних електродвигунів, контролювати пусковий момент та працездатність цих електродвигунів в складі центробіжних насосів для перекачування води.

Забезпечено підвищення точності та швидкодії вимірювального каналу при контролі вказаних механічних параметрів центробіжних насосів.

***Структура та обсяг роботи.*** Дана робота складається з анотації, вступу, 3 основних розділів, висновків, переліку використаних літературних джерел та додатку. Робота викладена на 86 сторінках основного тексту і містить 22 рисунки та 5 таблиць.

***Публікації.*** За темою кваліфікаційної магістерської роботи було опубліковано 1 тези Всеукраїнської науково-технічної конференції:

Подчашинський Ю.О., Магалецький Я.В., Чепюк Л.О. Оцінка продуктивності мікропроцесорної системи для вимірювання механічних параметрів електродвигунів // Тези VI Всеукраїнської науково-технічної конференції «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення», 29-30 листопада 2023 р., м. Житомир. 2023. С. 77-78.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| АНОТАЦІЯ .....                                                                                                         | 8  |
| ANNOTATION.....                                                                                                        | 8  |
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧОК, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,<br>СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ ЗАСТОСОВУВАНИХ У МАР .....                        | 9  |
| Терміни .....                                                                                                          | 11 |
| ВСТУП.....                                                                                                             | 13 |
| 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ .....                                                                                              | 17 |
| 2. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ ТА<br>АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ.....                                        | 19 |
| 2.1. Загальна характеристика відцентрових насосів.....                                                                 | 19 |
| 2.2. Загальна характеристика асинхронних двигунів.....                                                                 | 21 |
| 3. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ПАРАМЕТРІВ<br>ДВИГУНІВ НАСОСНОГО ОБЛАДНАННЯ.....                                   | 24 |
| 3.1. Аналіз основних характеристик та параметрів асинхронних<br>двигунів.....                                          | 24 |
| 3.2. Методика математичного моделювання електродвигунів.....                                                           | 38 |
| 3.3. Побудова математичних моделей електродвигунів.....                                                                | 40 |
| 4. АНАЛІЗ ТА ПОБУДОВА МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ<br>ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ.....                                           | 52 |
| 4.1. Вимірювання частоти обертання вала електродвигунів.....                                                           | 52 |
| 4.1.1. Цифрові частотоміри.....                                                                                        | 52 |
| 4.1.2. Вимірювання середніх значень швидкості обертання .....                                                          | 53 |
| 4.1.3. Вимірювання миттєвих значень швидкості обертання.....                                                           | 56 |
| 4.1.4. Частотний вимірювальний канал із мікропроцесорним<br>управлінням.....                                           | 58 |
| 4.2. Вимірювання механічних моментів електродвигунів.....                                                              | 66 |
| 4.2.1. Використання асинхронного двигуна в якості навантажувальної<br>машини при вимірюваннях обертаючих моментів..... | 68 |

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.2. Використання асинхронного двигуна в якості привідної машини при вимірюваннях пускового моменту.....                   | 69 |
| 5. ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ.....                               | 72 |
| 5.1. Мікропроцесорна система вимірювання частоти обертання електродвигунів.....                                              | 72 |
| 5.2. Мікропроцесорна система вимірювання пускового моменту електродвигунів.....                                              | 76 |
| 5.3. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи визначення механічних параметрів двигунів насосного обладнання..... | 83 |
| 5.4. Методика проектування мікропроцесорних вимірювальних систем...                                                          | 84 |
| 5.5. Програмна реалізація математичної моделі системи.....                                                                   | 87 |
| ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....                                                                                                      | 89 |
| РЕКОМЕНДАЦІЇ.....                                                                                                            | 92 |
| ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                                             | 93 |
| ДОДАТКИ.....                                                                                                                 | 95 |

## **АНОТАЦІЯ**

Дана магістерська кваліфікаційна робота присвячена проблемі вимірювання механічних характеристик асинхронних двигунів центробіжних водяних насосів. Проведені дослідження стосовно характеристик та параметрів електродвигунів, що підлягають контролю та методиці їх вимірювання. В роботі запропонована інформаційно-вимірювальна система для визначення механічних параметрів двигунів насосного обладнання. Розроблена структурна схема системи та алгоритми її функціонування. При цьому отримані алгоритми, які підвищують точність та швидкість вимірювань. Проаналізована методика побудови цієї системи. Розроблена програма та досліджена модель системи вимірювання характеристик асинхронних електродвигунів.

## **ANNOTATION**

This master's thesis is devoted to the problem of measuring the mechanical characteristics of asynchronous motors of centrifugal water pumps. Conducted research on the characteristics and parameters of electric motors subject to control and their measurement methods. The paper proposes an information and measurement system for determining the mechanical parameters of engines of pumping equipment. The structural scheme of the system and algorithms of its functioning have been developed. At the same time, algorithms were obtained that increase the accuracy and speed of measurements. The method of building this system is analyzed. A program was developed and a model of the system for measuring the characteristics of asynchronous electric motors was studied.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧОК, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ ЗАСТОСОВУВАНИХ У МАР

Позначення кратних і дільних одиниць згідно табл. 1.

Таблиця 1

### Позначення кратних і дільних одиниць

| Кратність                      | Префікси | Скорочені міжнародні позначення |
|--------------------------------|----------|---------------------------------|
| 1 000 000 000 000 = $10^{12}$  | тера     | T                               |
| 1 000 000 000 = $10^9$         | гіга     | G                               |
| 1 000 000 = $10^6$             | мега     | M                               |
| 1 000 = $10^3$                 | кіло     | K                               |
| 100 = $10^2$                   | гекто    | H                               |
| 10 = $10^1$                    | дека     | Da                              |
| 0,1 = $10^{-1}$                | деци     | D                               |
| 0,01 = $10^{-2}$               | санти    | C                               |
| 0,001 = $10^{-3}$              | мілі     | M                               |
| 0,000 001 = $10^{-6}$          | мікро    | M                               |
| 0,000 000 001 = $10^{-9}$      | нано     | N                               |
| 0,000 000 000 001 = $10^{-12}$ | піко     | P                               |

Одиниці міжнародної системи (СІ) у табл. 2.

Таблиця 2

### Одиниці міжнародної системи

| Величина                 |              | Одиниця        |            |         |
|--------------------------|--------------|----------------|------------|---------|
| Найменування             | Розмір-ність | Найменування   | Позначення |         |
|                          |              |                | Українське | Міжнар. |
| 2.1 Основні одиниці      |              |                |            |         |
| Довжина                  | L            | метр           | М          | М       |
| Маса                     | М            | кілограм       | Кг         | Kg      |
| Час                      | T            | секунда        | С          | S       |
| Сила електричного струму | I            | ампер          | А          | А       |
| Температура Цельсія      | θ            | градус Цельсія | ° С        | ° С     |
| Плоский кут              | —            | радіан         | Радіан     | Rad     |

Продовження табл. 2

| Величина                      |                                                               | Одиниця                         |                  |                  |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------|------------------|
| Найменування                  | Розмір-ність                                                  | Найменування                    | Позначення       |                  |
|                               |                                                               |                                 | Українське       | Міжнар.          |
| 2.2 Похідні одиниці           |                                                               |                                 |                  |                  |
| Площа                         | L <sup>2</sup>                                                | квадратний метр                 | м <sup>2</sup>   | m <sup>2</sup>   |
| Швидкість                     | LT <sup>-1</sup>                                              | метр за секунду                 | м/с              | m/s              |
| Прискорення                   | LT <sup>-2</sup>                                              | метр на секунду в квадраті      | м/с <sup>2</sup> | m/s <sup>2</sup> |
| Частота                       | T <sup>-1</sup>                                               | герц                            | Гц               | Hz               |
| Частота обертання             | T <sup>-1</sup>                                               | секунда в мінус першого ступеня | с <sup>-1</sup>  | s <sup>-1</sup>  |
| Кутова швидкість              | T <sup>-1</sup>                                               | радіан за секунду               | рад/с            | rad/s            |
| Сила (вага)                   | LMT <sup>-2</sup>                                             | ньютон                          | Н                | N                |
| Питома вага                   | L <sup>-2</sup> MT <sup>-2</sup>                              | ньютон на кубічний метр         | Н/м <sup>3</sup> | N/m <sup>3</sup> |
| Тиск                          | L <sup>-1</sup> MT <sup>-2</sup>                              | паскаль                         | Па               | Pa               |
| Робота (енергія)              | L <sup>2</sup> MT <sup>-2</sup>                               | джоуль                          | Дж               | J                |
| Потужність                    | L <sup>2</sup> MT <sup>-3</sup>                               | ват                             | Вт               | W                |
| Щільність електричного струму | L <sup>-2</sup> I                                             | ампер на квадратний метр        | A/м <sup>2</sup> | A/m <sup>2</sup> |
| Кількість електрики           | TI                                                            | кулон                           | Кл               | C                |
| Електрична напруга            | L <sup>2</sup> MT <sup>-3</sup> I <sup>-1</sup>               | вольт                           | В                | V                |
| Електрична ємність            | L <sup>-2</sup> M <sup>-1</sup> T <sup>4</sup> I <sup>2</sup> | фарад                           | Ф                | F                |
| Діелектрична проникність      | L <sup>-3</sup> M <sup>-1</sup> T <sup>4</sup> I <sup>2</sup> | фарад на метр                   | Ф/м              | F/m              |
| Електричний опір              | L <sup>2</sup> MT <sup>-3</sup> I <sup>-2</sup>               | ом                              | Ом               | Ω                |
| Питомий електричний опір      | L <sup>3</sup> MT <sup>-3</sup> I <sup>-2</sup>               | ом на метр                      | Ом·м             | Ω·m              |
| Електрична провідність        | L <sup>-2</sup> M <sup>-1</sup> T <sup>3</sup> I <sup>2</sup> | сіменс                          | См               | S                |
| Магнітний потік               | L <sup>2</sup> MT <sup>-2</sup> I <sup>-1</sup>               | вебер                           | Вб               | Wb               |
| Магнітна індукція             | MT <sup>-2</sup> I <sup>-1</sup>                              | тесла                           | Тл               | T                |
|                               |                                                               |                                 |                  |                  |

Закінчення табл. 2

| Величина                     |                         | Одиниця        |            |         |
|------------------------------|-------------------------|----------------|------------|---------|
| Найменування                 | Розмір-ність            | Найменування   | Позначення |         |
|                              |                         |                | Українське | Міжнар. |
| Магніто-рушійна сила         | I                       | ампер          | А          | А       |
| Напруженість магнітного поля | $L^{-1} I$              | ампер на метр  | А/м        | A/m     |
| Індуктивність                | $L^2 M T^{-2} I^{-2}$   | генрі          | Гн         | Н       |
| Магнітна проникність         | $L M T^{-2} I^{-2}$     | генрі на метр  | Гн/м       | H/m     |
| Намагніченість               | $L^{-1} I$              | ампер на метр  | А/м        | A/ m    |
| Магнітний опір               | $L^{-2} M^{-1} T^2 I^2$ | ампер на вебер | А/Вб       | A/Wb    |
| Реактивна потужність         | $L^2 M T^{-3}$          | вар            | Вар        | var     |
| Повна потужність             | $L^2 M T^{-3}$          | вольт · ампер  | В А        | V A     |
| Кількість теплоти            | $L^2 M T^{-2}$          | джоуль         | Дж         | J       |

### Терміни

*Мікропроцесорна система (МПС)* – зібрана у єдине ціле сукупність взаємодіючих великих інтегральних схем мікропроцесорного комплекту, організована в обчислювальну або в керуючу систему з мікропроцесором, як вузлом обробки інформації.

*Постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП)* – пристрій пам'яті, в якому зберігається програма (при необхідності сукупність констант). Вміст ПЗП як правило не може бути стертий (змінений) користувачем і використовується як пам'ять програми, складеної виробником відповідно до вимог замовника.

*Оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП)* – пам'ять даних, що належать обробці і результатам обчислень, а також для тимчасового зберігання програм, які часто змінюються. ОЗП припускає як запис, так і зчитування інформації.

*Шини передачі даних* – група електричних ліній, які призначені для з'єднання мікропроцесора з зовнішніми (для нього) пристроями (ОЗП, ПЗП тощо).

*Шина даних (ШД)* – двонапрямлена шина, по якій дані можуть направлятись в мікропроцесор або з нього. При цьому необхідно підкреслити, що одночасна передача даних в обох напрямках неможлива.

*Шина адреси(ША)* – однонаправлена шина, з'єднує процесор з модулями пам'яті.

*Шина управління(ШУ)* – шина, призначена для передачі сигналів, що обслуговують взаємодію, синхронізацію роботи всіх модулів системи і внутрішніх вузлів мікропроцесора.

*Період  $T$  періодичного сигналу* – найменший інтервал часу, через який регулярно послідовно повторюється довільно вибране миттєве значення періодичного сигналу  $U(t)$

*Частота  $f$  періодичного сигналу* – це фізична величина, значення якої характеризують зворотні значення періоду цього сигналу. Співвідношення між значеннями частоти і періоду визначається формулою  $f = 1/T$

## ВСТУП

Висока ефективність сучасного насосного обладнання, в сполученні з енергоефективністю і можливістю застосування в широкому діапазоні продуктивностей та напірних характеристик насосів, роблять його незамінним на будь-якому виробництві та системах водопостачання.

Відцентрові насоси є одним з найбільш поширених типів насосів, які використовуються в різних галузях промисловості для перекачування великих об'ємів рідин з високою ефективністю.

За принципом роботи вони використовують відцентрову силу для перекачування рідини, що дозволяє їм ефективно перекачувати великі об'єми рідини при низькому тиску.

Їх енергоефективність забезпечується високим ККД, який може досягати 92% у великих установках і 60-70% у комерційних та побутових апаратів 3.

Надійність та зносостійкість забезпечується новітніми матеріалами, які роблять їх стійкими до зносу, особливо при роботі з агресивними рідинами.

Також перевагою відцентрових насосів є їх універсальність. Вони можуть працювати з різними видами робочого середовища, включаючи воду, каналізаційні стоки, нафту і нафтопродукти.

Стабільна продуктивність є також перевагою відцентрових насосів. Вони гарантують постійну продуктивність і можливість роботи з високою швидкістю обертання, зменшуючи таким чином конструктивні розміри. Крім того, це дає можливість використовувати прямий привід насосів від електродвигунів. Найпоширенішими двигунами, що використовуються для приводу відцентрових насосів є асинхронні електричні двигуни.

В наш час, дивлячись на успіхи, досягнуті провідними світовими компаніями (danfoss, grundfoss, DAB тощо) у розробці та виготовленні електроприводів та інтелектуальних систем керування ними, можна помітити початок ери нового покоління насосного обладнання, що відрізняється підвищеною ефективністю та складністю побудови.

За такої тенденції розвитку, компанії, які здійснюють ремонт та обслуговування насосного обладнання необхідно буде дооснащувати обладнанням для діагностики та ремонту електродвигунів з частотним приводом, а отже вимірювальним обладнанням нового покоління, . Цей аспект також підкреслює актуальність теми магістерської роботи вже сьогодні.

Якщо повернутись до насосів на сучасних підприємствах, то вони вже потребують для свого обслуговування, швидкої діагностики та ремонту відповідних сучасних технічних засобів.

Оскільки асинхронні двигуни (АД) найчастіше застосовуються в сучасних потужних насосних станціях і широко використовуються в комплекті з перетворювачами частоти (навіть існують спеціальні серії частотно-регульованих АД), то після планового або капітального ремонту подібної машини, обов'язковим є її випробування в робочих умовах.

Якщо машина є частиною технологічного процесу, то таке випробування супроводжується великими затратами часу та простом технології. Відповідно є економічно недоцільним.

Альтернативою є випробування та вимірювання механічних характеристик двигуна в процесі його ремонту і усунення недоліків на цьому етапі. Це гарантує повернення в технологічний процес повністю робочої та випробуваної машини, яка відповідає своїм характеристикам.

Отже, запровадження інформаційно-вимірювальних систем для контролю працездатності асинхронних електродвигунів насосного обладнання є актуальним для компаній, які займаються обслуговуванням, ремонтом, компонуванням та розробкою насосних агрегатів. Це особливо актуально для розробників частотного електроприводу насосів.

### **Актуальність інформаційно-вимірювальних систем у сфері діагностики електроприводу.**

Простої обладнання на будь-якому підприємстві призводять до втрати прибутків. Щоб попередити відмову обладнання потрібно вчасно проводити профілактичні ремонти. Після поломки необхідно швидко визначити причину відмови та усунути її. Через вище згадане тема магістерської кваліфікаційної роботи є актуальною, тому що розроблювана система дозволить прискорити відновлення обладнання а також запобігати його виходу з ладу. Також подібна система дозволяє проводити дослідження та випробування електродвигунів після їх відновлення та досліджувати новостворювані двигуни (на спеціалізованих виробничих підприємствах).

Інноваційна діяльність в даній роботі може розглядатися з двох сторін. По-перше як впровадження контрольно-діагностичних систем на підприємствах України, оскільки для нашої держави розглядувані системи і технології є відносно новими, особливо при теперішньому розповсюдженні насосного обладнання. З іншого боку дана робота має на меті застосування нових рішень та алгоритмів здійснення вимірювань, що призведуть до усунення основних недоліків існуючих методів вимірювання характеристик електродвигунів. Крім того розроблювана система дозволить вимірювати в автоматичному режимі параметри електричних машин, які до цього можливо було визначати аналітично (при використанні відповідного програмного забезпечення) і які до цього, через згадані причини, часто нехтувались. Також принципи вимірювання, реалізовані в даній системі, дозволяють на її основі будувати інші, більш спеціалізовані системи дослідження електродвигунів, змінивши при цьому вхідні датчики (сприймаючі вхідні величини) і кінцеву програму, виконуючу обчислення. В іншому випадку, дана система може доповнити іншу, більш складну, систему, розширивши при цьому її можливості. Тому результати даної кваліфікаційної магістерської роботи можуть знайти свою практичну реалізацію як в компаніях, що займаються ремонтом та сервісним обслуговуванням

насосного обладнання, так і на підприємствах, які розробляють та збирають насосні агрегати, або навіть виготовляють електричні машини. Також система може знайти своє застосування: на електроремонтних підприємствах; в науково-дослідницьких сферах; для здійснення навчального процесу в ВНЗ тощо.

## 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Одним з основних способів підвищення якості та інтенсифікації проектування, скорочення його строків та вартості є використання засобів комп'ютерної техніки на всіх етапах, починаючи з дослідження процесів, що відбуваються у певній системі і закінчуючи реалізацією даної системи на практиці.

Специфіка моделювання на комп'ютері має суттєві відмінності від специфіки традиційного аналізу. Тому іноді спроби використання добре розроблених класичних методів розрахунку та дослідження автоматизованих систем із застосуванням комп'ютера призводять до певних труднощів. Це пояснюється тим, що при їх розробці не були враховані особливості та можливості сучасної обчислювальної техніки.

Тому узагальнення існуючих та розробка нових, орієнтованих на цифрову обробку, методів та алгоритмів, призначених для моделювання та автоматизації проектування є важливим та актуальним завданням.

Нажаль, в існуючій літературі питання розрахунку та моделювання систем електроприводу з застосуванням комп'ютерів та їх автоматизованого проектування розглянуті недостатньо повно. Наприклад зовсім не відображені загальні методологічні питання цифрового моделювання автоматизованих систем з використанням електропривода, питання системного підходу як до процесу дослідження, так і до процесу комп'ютерного проектування в цілому. Деякі питання побудови математичних та цифрових моделей викладені в окремих статтях різних періодичних видань. Окремі видання, в достатній мірі присвячені цифровому моделюванню електроприводу, у вільному доступі, на сьогодні знайти важко, причому і серед них більшість присвячена вирішенню задач проектування електронних схем та програмного забезпечення до них. До того ж згадана література швидко застаріває і може не відповідати можливостям сучасних програмних засобів, які дуже стрімко розвиваються.

Тому, знову ж таки, доводиться адаптувати старі алгоритми до їх нової програмної реалізації, враховуючи при цьому особливості того чи іншого програмного продукту. Проблем з описами програм та посібниками по них наразі не виникає.

В мережі глобальній мережі інтернет, у вільному доступі, присутня велика кількість літератури, що вже стала класикою, в якій розглядаються електричні машини у всіх їх аспектах. Але знову ж таки проблематичним стало те що видання в основному англomовні, і довелось звертатись до окремих статей та періодичних видань в перекладі.

Таким чином, в повній мірі вдалось знайти публікації, в яких розглядаються електричні машини, що було потрібно для аналізу їх основних характеристик та проведення їх дослідження. На сайтах технологічних університетів було знайдено багато навчальних посібників та літератури щодо програмних продуктів, з допомогою яких, можливо здійснити моделювання. На основі окремих публікацій вдалося скласти картину про принципи та методи комп'ютерного моделювання електродвигунів.

## 2. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ ТА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

### 2.1. Загальна характеристика центробіжних насосів

**Насос** – це машина, яка перетворює механічну енергію у гідравлічну енергію руху води.

**Центробіжний насос** — підклас динамічних поглинаючих турбомашин осесиметричної дії. Відцентрові насоси використовуються для транспортування рідин шляхом перетворення кінетичної енергії обертання в гідродинамічну енергію потоку рідини. Обертальна енергія, як правило, передається від електродвигуна. Рідина надходить у робоче колесо насоса вздовж або поблизу до осі обертання, і прискорюється крильчаткою, тече радіально назовні в дифузور або спіральну камеру (кожух). По суті насос відцентровий — це насос лопатевий, який діє за допомогою відцентрових сил і в якому рідке середовище переміщується через робоче колесо від центра до периферії.

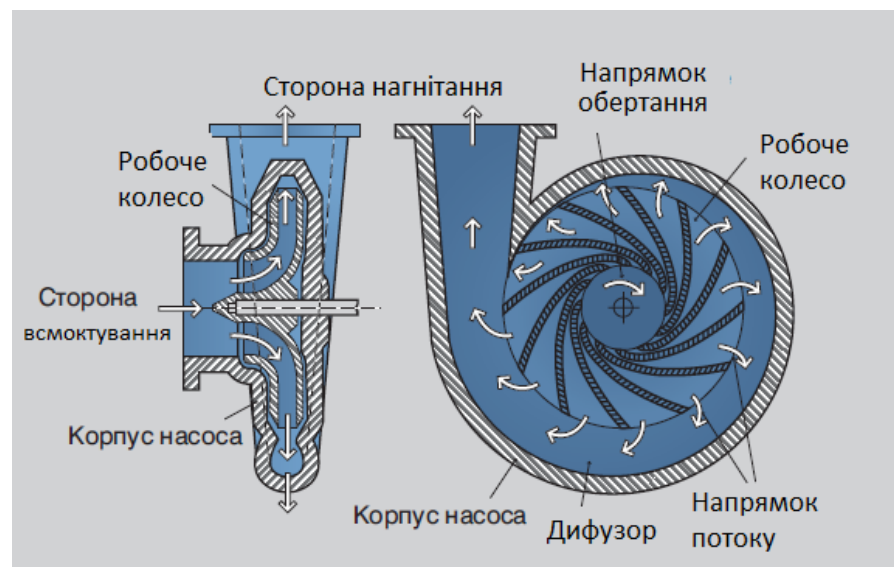


Рис. 2.1. Будова гідравлічної частини центробіжного насосу

Центробіжні насоси класифікують за кількома ознаками:

1. За кількістю робочих коліс: одноколісні, двоколісні і багатокілісні (насоси секційні), в яких рідина проходить послідовно крізь ряд коліс, причому загальний напір насоса дорівнює сумі напорів, які створюються кожним колесом. У багатоступінчастому відцентровому насосі на вал насаджено декілька коліс. Рідина через всмоктуючий патрубок підводиться до центру 1-го колеса, від периферії цього колеса до центру наступного колеса і далі до нагнітального патрубка. У колеса (2, 3, 4 і так далі) рідина надходить під тиском. Кожне колесо збільшує тиск рідини. Багатокілісні насоси створюють великі натиски.
2. За створюваним тиском: низьконапірні (до 2 атм.); середньонапірні (2–6 атм.); високонапірні (понад 6 атм.).
3. За способом підведення рідини до робочого колеса: насоси з одностороннім підведенням і насоси з двостороннім підведенням.
4. За розташуванням вала — горизонтальні та вертикальні. Вертикальні насоси застосовуються для відкачування рідини з глибоких колодязів і свердловин, а також з фабричних зумпфів, куди вони опускаються.
5. За конструкцією корпусу — з вертикальним роз'єднанням і горизонтальним роз'єднанням.

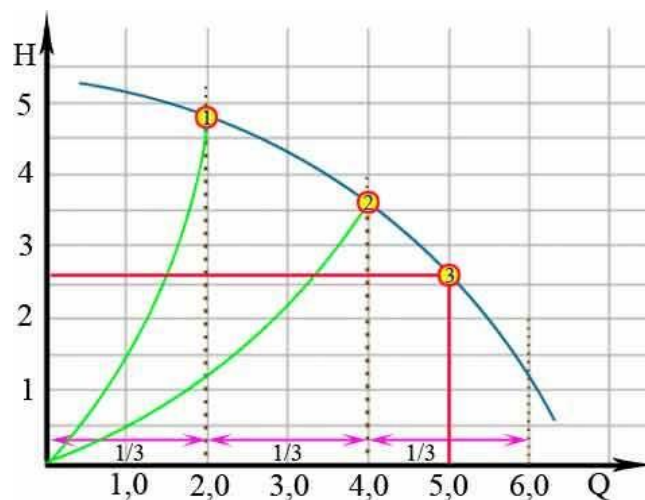


Рис. 2.2. Приклад напірної характеристики центробіжного насоса

**Напірні характеристики центробіжних насосів** — графічні залежності напору, що його розвиває насос, споживаної потужності, кавітаційного запасу й коефіцієнта корисної дії від подачі насоса. На рис. 2.2. показано приклад напірної характеристики відцентрового насоса.

## **2.2. Загальна характеристика асинхронних двигунів**

Електропривід із асинхронними двигунами є наймасовішим видом приводу в насосному обладнанні. Таке положення визначається простотою виготовлення й експлуатації асинхронних електродвигунів, їх меншими в порівнянні з двигунами постійного струму масою, габаритами і вартістю, надійністю в роботі.

Основною областю застосування асинхронних електродвигунів аж до недавнього часу був нерегульований електропривід. В останні роки в зв'язку з розробкою і серійним випуском нової елементної бази стали створюватися регульовані асинхронні електроприводи на базі перетворювачів частоти і напруги з характеристиками, що не поступаються за своїми показниками електроприводу постійного струму. Застосування таких електроприводів у силу визначених переваг асинхронного двигуна являє собою прогресивну тенденцію щодо підвищення техніко-економічних показників насосного обладнання.

Розглянемо деякі типи асинхронних двигунів, що застосовуються в насосному обладнанні на прикладі серії 1LE15 (компанії Siemens) (табл. 2.1). Дані двигуни являють собою асинхронні електродвигуни, живляться від трифазної мережі, з короткозамкнутим ротором, можливістю частотного керування, призначені для приводу насосного обладнання, вентиляторів та інших застосувань з важким пуском.

Таблиця 2.1

**Основні технічні характеристики електродвигунів серії 1LE15**

| Найменування параметра                   | 1LE15   |
|------------------------------------------|---------|
| Потужність, кВт                          | 15      |
| Частота обертання, об/хв                 | 1800    |
| Частота струму, Гц                       | 50      |
| Номинальне ковзання, %                   | 1,5     |
| Напруга, В                               | 400/690 |
| Номинальний струм, А                     | 33,5    |
| ККД, %                                   | 91      |
| Коефіцієнт потужності                    | 0,76    |
| Момент інерції ротора, кг/м <sup>2</sup> | 0,56    |
| Індуктивний опір, Ом                     | 0,12    |
| Маса, кг                                 | 249     |

Електродвигун 1LE15 (рис. 2.3) призначений для привода трамвая. Ступінь захисту IPW. При цьому ступінь захисту оболонки IP 54 без відводів повітря і одного отвору діаметром 8 мм. для зливу конденсату. Клас нагрівостійкості Н. Діапазон частот обертання вала від 0 до 2000 об/хв. Максимальний момент на валу 196 н.м. забезпечується в діапазоні частот до 1500 об/хв.



Рис. 2.3. Електродвигун 1LE15

**Висновки.** Зроблений короткий огляд будови та характеристик відцентрових насосів. Описані їх особливості, основні характеристики та переваги. Також описані особливості двигунів, що використовуються в насосному обладнанні для приводу гідравлічної частини. Показано, що асинхронні двигуни є основним типом приводу для подібних рішень. Використання сучасного частотного керування дозволяє отримувати характеристики асинхронних двигунів подібні до характеристик двигунів

постійного струму. Приведені, як приклад, характеристики частотно керуємого асинхронного двигуна для привода консольного відцентрового насоса.

### 3. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНІВ НАСОСНОГО ОБЛАДНАННЯ

#### 3.1. Аналіз основних параметрів асинхронних двигунів

Для насосних двигунів, з важким стартом, однією з визначальних характеристик є механічний момент на валу, який двигун здатен розвинути.

Прямі вимірювання таких моментів (наприклад пускового моменту) не дають достатньої точності, а при розрахунках обов'язково потрібно вводити поправочні коефіцієнти. Ці труднощі у асинхронних двигунів пов'язані з паразитними моментами, які виникають в них. Тому нижче розглянемо причини їх виникнення і основні характеристики цих двигунів.

**Паразитні моменти асинхронного двигуна.** Крім головного або основного моменту, створюваного першими гармонійними потоку і струму, в асинхронному двигуні виникає ряд додаткових або паразитних моментів, що можуть за певних умов порушити роботу двигуна або навіть зробити її неможливою.

Розрізняють наступні види паразитних моментів:

- а) асинхронні моменти, створювані вищими гармонійними м. р. с, у тому числі і зубчатими гармонійними.
- б) синхронні моменти, що виникають при визначеній швидкості і при визначеному співвідношенні між числами пазів статора і ротора  $Z_1$  і  $Z_2$ .
- в) вібраційні моменти, обумовлені також несприятливим співвідношенням чисел пазів  $Z_1$  і  $Z_2$ .

Крім того, відомий вплив на роботу асинхронного двигуна роблять вищі гармонійні напруги (тимчасові), але з ним можна не рахуватися, тому що вони звичайно невеликі.

**Асинхронні паразитні моменти.** Говорячи про роботу асинхронного двигуна, ми показали, що перші гармонійні м. р. с. статора і ротора обертаються в просторі завжди в одному напрямку і з однаковою швидкістю

$n_1$  причому швидкість основної гармонійної м. р. с. ротора складається зі швидкості  $n_1 - n_2$  обертання її щодо ротора і швидкості обертання ротора  $n$ .

Поширимо це представлення про взаємозалежність між м. р. с. статора і ротора на гармонійні м. р. с. будь-якого порядку. Якщо перша гармонійна м. р. с. статора обертається зі швидкістю  $n_1$ , то гармонійна м. р. с. статора  $\nu$ -го порядку обертається зі швидкістю  $n_{1\nu} = \pm n_1/\nu$ . Тут знак «плюс» відноситься до м. р. с, що обертається в тому ж напрямку, що й основна гармонійна м. р. с, а знак «мінус» — до м. р. с., що обертається в зворотну сторону. Для стислості перші м. р. с. ми будемо називати прямими, а другі — зворотними.

Ковзання, що відповідає даній гармонійній, дорівнює:

$$s_\nu = \frac{\pm n_{1\nu} - n}{\pm n_{1\nu}} = 1 \pm \frac{n_1 - (n_1 - n)}{\frac{n_1}{\nu}} = 1 \pm (1 - s)\nu, \quad (3.1)$$

де  $s$  — ковзання ротора щодо основної гармонійної м. р. с., тобто основне ковзання.

Частота струму, що індукується в роторі потоком  $\nu$ -ї гармонійної м. р. с. статора, визначається за формулою:

$$f_{2\nu} = f_1 s_\nu = f_1 [1 \pm (1 - s)\nu]. \quad (3.2)$$

Тому що  $n_{1\nu} = \pm \frac{n_1}{\nu}$ , де  $\nu$ -та гармонійна м. р. с. ротора обертається щодо ротора зі швидкістю

$$n_{2\nu} = \pm \frac{n_1}{\nu} - n. \quad (3.3)$$

Отже, швидкість обертання  $\nu$ -ї гармонійної ротора в просторі дорівнює:

$$n_{2\nu} + n = \pm \frac{n_1}{\nu} - n + n = \pm \frac{n_1}{\nu}, \quad (3.4)$$

тобто дорівнює швидкості обертання  $\nu$ -ї гармонійної м. р. с. статора.

Дія паразитних асинхронних моментів залежить від напрямку обертання гармонійної м. р. с.

Розглянемо спочатку дію прямої гармонійної м. р. с.  $\nu$ -го порядку. Ми знаємо, що синхронна швидкість обертання такої гармонійної складає

$$n_{1\nu} = \frac{n_1}{\nu}. \text{ Це відповідає ковзанню}$$

$$s = \frac{n_1 - \frac{n_1}{\nu}}{n_1} = 1 - \frac{1}{\nu}.$$

У межах зміни ковзання від  $s=1$  до  $s=1-\frac{1}{\nu}$  ротор обертається з меншою швидкістю, ніж гармонійна, а в межах від  $s=1-\frac{1}{\nu}$  до  $s=0$  – з більшою швидкістю. У першій зоні  $\nu$ -та гармонійна м. р. с. створює обертовий момент, а в другій зоні – генераторний, і, отже, гальмуючий. Руховий момент гармонійної складається з основним моментом, а генераторний віднімається від нього. На рис. 3.8 крива 1 зображує основний момент, а крива 2 – момент гармонійної сьомого порядку.

Тепер розглянемо дію зворотних гармонійних м. р. с. Тому що при роботі двигуна ротор обертається в сторону, протилежну обертанню цих гармонійних, то стосовно них асинхронний двигун являє собою електромагнітне гальмо. Тому при всіх ковзаннях у межах від  $s=1$  до  $s=0$  зворотні гармонійні м. р. с. створюють гальмуючі моменти, як це показує крива 3 момента, створеного зворотною гармонійною п'ятого порядку. Але якщо ми будемо обертати ротор проти обертання основної м. р. с., тобто в погодженні зі зворотною гармонійною, то при ковзанні  $s=1+\frac{1}{\nu}$ , що відповідає синхронному обертанню ротора в потоці цієї гармонійної, її момент пройде через нуль, а потім – при  $s > 1+\frac{1}{\nu}$  набуде позитивних значень.

Склавши на рис. 3.1 ординати кривих 1, 2 і 5, одержимо криву 4 результуючого моменту двигуна. Ми бачимо, що вона має два провали – один при  $s = 1 - \frac{1}{7} = \frac{6}{7}$ , інший при  $s = 1 + \frac{1}{5} = 1,2$ . Особливо важливе значення має перший провал. Справді, якщо статичний момент  $M_{ст}$  виявиться більше мінімального обертаючого моменту  $M_{min}$ , то при розгоні двигун досягає точки  $a$ , але не пройде через провал кривої моменту, а отже, буде стійко працювати при швидкості, значно нижчій номінальній, споживаючи при цьому струм значно вищий номінального.

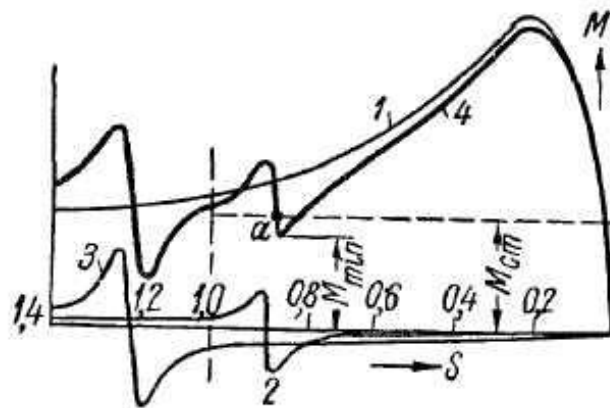


Рис. 3.1. Вплив асинхронних моментів вищих гармонійних м. р. с. статора на криву обертаючого моменту.

**Зубчасті гармонійні.** З числа гармонійних статора, що створюють асинхронні моменти, варто виділити зубчасті гармонійні, тобто гармонійні, що мають у загальному випадку порядок  $\nu_{31} = k \frac{Z_1}{p} \pm 1$ . Тут  $k$  – будь-яке ціле позитивне число. Зубчаста гармонійна при  $k = 1$  вважається основною, а інші вищими. Зубчастими гармонійними вищих порядків можна зневажити.

Переважне значення, що мають зубчасті гармонійні статора у відношенні створення паразитних асинхронних моментів, обумовлюється, головним чином, тим, що для зубчастих гармонійних коефіцієнт розподілу обмотки дорівнює коефіцієнтові розподілу першої гармонійної (

$$k_{p1} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}} - \text{для } m\text{-фазної обмотки } (m=3, \text{ фазна зона } 60^\circ), \text{ тоді як для}$$

гармонійної м. р. с. інших порядків він значно менше. Тим часом, як це показує більш докладний аналіз, величина паразитного асинхронного моменту залежить в основному від відношення  $\left( \frac{k_{OB \nu}}{k_{OB 1}} \right)^2$ , де  $k_{OB 1}$ ,  $k_{OB \nu}$  –

обмоточні коефіцієнти для першої і  $\nu$ -ї гармонійних. Таким чином, для зубчастих гармонійних зазначене вище відношення більше, ніж для інших гармонійних, чим і пояснюється переважне значення саме зубчастих гармонійних.

Дія зубчастих гармонійних статора і створювані ними моменти можуть бути в значній мірі обмежені відповідним підбором числа пазів ротора  $Z_2$ . Спеціальний аналіз показує, що для цього потрібно, щоб

$$Z_2 \leq 1,25 \cdot \left( \frac{Z_1}{p} \pm 1 \right) p \leq 1,25 \cdot (Z_1 \pm p), \quad (3.5)$$

де  $p$  – кількість пар полюсів.

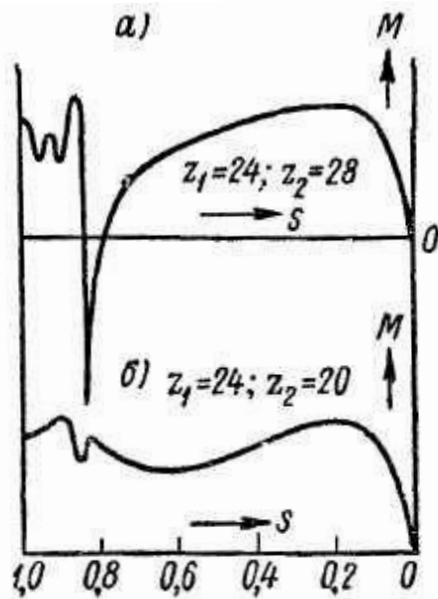


Рис. 3.2. Криві моментів при  $2p = 4$ :

- а)  $Z_1 = 24, Z_2 = 28$ ;  
б)  $Z_1 = 24, Z_2 = 20$ .

**Синхронні моменти.** У загальному випадку під синхронним моментом розуміють момент, що з'являється при визначеній швидкості обертання ротора в результаті взаємодії гармонійних статора і ротора того самого порядку, тобто при  $\nu_1 = \nu_2$  і при такій швидкості обертання ротора, коли ці гармонійні обертаються синхронно. Зокрема, переважне значення мають синхронні моменти, що виникають при наявності зубчастих гармонійних статора

і ротора однакового порядку, тобто при

$$\nu_{31} = \nu_{32}. \quad (3.6)$$

Вважаючи  $k_3 = 1$  (див. попередній пункт), маємо:

$$\frac{Z_1 \pm 1}{p} = \frac{Z_2 \pm 1}{p}.$$

Отже, синхронні моменти мають місце при

$$Z_1 = Z_2; \quad Z_1 - Z_2 = \pm 2p. \quad (3.7)$$

Цих співвідношень між числами пазів статора і ротора варто уникати. Утім, випадок, коли  $Z_1 = Z_2$  практично не зустрічається, тому що виникаюче при цьому прилипання при нерухомому роторі було давно відоме.

Для ілюстрації на рис. 3.2, а і б показані криві моментів чотириполюсного двигуна з числом пазів  $Z_1 = 24$  і  $Z_2 = 24 \pm 4 = 28$  або 20.

**Вібраційні моменти.** При обертанні ротора його зубці безупинно переміщаються щодо зубців статора; унаслідок цього відбуваються періодичні зміни магнітної індукції в зубцях статора і ротора, що викликають різного роду звукові явища – гудіння, свист тощо. Крім того, при збігові осей

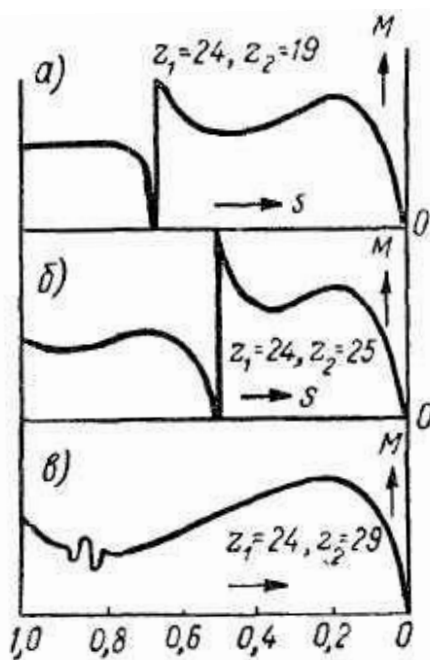


Рис. 3.3. Вібраційні моменти при  $2p = 4$ :  $Z_1 = 24$ ,  $Z_2 = 24+1$  и  $Z_2 = 24 \pm (1+4)$ .

зубців статора і ротора виникає в даній точці по окружності статора сила однобічного притягання між статором і ротором. При обертанні ротора ця сила переміщається в зазорі з визначеною швидкістю, викликаючи вібрації ротора. При визначеній швидкості обертання ротора ці вібрації можуть почати резонувати з власними (механічними) коливаннями ротора. Якщо це явище одержує значний розвиток, то воно може зробити роботу двигуна неможливою. Аналіз показує, що вібраційні моменти виникають за умови, якщо

$$Z_1 - Z_2 = \pm 1 \pm 2p. \quad (3.8)$$

Деякі дослідження показують, що небажані і такі співвідношення між числами пазів, при яких

$$0,5 \cdot (Z_1 - Z_2) = \pm 1 \pm 2p,$$

або

$$Z_1 - Z_2 = \pm 2 \pm 4p. \quad (3.9)$$

Тому що  $Z_1 = 2pm_1q_1$  (де  $m$  – кількість фаз обмотки), то при  $q_1 =$  ціле число, величина  $Z_1$  є парне число. У цьому випадку умова (3.9) приводить до висновку, що непарні числа пазів ротора є небажаними, що і було підтверджено експериментально.

Для ілюстрації на рис. 3.3, а, б, у показані криві моментів при  $Z_1 = 24$ ;  $Z_2 = 24 + 1$ ;  $Z_2 = 24 \pm (1 + 4)$  при  $2p = 4$ .

Розглянемо основні характеристики асинхронних двигунів.

**Робочі характеристики асинхронного двигуна.** Під робочими характеристиками асинхронного двигуна ми розуміємо:

$$n, M, \eta \text{ і } \cos \varphi = f(P_2) \text{ при } U_1 = \text{const і } f_1 = \text{const.}$$

Крім того, до важливих показників відноситься коефіцієнт перевантажувальної здатності  $k_M$ , а для короткозамкнутих двигунів — також кратності пускового струму і пускового моменту.

**а) Швидкість обертання двигуна  $n = f(P_2)$ .** З формули для ковзання  $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$  ( $n$  – швидкість обертання ротора;  $n_1$  – швидкість обертового магнітного поля) випливає, що

$$n = n_1(1 - s). \quad (3.10)$$

З іншого боку, відповідно до формули  $p_{M2} = sP_{EM}$  ( $p_{M2}$  – втрати в міді вторинного ланцюга (електрична потужність);  $P_{EM}$  – електромагнітна потужність) одержимо

$$s = \frac{P_{M2}}{P_{EM}}. \quad (3.11)$$

Таким чином, ковзання асинхронного двигуна чисельно дорівнює відношенню втрат в обмотці ротора  $p_{M2}$  до електромагнітної потужності, що  $P_{EM}$  розвивається двигуном.

При холостому ході втрати  $p_{M2}$  зникають малі в порівнянні з потужністю  $P_{EM}$ ; тому тут  $s \approx 0$  і  $n \approx n_1$ . В міру збільшення навантаження відношення (3.11) росте, але з розумінням високого к. к. д. двигуна воно обмежено досить вузькими межами. Звичайно при номінальному навантаженні  $\frac{P_{M2}}{P_{EM}} \approx \frac{P_{M2}}{P_2} = 1,5 \div 5 \%$ . ( $P_2$  – корисна потужність, що віддається двигуном) Менша цифра відноситься до двигунів більшої потужності, велика – до двигунів малої потужності, порядку 3-10 кВт. Залежність  $n = f(P_2)$  являє собою криву, досить слабо похилу до осі абсцис (рис. 3.4). Ми бачимо, що асинхронний двигун має швидкісну характеристику типу двигуна постійного струму паралельного збудження.

**б) Залежність  $M = f(P_2)$ .** При сталому режимі роботи  $M = M_2 + M_0$ , де  $M_2$  – корисний гальмовий момент двигуна, а  $M_0$  – момент холостого ходу. Тому що при зміні навантаження в межах від холостого ходу до номінального швидкість обертання асинхронних двигунів залишається майже постійною, то залежність  $M = f(P_2)$  асинхронного двигуна майже прямолінійна (рис. 3.11).

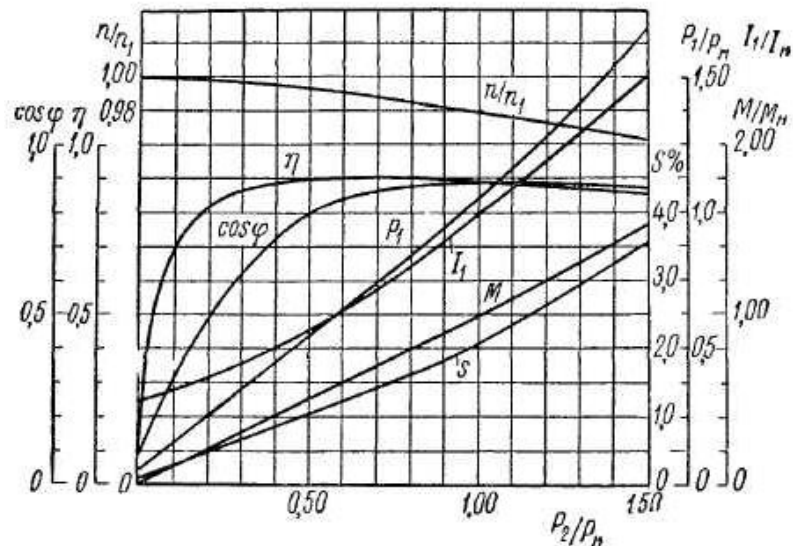


Рис. 3.4. Робочі характеристики короткозамкнутого асинхронного двигуна потужністю 50 кВт, 220/380 В, 1470 об/хв, побудовані у відносних одиницях.

**в) Втрати і к. к. д. двигуна.** В асинхронних двигунах мають місце всі ті ж види втрат, що й в інших електричних машинах – механічні втрати, втрати в сталі, втрати в міді і додаткові втрати.

Особливу групу втрат складають додаткові втрати. Вони складаються з: а) додаткових втрат у міді і б) додаткових втрат у сталі. При синусоїдальній напрузі на затисках двигуна додаткові втрати в міді виникають частково під впливом вищих гармонійних м. р. с, частково внаслідок ефекту витиснення струму.

Додаткові втрати в міді від вищих гармонійних м. р. с. мають місце, головним чином, в обмотках ротора з білячою кліткою. При обертанні ротора в магнітних полях, створюваних вищими гармонійними м. р. с. статора, в обмотці ротора виникають струми, що мають частоту, відмінну від частоти ковзання і залежну від швидкості обертання ротора. Для зменшення цих втрат роблять: а) укорочення кроку обмотки статора, що веде до зменшення вищих гармонійних м. р. с, б) скіс пазів ротора щодо пазів статора, що грає ту ж роль, що й укорочення кроку і в) відповідний підбір числа пазів на статорі і роторі  $Z_1$  і  $Z_2$ . Аналіз показує, що додаткові втрати в роторі не повинні

перевищувати 10% від основних втрат, викликаних першою гармонійною струму, то при нескоснених пазах  $Z_2 \leq \frac{4}{3} Z_1$ .

Явище витиснення струму спостерігається як в обмотках статора, так і в обмотках ротора, особливо з білячою кліткою. Тут воно може бути використане для поліпшення пускових характеристик двигунів з короткозамкнутим ротором. Але в умовах нормальної роботи частота струму в роторі звичайно не перевищує 3 Гц. У цих умовах витиснення струму практично непомітно.

Оскільки додаткові втрати від вищих гармонійних м. р. с. створюються струмами, що мають частоту, відмінну від частоти першої гармонійної струму, вони компенсуються механічною потужністю, що розвивається двигуном.

Можна вважати з достатньою точністю, що додаткові втрати в міді змінюються пропорційно квадратові струму.

Додаткові втрати в сталі асинхронних машин складаються з:

- а) пульсаційних втрат;
- б) поверхневих втрат.

Пульсаційні втрати викликаються подовжніми пульсаціями магнітного потоку внаслідок зміни магнітної провідності, обумовленого безперервною зміною взаємного положення зубців статора і ротора при обертанні останнього. Частота пульсації в статорі  $f_{31} = Z_2 n$ , а частота пульсацій у роторі  $f_{32} = Z_1 n$ , де  $Z_1$  і  $Z_2$  – числа пазів статора і ротора і  $n$  – швидкість обертання ротора. Розрахунок цих втрат складає предмет спеціального курсу.

Поверхневі втрати обумовлюються головним чином тим, що під впливом пазів у кривій розподілу індукції в зазорі з'являються провали (рис. 3.5). Частота поверхневих пульсацій та ж, що і пульсації в зубцях. Аналіз показує, що поверхневі втрати залежать від частоти в ступені 1,5 і квадрата середнього значення індукції в зазорі.

Тому що додаткові втрати в сталі мають частоту, відмінну від основної, то вони покриваються за рахунок механічної потужності, що розвивається двигуном.

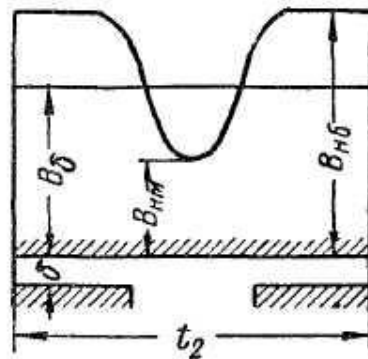


Рис. 3.5. Крива індукції в повітряному проміжку

Можна вважати з достатньою точністю, що додаткові втрати в сталі змінюються пропорційно квадратові підведеної до двигуна напруги.

Ступінь точності, з яким розраховуються додаткові втрати, відносно невисокий. Тому звичайно вони враховуються приблизно, у визначеному відсотку від корисної потужності при роботі машини генератором або від подводимой потужності при роботі машини двигуном. Відповідно до прийнятих стандартів додаткові втрати  $p_d$  в асинхронних машинах при номінальному навантаженні складають 0,5% від підведеної потужності. Потрібно, однак, пам'ятати, що це – середня цифра, встановлена дослідним шляхом, від якої в ряді випадків спостерігаються помітні відхилення. Повні втрати в двигуні рівні:

$$\sum p = p_{M1} + p_{M2} + p_C + p_{MX} + p_d. \quad (3.12)$$

При навантаженнях у межах від холостого ходу до номінального під  $p_C$  варто розуміти тільки втрати в сталі статора, тому що при звичайних частотах у роторі (1–3 Гц) втрати в його сталі зникають малі.

При збільшенні навантаження сума втрат  $p_C + p_{MX}$  трохи зменшується внаслідок, з одного боку, зменшення основного потоку, а з іншого боку,

зменшення швидкості обертання. Звичайно це зменшення не перевищує 4–3%, тому і ці втрати відносять до постійних втрат двигуна.

На противагу втратам у сталі, втрати в міді змінюються пропорційно квадратові струму.

Додаткові втрати, як ми бачили, залежать частиною від струму, частиною від напруги. Для простоти вважають, що вони змінюються пропорційно підведеній потужності.

Міркуючи так само, як і у випадку машин постійного струму, одержуємо, що максимум к. к. д. досягається при рівності постійних і змінних втрат; таким чином, відповідно перерозподіляючи втрати, ми можемо одержати двигуни з різною формою кривих к. к. д. На рис. 3.5 показана типова крива к. к. д. асинхронного двигуна, що досягає максимуму приблизно при 75% номінального навантаження.

**г) Коефіцієнт потужності  $\cos \varphi = f(P_2)$ .** Асинхронний двигун, так само як і трансформатор, споживає з мережі відстаючий струм, що майже не залежить від навантаження. Тому його  $\cos \varphi$  завжди менше одиниці. При холостому ході  $\cos \varphi$  звичайно не перевищує 0,2, але потім при навантаженні він досить швидко росте (рис. 3.5) і досягає максимуму при потужності, близькій до номінальної.

Двигуни з короткозамкнутим ротором великої потужності виконуються як двигуни з глибоким пазом або двокліткові, і їх  $\cos \varphi$  трохи нижчий, ніж у двигунів з кільцями такої ж потужності.

**д) Перевантажувальна здатність двигуна.** Перевантажувальною здатністю асинхронного двигуна або, інакше, його перекидаючим моментом називається відношення максимального моменту двигуна до його номінального моменту, тобто

$$k_M = \frac{M_{MAX}}{M_H}.$$

Звичайно в двигунах малої і середньої потужності  $k_M = 1,6 \div 1,8$ . У двигунах середньої і великої потужності  $k_M = 1,8 \div 2,5$ , у двигунах спеціального виконання  $k_M$  досягає 2,8—3,0 і більш.

**Робота асинхронної електричної машини в режимі електромагнітного гальма.** Приведемо залежність обертового моменту асинхронного двигуна від ковзання, коли  $s < 0$  і  $s > 1$  (рис. 3.6).

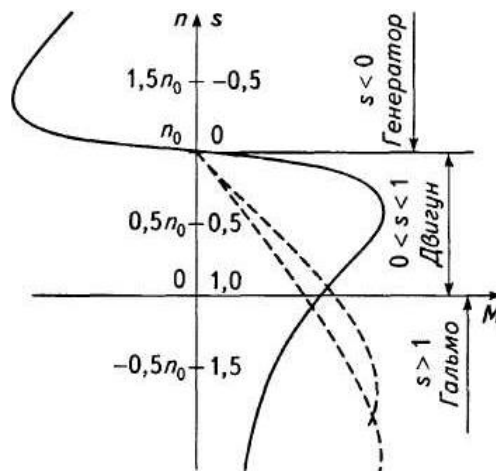


Рис. 3.6. Механічні характеристики асинхронної машини, що працює в режимах двигуна, гальма й генератора

Розглянемо роботу машини при  $s > 1$ . У цьому разі ротор обертається назустріч обертовому полю (рис. 3.7, а). При цьому обертовий момент, що, як і у випадку роботи машини як двигуна, напрямлений у бік обертання поля, тут діє в напрямі, протилежному напрямові обертання ротора; ротор гальмується, і машина працює в режимі електромагнітного гальма.

Це практично можливо, наприклад, у підйомнику при спусканні вантажу, якщо момент від вантажу  $G$  змушує ротор двигуна обертатися в напрямі, протилежному напрямові обертання поля.

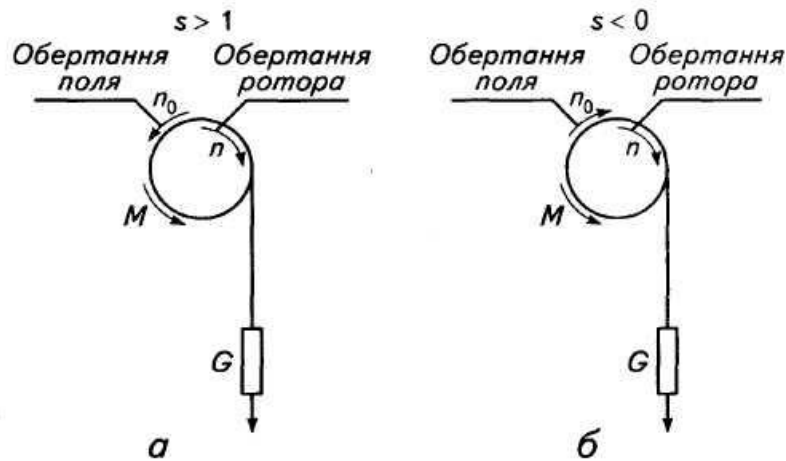


Рис. 3.7. Напрямок обертового моменту в разі роботи асинхронної машини в режимах електромагнітного гальма (а) й генератора (б)

У гальмівному режимі в коло фазного ротора вводиться додатковий активний опір, щоб дістати одну з механічних характеристик, показаних на рис. 3.6 штриховими лініями. Як видно з рисунка, на цих характеристиках можлива усталена робота машини при  $s > 1$ . Робота машини як гальма можлива й в іншому випадку, коли машина, що працює як двигун, вимикається й одразу вмикається в зворотному напрямі. При цьому двигун унаслідок власної інерції та інерції зв'язаних з ним обертових частин якийсь час продовжує обертатися в початковому напрямі, що після перемикання є обертанням проти напрямку обертання магнітного поля, коли  $s > 1$ .

Робота машини за від'ємного ковзання ( $s < 0$ ) можлива за умови, що її ротор обертається примусово в напрямі обертання магнітного поля з частотою  $n > 0$ ; тоді

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} < 0.$$

Оскільки ротор обертається швидше за поле, то напрям, в якому лінії магнітного поля перетинають провідники ротора, змінюється на зворотний порівняно з випадком, коли машина працює як двигун. Внаслідок цього напрями ЕРС і струмів ротора також змінюються на зворотні. Зміна напрямку струмів ротора спричиняє зміну знака обертового моменту, що діє проти напрямку обертання ротора (рис. 3.7, б). Зміна знака моменту й напрямку

струму ротора, а отже, й напряду відповідної складової струму статора означає перехід машини в генераторний режим роботи, коли механічна енергія, що надходить зовні на вал ротора, перетворюється в машині на електричну енергію й віддається в мережу (за винятком втрат у машині).

### **3.2. Методика математичного моделювання електродвигуна**

Для дослідження роботи складової частини системи вимірювання пускового моменту – асинхронного короткозамкнутого двигуна, скористаємось його математичним описом.

В основі математичного опису АД при змінній частоті мережі живлення лежить загальна теорія електричних машин.

Основою для математичного опису АД служать рівняння, складені у фазових координатах. Особливістю АД є сукупність магнітопов'язаних ланцюгів з коефіцієнтами само- і взаємоіндукції, що періодично змінюються у функції кута повороту ротора щодо статора. У залежності від ступеня насичення магнітної системи машини, ці коефіцієнти можуть залежати ще і від струмів у всіх обмотках. Рівняння можуть бути складені або в трифазній системі координат, або в двофазній для узагальненої машини. При записі рівнянь у фазових координатах одержують систему диференціальних рівнянь високого порядку ( у трифазній системі координат число рівнянь дорівнює 14) зі змінними коефіцієнтами. Користуватися такою системою для дослідження електромеханічних процесів, що відбуваються в АД не є можливим у зв'язку з громіздкістю, наявністю змінних коефіцієнтів, нелінійністю. Подальше спрощення і перетворення вихідної системи рівнянь ґрунтується на наступному загальному методі. При цьому рівняння у фазових координатах перетворюються до рівнянь, виражених через узагальнені (результуючі) вектори, вводиться система відносних одиниць для струмів, напруг, потокозчеплень, швидкостей обертання, частот, моментів, активних, індуктивних опорів. Введення системи відносних одиниць спрощує вид

рівнянь, а вираження змінних через результуючі вектори приводить до виду диференціальних рівнянь, при якому коефіцієнти диференціальних рівнянь ненасиченої машини є постійними величинами. Для насиченої машини необхідно вводити залежність величин цих коефіцієнтів від магнітного стану машини.

Після зазначених перетворень одержують систему диференціальних рівнянь шостого порядку з постійними коефіцієнтами, що значно спрощує опис АД й уможливорює використання цієї системи для дослідження електромеханічних процесів, що протікають у АД. Подальше перетворення отриманої системи рівнянь зводиться до переведення векторів, що входять у рівняння, у різні системи координат (в залежності від мети розв'язуваної задачі).

При математичному описі АД прийнято ряд допущень, що відповідають ідеалізованому представленню АД:

- фазні обмотки симетричні, однакові, повітряний зазор по всьому колу ротора однаковий;
- не враховуються втрати в сталі, а також вищі гармоніки магніторушійної сили і робочого потоку;
- параметри АД постійні і не залежать від струмів в обмотках АД;
- системи живильних струмів (напруг) симетричні.

Система рівнянь для ідеалізованого трифазного короткозамкнутого АД в системі координат, що обертається з довільною швидкістю  $\omega_k$  з використанням системи відносних одиниць, має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_s &= \bar{I}_r \cdot r_s + p \cdot \bar{\Psi}_s + j \cdot \omega_k \cdot \bar{\Psi}_s \\ 0 &= \bar{I}_r \cdot r_r + p \cdot \bar{\Psi}_r + j \cdot (\omega_k - \omega) \cdot \bar{\Psi}_r \\ \bar{\Psi}_s &= \bar{I}_s \cdot (L_m + l_{\sigma s}) + \bar{I}_r \cdot L_m \\ \bar{\Psi}_r &= \bar{I}_r \cdot (L_m + l_{\sigma r}) + \bar{I}_s \cdot L_m \\ \mu &= L_m / L_r \cdot I_m \cdot [\bar{\Psi}_r^* \times \bar{I}_s] \\ \mu - \mu_c &= H \cdot p \cdot \omega \end{aligned} \right\},$$

де  $\overline{U}_s, \overline{I}_s, \overline{\Psi}_s$  – узагальнені вектори, відповідно, напруги, струму, потокозчіплення статора;

$\overline{I}_k, \overline{\Psi}_r$  – узагальнені вектори, відповідно, струму і потокозчіплення ротора;

$r_s, r_r$  – активні опори, відповідно, статора і ротора;

$L_m$  – взаємна індуктивність статора і ротора;

$l_{\sigma s}, l_{\sigma r}$  – індуктивність розсіювання, відповідно, статора і ротора;

$\mu, \mu_c$  – відповідно, електромагнітний момент і момент опору на валу АД;

$H$  – момент інерції ротора АД;

$\omega$  – кутова швидкість обертання ротора АД;

$p$  – символ диференціювання за часом.

Усталеному режимові роботи АД (усі похідні у формулі дорівнюють нулю) системи відповідає Т-подібна схема заміщення АД.

При математичному описі АД прийнята система відносних одиниць, базові значення якої визначаються системою:

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 I_{\sigma} = \sqrt{2} \cdot I, & \text{- базовий струм;} \\
 U_{\delta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_H & \text{- базова напруга;} \\
 \omega_{\delta p} = 2 \cdot \pi \cdot f / z & \text{- базова швидкість;} \\
 \omega_{\delta} & \text{- базова частота;} \\
 T_{\delta} & \text{- базовий час;} \\
 M_{\delta} = \frac{I \cdot U \cdot z \cdot \sqrt{3}}{\omega_{\delta}} & \text{- базовий момент;} \\
 L_{\delta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{U}{\omega_{\delta}} & \text{- базова індуктивність;} \\
 \Psi_{\delta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{U}{\omega_{\delta}} & \text{- базове потокозчеплення;} \\
 R_{\delta} = \frac{U_{\delta}}{I_{\delta}} & \text{- базовий опір;} \\
 H_{\delta} = M_{\delta} \cdot z / \omega_{\delta}^2 & \text{- базовий момент інерції.}
 \end{array} \right.$$

### 3.3. Побудова математичної моделі двигуна

Як вже зазначалось, асинхронна машина являє собою систему, як мінімум двох обмоток, одна з яких розташована на нерухомій частині (статорі), інша на обертовій частині (роторі) машини. Момент машини утвориться в результаті взаємодії струмів у цих обмотках. Трифазна обмотка статора підключається до мережі живлення, трифазна обмотка ротора замкнута. Обмотки статора і ротора магнітозв'язані, тому потокозчеплення обмотки статора визначається як струмами, що протікають по трьох фазах обмотки статора, так і струмами фаз ротора. Це ж відноситься і до обмотки ротора. Таким чином, маємо дві трифазні обмотки, що обертаються одна щодо іншої. Якщо до обмотки статора прикладена трифазна напруга, а обмотка ротора замкнута, то миттєві значення фазних напруг статора і ротора задаються наступними рівняннями:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1A} = I_{1A} R_1 + \frac{d\Psi_{1A}}{dt}, \\ U_{1B} = I_{1B} R_1 + \frac{d\Psi_{1B}}{dt}, \\ U_{1C} = I_{1C} R_1 + \frac{d\Psi_{1C}}{dt}, \\ 0 = I_{2a} R_2 + \frac{d\Psi_{2a}}{dt}, \\ 0 = I_{2b} R_2 + \frac{d\Psi_{2b}}{dt}, \\ 0 = I_{2c} R_2 + \frac{d\Psi_{2c}}{dt}. \end{array} \right. \quad (3.13)$$

Виходячи з теорії результуючого вектора помножимо перше і четверте рівняння системи (3.13) на  $\frac{2}{3} \cdot \bar{1}$ , друге і п'яте на  $\frac{2}{3} \cdot \bar{a} = \frac{2}{3} \cdot e^{j120^\circ}$ , третє і шосте на  $\frac{2}{3} \cdot \bar{a}^2 = \frac{2}{3} \cdot e^{j240^\circ}$ . Підсумовуючи отримані добутки, одержимо:

$$\frac{2}{3}(\bar{1} U_{1A} + \bar{a} U_{1B} + \bar{a}^2 U_{1C}) = \frac{2}{3}(\bar{1} I_{1A} + \bar{a} I_{1B} + \bar{a}^2 I_{1C}) R_1 + \frac{2d}{3dt}(\bar{1} \Psi_{1A} + \bar{a} \Psi_{1B} + \bar{a}^2 \Psi_{1C}),$$

$$0 = \frac{2}{3}(\bar{1} I_{2a} + \bar{a} I_{2b} + \bar{a}^2 I_{2c}) R_2 + \frac{2d}{3dt}(\bar{1} \Psi_{2a} + \bar{a} \Psi_{2b} + \bar{a}^2 \Psi_{2c}),$$

або

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 = I_1 R_1 + \frac{d\Psi_1}{dt}, \\ 0 = I_2 R_2 + \frac{d\Psi_2}{dt}, \end{array} \right. \quad (3.14)$$

де потокозчеплення  $\Psi_1$  (статора) і  $\Psi_2$  (ротора) залежать від струмів ротора і статора, а також від індуктивностей обмоток машини.

Визначимо величини потокозчеплень статора і ротора. Припустимо, що статор і ротор трифазного асинхронного двигуна мають симетричні обмотки, повітряний зазор по всій окружності ротора однаковий, магнітне поле в

повітряному зазорі розподілено синусоїдально, осі обмоток статора і ротора не збігаються, утворюючи довільний кут  $\varphi$  (рис. 3.8).

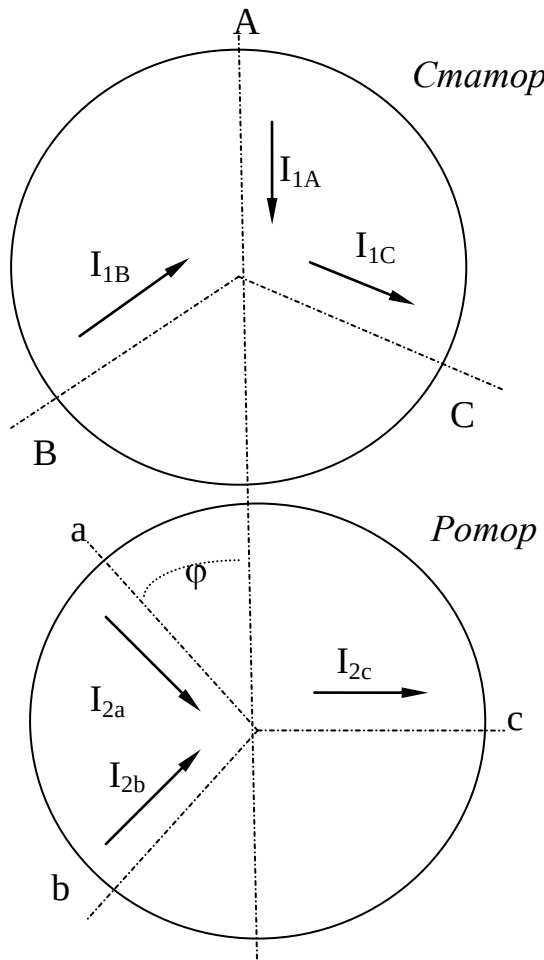


Рис. 3.8. Взаємне розташування статора і ротора

Установлюємо величину повного магнітного потоку, зчепленого зі статорною обмоткою фази А. Для цього враховуємо магнітні поля, створені фазними струмами  $I_{1A}$ ,  $I_{1B}$ ,  $I_{1C}$ . Приймаємо, що індуктивності фазних обмоток статора однакові і рівні  $l_1$ , взаємні індуктивності фаз А–В, А–С і В–С також однакові і рівні  $l_0$  (за умовами симетрії асинхронної машини). Тоді загальний магнітний потік, зчеплений зі статорною обмоткою фази А виразиться в такий спосіб:

$$\Psi_{1A} = I_{1A}l_1 + I_{1B}l_0 + I_{1C}l_0.$$

Підставивши замість  $I_{1C}$  величину  $(-I_{1A} - I_{1B})$  (тому що сума фазних струмів асинхронного двигуна дорівнює нулеві), одержимо:

$$\Psi_{1A} = I_{1A}l_1 + I_{1B}l_0 - I_{1A}l_0 - I_{1B}l_0 = I_{1A}(l_1 - l_0).$$

Проробивши аналогічні операції з фазами В і С, запишемо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \Psi_{1A} = I_{1A}(l_1 - l_0), \\ \Psi_{1B} = I_{1B}(l_1 - l_0), \\ \Psi_{1C} = I_{1C}(l_1 - l_0). \end{cases} \quad (3.15)$$

Зазначим, що індуктивність фазної обмотки статора містить у собі індуктивності від полів розсіювання і від головного потоку, тобто

$$l_1 = l_{1l} + l_{10} . \quad (3.16)$$

Тому що, у загальному випадку, взаємна індуктивність двох обмоток зі зміщеними на деякий кут осями дорівнює добуткові взаємної індуктивності, що мала б місце при збігу осей обмоток, на косинус кута між осями, то взаємну індуктивність можна виразити співвідношенням:

$$l_0 = l_{10} \cdot \cos(120^\circ) = -\frac{l_{10}}{2} . \quad (3.17)$$

З огляду на вирази (3.16) і (3.17), перетворимо систему рівнянь (3.15) до наступного виду:

$$\begin{cases} \Psi_{1A} = I_{1A}(l_{1l} + l_{10} + \frac{l_{10}}{2}) = I_{1A}(l_{1l} + \frac{3}{2}l_{10}) = I_{1A} \cdot L_1, \\ \Psi_{1B} = I_{1B}(l_{1l} + l_{10} + \frac{l_{10}}{2}) = I_{1B}(l_{1l} + \frac{3}{2}l_{10}) = I_{1B} \cdot L_1, \\ \Psi_{1C} = I_{1C}(l_{1l} + l_{10} + \frac{l_{10}}{2}) = I_{1C}(l_{1l} + \frac{3}{2}l_{10}) = I_{1C} \cdot L_1, \end{cases} \quad (3.18)$$

де  $L_1 = l_{1l} + 1,5l_{10} = l_{1l} + L_0$  - повна індуктивність фази статора.

Міркуючи аналогічним чином щодо обмотки ротора, одержимо наступні вирази для фазних потокозчеплень роторної обмотки з власним потоком:

$$\begin{cases} \Psi_{2a} = I_{2a} \cdot L_2, \\ \Psi_{2b} = I_{2b} \cdot L_2, \\ \Psi_{2c} = I_{2c} \cdot L_2, \end{cases} \quad (3.19)$$

де  $L_2 = l_{12} + L_0$  - повна індуктивність фази ротора.

Визначаємо величину загального потокозчеплення фази А статора, створеного силами статора, що намагнічують, і ротора, виходячи з рис. 3.8 і (3.19):

$$\begin{aligned} \Psi_{1A} = & I_{1A}L_1 + I_{2a}l_{12}\cos(\varphi + 120^\circ) + I_{2c}l_{12}\cos(\varphi + 240^\circ) = I_{1A}L_1 + I_{2a}l_{12}\cos(\varphi) - \\ & - \frac{1}{2}I_{2b}l_{12}\cos(\varphi) - \frac{\sqrt{3}}{2}I_{2b}l_{12}\sin(\varphi) - \frac{1}{2}I_{2c}l_{12}\cos(\varphi) + \frac{\sqrt{3}}{2}I_{2b}l_{12}\sin(\varphi) = I_{1A}L_2 + \\ & + l_{12}\cos(\varphi)(I_{2a} - \frac{1}{2}I_{2b} - \frac{1}{2}I_{2c}) + \frac{\sqrt{3}}{2}l_{12}\sin(\varphi)(I_{2c} - I_{2b}), \end{aligned}$$

або, враховуючи що  $I_{2a} + I_{2b} + I_{2c} = 0$  і  $\frac{3}{2}l_{12} = L_0$ :

$$\Psi_{1A} = I_{1A}L_1 + I_{2A}L_0\cos(\varphi) + \frac{\sqrt{3}}{2}l_{12}\sin(\varphi)(I_{2c} - I_{2b})$$

Виразивши аналогічним чином потокозчеплення для фаз статора  $B$  і  $C$ , запишемо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \Psi_{1A} = I_{1A}L_1 + I_{2A}L_0\cos(\varphi) + \frac{\sqrt{3}}{2}l_{12}\sin(\varphi)(I_{2c} - I_{2b}), \\ \Psi_{1B} = I_{1B}L_1 + I_{2B}L_0\cos(\varphi) + \frac{\sqrt{3}}{2}l_{12}\sin(\varphi)(I_{2a} - I_{2c}), \\ \Psi_{1C} = I_{1C}L_1 + I_{2C}L_0\cos(\varphi) + \frac{\sqrt{3}}{2}l_{12}\sin(\varphi)(I_{2b} - I_{2a}). \end{cases} \quad (3.20)$$

Враховуючи що  $\frac{3}{2}l_{12} = L_0$  і  $e^{j\varphi} = \cos(\varphi) + j \cdot \sin(\varphi)$ , помножимо перше

рівняння системи (3.65) на  $\frac{2}{3} \cdot \bar{1}$ , друге на  $\frac{2}{3} \cdot \bar{a} = \frac{2}{3} \cdot e^{j120^\circ}$ , третє на

$\frac{2}{3} \cdot \bar{a}^2 = \frac{2}{3} \cdot e^{j240^\circ}$  ( $a$  -оператор (множник) трифазної системи), і просумуємо

отримані добутки:

$$\begin{aligned} & \frac{2}{3}(\Psi_{1A} \bar{1} + \Psi_{1B} e^{j120^\circ} + \Psi_{1C} e^{j240^\circ}) = \frac{2}{3}L_1(I_{1A} \bar{1} + I_{1B} e^{j120^\circ} + I_{1C} e^{j240^\circ}) + \\ & + \frac{2}{3}L_0\cos(\varphi)(I_{2a} \bar{1} + I_{2b} e^{j120^\circ} + I_{2c} e^{j240^\circ}) + \frac{1}{\sqrt{3}}l_{12}\sin(\varphi)[(I_{2a} - I_{2b})\bar{1} + \\ & + (I_{2a} - I_{2c})e^{j120^\circ} + (I_{2b} - I_{2a})e^{j240^\circ}] = I_1L_1 + I_2L_0\cos(\varphi) + \\ & + \frac{1}{\sqrt{3}}l_{12}\sin(\varphi)\{I_{2c} - I_{2b} + (I_{2a} - I_{2c}) \cdot [\cos(120^\circ) + j \cdot \sin(120^\circ)] + \\ & + (I_{2b} - I_{2a}) \cdot [\cos(240^\circ) + j \cdot \sin(240^\circ)]\} = I_1L_1 + I_2L_0\cos(\varphi) + \\ & + \frac{1}{\sqrt{3}}l_{12}\sin(\varphi) \cdot [I_{2c} - I_{2b} + (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}) \cdot (I_{2a} - I_{2c}) + \\ & + (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}) \cdot (I_{2b} - I_{2a})] = I_1L_1 + I_2L_0\cos(\varphi) + L_0\sin(\varphi) \times \\ & \times \{j \cdot I_{2a} + jI_{2b}[\cos(120^\circ) + j \cdot \sin(120^\circ)] + j \cdot I_{2c}[\cos(120^\circ) + j \cdot \sin(120^\circ)]\} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= I_1 L_1 + I_2 L_0 \cos(\varphi) + L_0 \sin(\varphi) \cdot (I_{2a} \bar{1} + I_{2b} e^{j120^\circ} + I_{2c} e^{j240^\circ}) = \\
&= I_1 L_1 + I_2 L_0 \cos(\varphi) + j \cdot I_2 L_0 \sin(\varphi) = I_1 L_1 + I_2 L_0 e^{j\varphi},
\end{aligned}$$

або

$$\Psi_1 = I_1 L_1 + I_2 L_0 e^{j\varphi}. \quad (3.21)$$

У такий же спосіб одержимо формулу потокозчіплення ротора:

$$\Psi_2 = I_1 L_0 e^{-j\varphi} + I_2 L_2. \quad (3.22)$$

Об'єднавши рівняння (3.14), (3.21) і (3.22), одержимо систему рівнянь узагальненого асинхронного двигуна:

$$\begin{cases} U_1 = I_1 R_1 + \frac{d\Psi_1}{dt}, \\ 0 = I_2 R_2 + \frac{d\Psi_2}{dt}, \\ \Psi_1 = I_1 L_1 + I_2 L_0 e^{j\varphi}, \\ \Psi_2 = I_1 L_0 e^{-j\varphi} + I_2 L_2, \end{cases} \quad (3.23)$$

де  $L_0$  – взаємна індуктивність обмоток статора і ротора;  $L_1$  – індуктивність статора від потоків розсіювання;  $L_2$  – індуктивність ротора від потоків розсіювання.

Система рівнянь асинхронної машини (3.23) непридатна для математичного моделювання на ЕОМ, тому що вектори, що відносяться до статора і ротора, записані в різних системах координат.

Приведемо систему (3.23) до системи координат, нерухомої відносно поля статора, що обертається з кутовою швидкістю  $\omega_0$ . Тому що система координат поля статора повернена на кут  $(\omega_0 t)$  щодо системи координат статора і на кут  $(\omega_0 t - \varphi)$ , щодо системи координат ротора, де  $\varphi = \int_0^t \omega_2 dt$  – кут між системами координат нерухомо зв'язаними зі статором і ротором, що обертається з кутовою швидкістю  $\omega_2$ , то для переходу в систему координат поля статора множимо всі складові першого і третього рівнянь системи (3.23) на  $e^{-j\omega_0 t}$ , а складові другого і четвертого рівнянь системи (3.23) на  $e^{-j(\omega_0 t - \varphi)}$ ,

попередньо представивши вектор потокозчіплення статора як  $\Psi_1 = \Psi_{10} e^{j\omega_0 t}$  і вектор потокозчіплення ротора як  $\Psi_2 = \Psi_{20} e^{j\omega_0 t}$ , де  $\Psi_{10}$  і  $\Psi_{20}$  – вектори потокозчіплення статора і ротора в системі координат поля статора:

$$\begin{cases} U_1 e^{-j\omega_0 t} = I_1 R_1 e^{-j\omega_0 t} + \frac{d}{dt}(\Psi_{10} e^{j\omega_0 t}) e^{-j\omega_0 t}, \\ 0 = I_2 R_2 e^{-j(\omega_0 t - \varphi)} + \frac{d}{dt}(\Psi_{20} e^{j(\omega_0 t - \varphi)}) e^{-j(\omega_0 t - \varphi)}, \\ \Psi_1 e^{-j\omega_0 t} = I_1 L_1 e^{-j\omega_0 t} + I_{21} e^{-j\varphi} L_0 e^{j\varphi} e^{-j\omega_0 t}, \\ \Psi_2 e^{-j(\omega_0 t - \varphi)} = I_1 L_0 e^{-j\varphi} e^{-j(\omega_0 t - \varphi)} + I_2 L_2 e^{-j(\omega_0 t - \varphi)}, \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} U_{10} = I_{10} R_1 + \frac{d\Psi_{10}}{dt} + j \cdot \omega_0 \Psi_{10}, \\ 0 = I_{20} R_2 + \frac{d\Psi_{20}}{dt} + j(\omega_0 - \frac{d\varphi}{dt}) \Psi_{20}, \\ \Psi_{10} = I_{10} L_1 + I_{20} L_0, \\ \Psi_{20} = I_{10} L_0 + I_{20} L_2, \end{cases} \quad (3.24)$$

де  $\Psi_{10}$ ,  $\Psi_{20}$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{20}$  – вектори потокозчіплення і струмів статора і ротора в системі координат, нерухомій відносно поля статора, а  $\omega_0 - \frac{d\varphi}{dt} = \omega_0 - \omega_2 = \beta$  – абсолютне ковзання асинхронного двигуна.

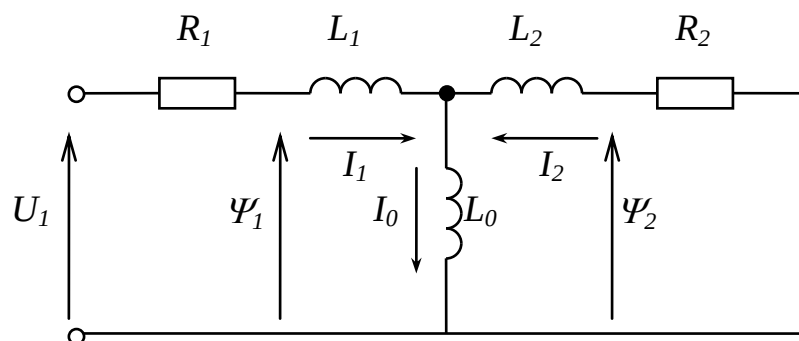


Рис. 3.9. Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Приведемо систему рівнянь (3.24) до трьох змінних: напрузі статора  $U_1$  і потокозчіпленням  $\Psi_1$  і  $\Psi_2$  (рис. 3.9). Для цього з третього рівняння системи (3.24) виразимо струм статора, представлений в обертовій системі координат:

$I_{10} = \frac{\Psi_{10} - I_{20}L_0}{L_1}$ , де  $\Psi_{10}$  – потокозчеплення статора в обертовій системі

координат. Підставивши знайдене значення струму статора в четверте рівняння системи (3.24), одержимо:

$$\Psi_{20} = \frac{\Psi_{10} - I_{20}L_0}{L_1} \cdot L_0 + L_2 I_{20} = \Psi_{10} \cdot \frac{L_0}{L_1} + I_{20} \cdot \left( L_2 - \frac{L_0^2}{L_1} \right).$$

Прийнявши, що  $k_1 = \frac{L_0}{L_1}$  – коефіцієнт електромагнітного зв'язку статора,

$L'_2 = L_2 - \frac{L_0^2}{L_1}$  – перехідна індуктивність ротора, визначимо значення струму

ротора в обертовій системі координат:  $I_{20} = \Psi_{20} / L'_2 - k_1 \Psi_{10} / L'_2$ . Підставляємо знайдене значення струму ротора в обертовій системі координат у друге рівняння системи (3.24):

$$0 = \left( \frac{\Psi_{20}}{L'_2} - \frac{k_1 \Psi_{10}}{L'_2} \right) R_2 + \frac{d\Psi_{20}}{dt} + j\beta \Psi_{20}.$$

Звідки, прийнявши що  $\alpha_2 = \frac{R_2}{L'_2}$ , остаточно одержимо:

$$\frac{d\Psi_{20}}{dt} = k_1 \alpha_2 \Psi_{10} - \alpha_2 \Psi_{20} - j\beta \Psi_{20}. \quad (3.25)$$

Приведемо перше рівняння системи (3.24) до обертової системи координат. Для цього з четвертого рівняння системи (3.24) виразимо струм

ротора, представлений в обертовій системі координат:  $I_{20} = \frac{\Psi_{20} - I_{10}L_0}{L_2}$ , де

$\Psi_{20}$  – вектор потокозчеплення ротора в обертовій системі координат.

Підставивши знайдене значення струму ротора в третє рівняння системи (3.24), одержимо:

$$\Psi_{10} = I_{10}L_1 + \frac{\Psi_{20} - I_{10}L_0}{L_2} \cdot L_0 = \Psi_{20} \cdot \frac{L_0}{L_2} + I_{10} \cdot \left( L_1 - \frac{L_0^2}{L_2} \right).$$

Прийнявши, що  $k_2 = \frac{L_0}{L_2}$  – коефіцієнт електромагнітного зв'язку ротора,

$L'_1 = L_1 - \frac{L_0^2}{L_2}$  – перехідна індуктивність ротора, визначимо значення струму

статора в обертовій системі координат:  $I_{10} = \Psi_{10}/L'_1 - k_2 \Psi_{20}/L'_1$ . Підставляємо знайдене значення струму статора в перше рівняння системи (3.24):

$$U_{10} = \left( \frac{\Psi_{10}}{L'_1} - \frac{k_2 \Psi_{20}}{L'_1} \right) R_1 + \frac{d\Psi_{10}}{dt} + j\omega_0 \Psi_{10}.$$

Відкіля, прийнявши що  $\alpha_1 = \frac{R_1}{L'_1}$ , остаточно одержимо:

$$\frac{d\Psi_{10}}{dt} = U_{10} + k_2 \alpha_1 \Psi_{20} - \alpha_1 \Psi_{10} - j\omega_0 \Psi_{10}. \quad (3.26)$$

Виконаємо проекцію рівняння (3.25) і (3.26) на осі системи координат  $d$  й  $q$ , що обертається з частотою поля, враховуючи що  $U_{10} = U_{10d} + jU_{10q}$ ,

$\Psi_{10} = \Psi_{10d} + j\Psi_{10q}$  і  $\Psi_{20} = \Psi_{20d} + j\Psi_{20q}$ :

$$\begin{cases} \frac{d(\Psi_{10d} + j\Psi_{10q})}{dt} = U_{10d} + jU_{10q} + k_2 \alpha_1 \Psi_{20d} + jk_2 \alpha_1 \Psi_{20q} - \alpha_1 \Psi_{10d} - j\alpha_1 \Psi_{10q} + \\ \quad + \omega_0 \Psi_{10q} - j\omega_0 \Psi_{10d}, \\ \frac{d(\Psi_{20d} + j\Psi_{20q})}{dt} = k_1 \alpha_2 \Psi_{10d} + jk_1 \alpha_2 \Psi_{10q} - \alpha_2 \Psi_{20d} - j\alpha_2 \Psi_{20q} + \beta \Psi_{20q} - j\beta \Psi_{20d}, \end{cases}$$

або перетворивши до нормальної форми Коші:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{10d}}{dt} = U_{10d} + k_2 \alpha_1 \Psi_{20d} - \alpha_1 \Psi_{10d} + \omega_0 \Psi_{10q}, \\ \frac{d\Psi_{10q}}{dt} = U_{10q} + k_2 \alpha_1 \Psi_{20q} - \alpha_1 \Psi_{10q} - \omega_0 \Psi_{10d}, \\ \frac{d\Psi_{20d}}{dt} = k_1 \alpha_2 \Psi_{10d} - \alpha_2 \Psi_{20d} + \beta \Psi_{20q}, \\ \frac{d\Psi_{20q}}{dt} = k_1 \alpha_2 \Psi_{10q} - \alpha_2 \Psi_{20q} - \beta \Psi_{20d}. \end{cases} \quad (3.27)$$

Рівняння для обертаючого моменту узагальненої електричної машини, згідно [1], має вигляд:

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_0}{L_2 \cdot L'_1} \cdot (\bar{\Psi}_{10} \times \bar{\Psi}_{20}) = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_0}{L_1 \cdot L'_2} \cdot (\bar{\Psi}_{10} \times \bar{\Psi}_{20}),$$

або перейшовши до проекцій на осі  $d$  і  $q$ :

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_0}{L_2 \cdot L'_1} \cdot (\Psi_{20d} \Psi_{10q} - \Psi_{20q} \Psi_{10d}). \quad (3.28)$$

Усі вищенаведені міркування справедливі для узагальненої двохполюсної машини. У випадку реальної багатопольусної машини, її необхідно привести до еквівалентної двохполюсної. З цією метою запишемо рівняння руху:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M' - M_c,$$

де  $\omega$  - кутова швидкість реальної машини;  $M'$  - обертаючий момент реальної машини;  $M_c$  - механічний обертаючий момент навантаження. Перепишемо рівняння руху, враховуючи що  $M' = p \cdot M$  і  $\omega = \Omega / p$ , де  $p$  - число пар полюсів реальної багатопольусної машини:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{p}{J} \cdot (pM - M_c), \quad (3.29)$$

де  $J$  - момент інерції електромеханічної системи

Об'єднавши (3.27), (3.28) і (3.29), одержимо систему рівнянь асинхронного двигуна в обертовій з частотою поля системі координат:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_{10d}}{dt} = U_{10d} + k_2 \alpha_1 \Psi_{20d} - \alpha_1 \Psi_{10d} + \omega_0 \Psi_{10q}, \\ \frac{d\Psi_{10q}}{dt} = U_{10q} + k_2 \alpha_1 \Psi_{20q} - \alpha_1 \Psi_{10q} - \omega_0 \Psi_{10d}, \\ \frac{d\Psi_{20d}}{dt} = k_1 \alpha_2 \Psi_{10d} - \alpha_2 \Psi_{10d} + \beta \Psi_{20q}, \\ \frac{d\Psi_{20q}}{dt} = k_1 \alpha_2 \Psi_{10q} - \alpha_2 \Psi_{10q} - \beta \Psi_{20d}, \\ M = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_0}{L_2 \cdot L'_1} \cdot (\Psi_{20d} \Psi_{10q} - \Psi_{20q} \Psi_{10d}), \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{p}{J} \cdot (pM - M_c). \end{array} \right. \quad (3.30)$$

Система рівнянь (3.30) зручна тим, що може бути вирішена чисельними методами. Так, задавшись напругою, статичним моментом і параметрами схеми заміщення, можна знайти потокозчіплення статора і ротора  $\Psi_{10}$  і  $\Psi_{20}$ , момент  $M$  і швидкість обертання ротора асинхронної машини  $\omega$ .

В додатку приведена програма та її опис, за допомогою якої проведене моделювання роботи двигуна на ЕОМ.

**Висновки.** Розглянуті основні характеристики та параметри двигунів, які найчастіше використовуються для приводу насосів. Зроблений висновок, що такі двигуни працюють в умовах важкого пуску (пуск під навантаженням). В таких умовах ці двигуни повинні мати достатню жорсткість механічних характеристик, що дозволяє їм зберігати сталі швидкості обертання при зміні моментів навантаження на валу.

Проаналізовані причини, які вимагають особливого контролю, тому що знижують ефективність роботи двигунів, а іноді можуть зробити її неможливою

Показано, що ці причини носять здебільшого випадковий характер і проявляються в режимах великих навантажень.

Із аналізу слідує, що для контролю працездатності та стану асинхронних електродвигунів потрібно контролювати моменти на валу та механічні характеристики двигунів. Крім того необхідно знайти спосіб вимірювання моменту асинхронного двигуна з врахуванням паразитних моментів, тобто визначати дійсне значення величини корисного моменту на валу.

## **4. АНАЛІЗ ТА ПОБУДОВА МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ**

### **4.1. Вимірювання частоти обертання електродвигунів**

Як вже зазначалось в попередньому розділі у нас виникає необхідність знімати механічні характеристики електродвигунів. Для цього потрібно вимірювати насамперед частоту обертання вала двигуна. До того ж стоїть завдання забезпечити при цьому високу точність та швидкість вимірів. Також важлива вимога саме до розроблюваної системи – широкий діапазон вимірювань. Але як відомо з практики вимірювань, висока точність забезпечується на обмеженому діапазоні вимірюваної величини, далі вона поступово знижується. Виходом з цього стає перемикання діапазонів на засобі вимірювання і тут же і недолік – для широкої полоси вимірюваних частот потрібна величезна кількість перемикаємих діапазонів. Через це, ми отримуємо велику громіздкість, низьку швидкість вимірювань (через пошуки потрібних діапазонів) та похибки при невірно налаштованому засобі вимірювання.

Тому постає завдання розробити спосіб (алгоритм) вимірювання, який би позбавив від зазначених недоліків. Для цього нижче розглядаються способи побудови частотомірів, на основі яких можливо створити автоматичну вимірювальну систему.

#### **4.1.1. Цифрові частотоміри**

Розроблювана система має працювати під керуванням мікропроцесора, для забезпечення високої гнучкості переналагодження. Тому нас цікавлять способи вимірювання частоти з використанням саме цифрової техніки. Перед тим як розглядати принципи будови і роботу цифрових частотомірів,

необхідно зупинитися на визначенні понять "частота" і "середня частота" періодичного сигналу.

У частотовимірній техніці основною характерною періодичного сигналу є період.

Періодом  $T$  періодичного сигналу називається найменший інтервал часу, через який регулярно послідовно повторюється довільно вибране миттєве значення періодичного сигналу  $U(t)$ . З математичної точки зору це інтерпретується так: період  $T$  - це найменший інтервал часу, що відповідає рівнянню  $U(t + iT) = U(t)$ , де  $i$  – будь-яке ціле число.

Частота  $f$  періодичного сигналу – це фізична величина, значення якої подають зворотні значення періоду цього сигналу. Співвідношення між значеннями частоти і періоду визначається формулою  $f = 1/T$

Відношення числа  $N$  періодів періодичного сигналу до інтервалу часу  $T_0$ , за який розраховане це число, дає середнє (за інтервал  $T_0$ ) значення частоти.

#### 4.1.2. Вимірювання середніх значень швидкості обертання

Принцип дії цих приладів ґрунтується на підрахунку імпульсів, частота слідування яких  $f$  пропорційна вимірюваній величині за суворо визначений інтервал часу  $T_0$ . Цей інтервал часу називається зразковим часовим інтервалом  $T_0$ .

Структурна схема цифрового частотоміра середніх значень наведена на рис. 4.1,а, а часові діаграми роботи – на рис. 4.1,б.

Із наведеного раніше визначення випливає, що структура частотоміра містить такі основні блоки:

- зразкову міру часу ЗМЧ ( $T$  – RS-тригер,  $SW2$  – схема абігу,  $G$  – генератор стабільної частоти,  $ПЧ$  – дільник частоти), що формує зразковий часовий інтервал  $T_0$ ;

- лічильник ЛТ, який підраховує кількість імпульсів невідомої частоти  $f_x$  за зразковий інтервал часу  $T_0$ ;
- схему збігу SW1, де здійснюється квантування зразкового часового інтервалу імпульсами невідомої частоти;
- формувач імпульсів  $F$ , який із входніх сигналів формує прямокутні імпульси, калібровані за амплітудою і тривалістю.

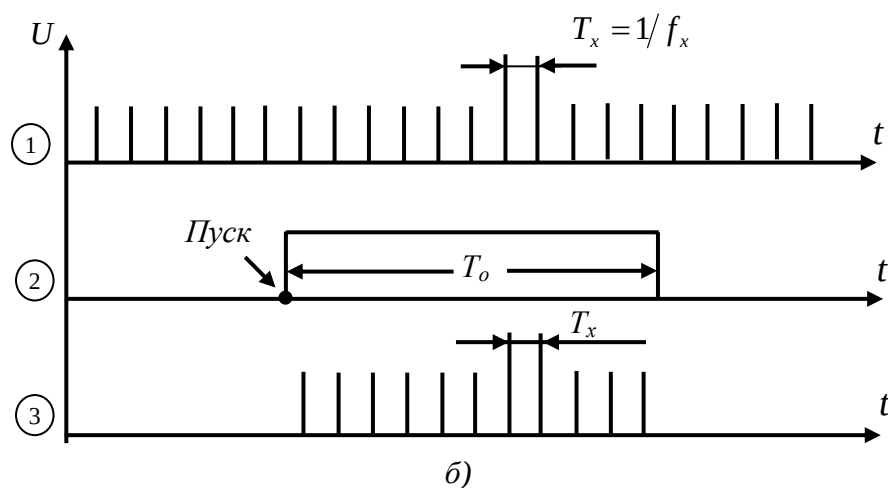
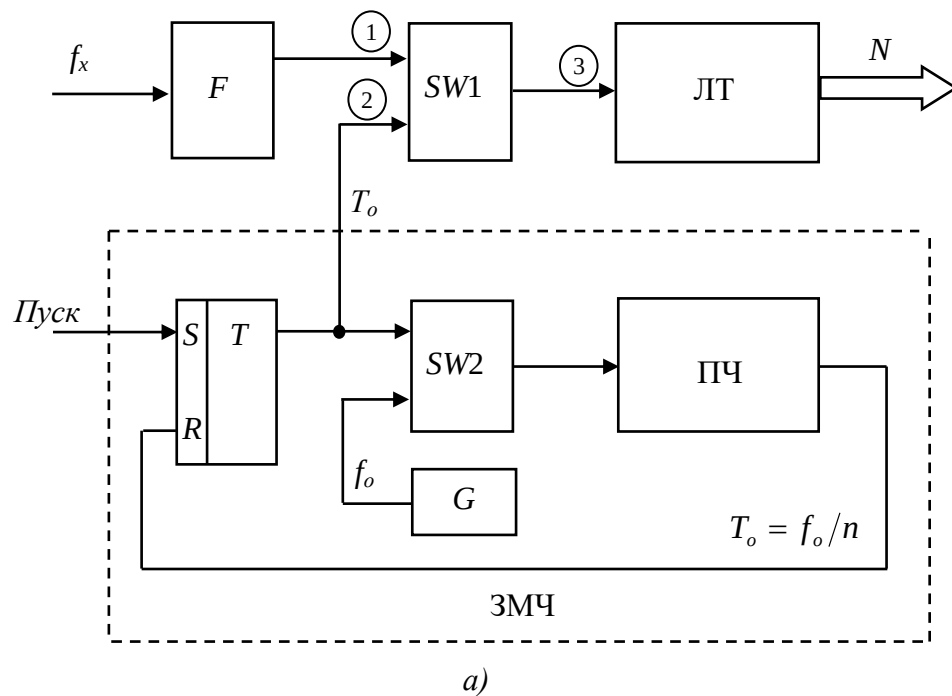


Рис. 4.1. Структурна схема (а) і часові діаграми (б) роботи цифрового частотоміра середніх значень

Взаємодія виділених блоків розкриває принцип дії цифрового частотоміра середніх значень. За командою "Пуск" тригер Т встановлюється у стан логічної одиниці і таким чином відкриває схеми збігу SW1 і SW2. Імпульси, які слідують із частотою  $f_x$  через формувач  $F$  і відкриту схему збігу SW1, надходять на вхід двійкового лічильника ЛТ, який здійснює їх підрахунок. В цей самий момент часу через відкриту схему збігу SW2 імпульси  $f_0$  з виходу генератора  $G$  стабільної частоти надходять на вхід подільника частоти ПЧ, коефіцієнт поділу якого розраховують з урахуванням забезпечення потрібного часового інтервалу  $T_0$ . Після закінчення зразкового часового інтервалу заднім фронтом імпульсу  $T_0$  тригер Т встановлюється у стані логічного нуля, схеми збігу SW1 і SW2 закриваються і в лічильнику ЛТ фіксується код  $N$ .

Кількість імпульсів, які підраховує лічильник за час  $T_0$ ,

$$N_i = \frac{T_0}{T_x} = T_0 f_x,$$

де  $T_0$  – зразковий часовий інтервал;  $f_x$  – вимірювана величина.

Подане співвідношення є рівнянням перетворювання частотоміра, оскільки воно характеризує, яким чином пов'язані між собою вихідна  $N_i$  і вхідна  $f_x$  величини.

У цифровому вимірювальному приладі за умови постійності абсолютної похибки по діапазону вимірювання межа допуску основної похибки нормується у вигляді наведеної похибки

$$\delta_K = \frac{\Delta}{x_H} \cdot 100\% = \frac{1}{N} \cdot 100\%.$$

З урахуванням зауваження рівняння похибки цифрового частотоміра середніх значень може бути подано у вигляді

$$\delta_{KЧ} = \frac{1}{N_i} \cdot 100\% = \frac{1}{T_0 \cdot f_x} \cdot 100\%.$$

Аналіз одержаного рівняння похибки частотоміра показує, що похибка квантування зменшується із збільшенням зразкового часового інтервалу  $T_0$  і вимірюваної величини  $f_x$ . Однак збільшення  $T_0$  призводить до збільшення часу вимірювання, а отже, до зниження швидкодії. Оскільки  $\delta_{кч}$  зменшується із збільшенням  $f_x$  то такі частотоміри ефективні в областях середніх і високих частот (від одиниць кілогерц до десятків мегагерц).

Другою складовою похибки вимірювання частоти є похибка зразкової міри часу  $\delta_{змч}$  зумовленої неточністю первинної установки значення  $T_0$  і його наступними часовими і температурними змінами.

Цифрові прилади цього типу виміряють за час  $T_0$  середнє значення частоти  $f_x$ , Через це їх називають частотомірами середніх значень.

В області низьких і інфранизьких частот більш ефективні частотоміри, які базуються на квантуванні періоду сигналу, який досліджується.

#### 4.1.3. Вимірювання миттєвих значень швидкості обертання

Принцип дії цифрового частотоміра миттєвих значень (періодоміра) базується на квантуванні періоду інформативного сигналу  $T_x$  імпульсами зразкової частоти  $f_z$ , які формує зразкова міра частоти МЧ.

На рис. 4.2, а показано структурну схему частотоміра миттєвих значень, а на рис. 4.2, б – часові діаграми, що пояснюють принцип його дії.

Основними елементами наведеної структури є формувач  $F$ , пристрій виділення періоду ПВП, генератор зразкової частоти  $G$ , схема збігу  $SW$ , двійковий лічильник ЛТ, перетворювач коду періоду  $N_T/N_f$  у код частоти і цифровий відліковий пристрій.

Калібровані за амплітудою і тривалістю імпульси з виходу формувача  $F$  надходять на вхід пристрою виділення періоду, ПВП – це лічильний тригер Т, на прямому виході якого з імпульсів з частотою слідування  $f_x$  формується

вимірюваний період  $T_x$ . Період  $T_x$  у схемі збігу  $SW$  квантується імпульсами опорної частоти  $f_0$ . Схема збігу порівнює значення періоду  $T_x$  і відрізок часу  $N \cdot T_0$ , який утворюється в процесі підрахунку квантуючих імпульсів (виконує функцію елемента порівняння). Протягом кожного періоду  $T_x$  схема збігу  $SW$  відкрита. Імпульси  $f_0$  з виходу генератора  $G$  через відкриту схему збігу  $SW$  надходять на вхід лічильника ЛТ. Після закінчення вимірюваного періоду  $T_x$  в ЛТ фіксується двійковий код

$$N_n = \frac{T_x}{T_0} = T_x f_0.$$

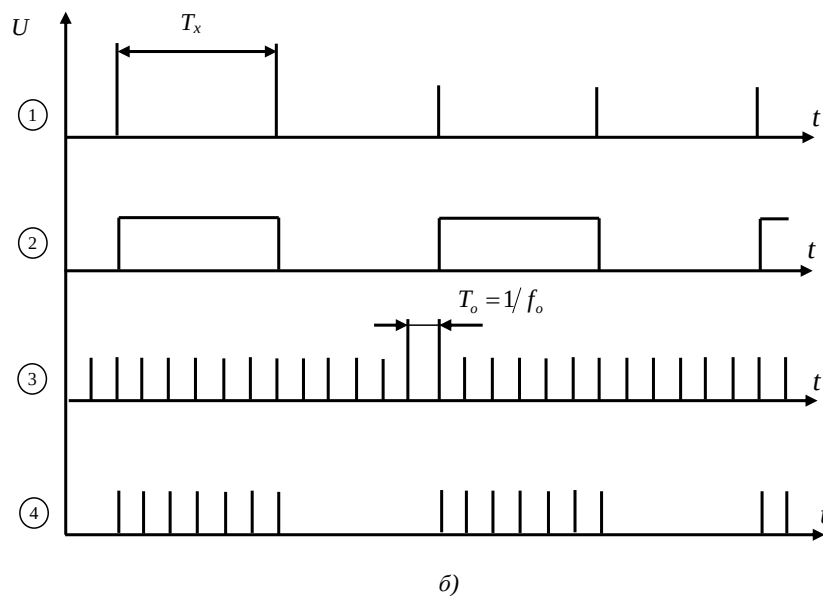
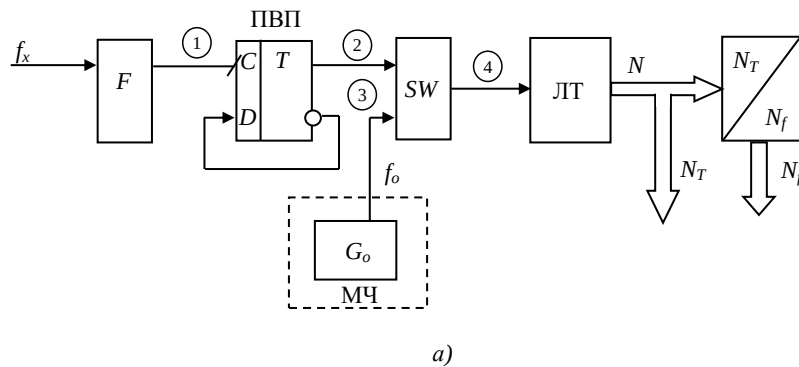


Рис. 4.2. Структурна схема частотоміра миттєвих значень (а) і часові діаграми (б), що пояснюють принцип його дії

Останнє співвідношення є рівнянням перетворення  $N = F(T_x)$  частотоміра миттєвих значень.

Похибка квантування частотоміра

$$\delta_{\text{кп}} = \frac{1}{N_n} \cdot 100\% = \frac{1}{T_x \cdot f_0} \cdot 100\%$$

Аналіз рівняння похибки показує, що можливими шляхами зменшення  $\delta_{\text{кп}}$  є збільшення частоти квантуючих імпульсів  $f_0$  і збільшення періоду  $T_x$ . Однак збільшення  $f_0$  обмежене швидкістю елементної бази приладу. Тому для зменшення цієї похибки при заданих  $T_0$  і  $T_x$  квантують не один, а кілька періодів  $T_x$ . Збільшення числа періодів квантування приводить до зниження швидкодії.

Крім похибки квантування в частотомірі миттєвих значень виникає похибка  $\delta_{\text{зтч}}$ , зумовлена неточністю первинної установки частоти генератора  $G$ , її часовою і температурною нестабільністю, а також похибкою  $\delta_T$  виділення періоду.

Цифрові прилади цього типу вимірюють невідомий період  $T_x$ . Доповнивши структуру періодоміра перетворювачем  $N_T/N_f$ , в якому виконується операція  $1/T_x$ , одержують схему цифрового частотоміра. Такий частотомір реалізує функцію вимірювання миттєвої частоти в кожному періоді  $T_x$ . У зв'язку з цим його називають частотоміром миттєвих значень. Галузь його застосування – вимірювання низьких та інфранизьких частот

#### **4.1.4. Частотний вимірювальний канал із мікропроцесорним управлінням**

При побудові МПС і приладів часто виникає необхідність у реалізації функції вимірювання частотно-часових параметрів сигналів (період, частота).

Використання мікропроцесорної системи не виключає наявності в складі частотоміра блоків електронної техніки (таких, як пристрій виділення періоду  $T$ , формувач імпульсів  $F$ , схеми збігу  $SW$ , лічильники ЛТ тощо), що складають апаратну частину засобів вимірювання. Але порівняно із звичайними цифровими частотомірами, виконаними згідно із схемами з жорсткою логікою, апаратна частина мікропроцесорних частотомірів доповнюється паралельним інтерфейсом ПІ для зв'язку з мікропроцесорною системою.

При безпосередньому (прямому) вимірюванні частоти періодичного сигналу найвагомішими є дві складові похибки – міри і порівняння. Похибка міри  $\delta_{MB}$  визначається нестабільністю частоти напруги кварцового генератора. Ця складова похибка може бути відчутною при вимірюванні дуже високих частот. Похибка порівняння визначається, головним чином, похибкою квантування  $\delta_K$ . При вимірюванні низьких частот похибка квантування є визначаючою складовою похибки вимірювання. Наприклад, якщо вимірюється частота  $f_x = 10$  Гц при  $T_0 = 1$  с, то максимальна похибка квантування

$$\delta_{KЧ} = \frac{1}{T_0 \cdot f_x} \cdot 100\% = \frac{100\%}{1 \cdot 10} = 10\%, \text{ що неприпустимо.}$$

Таким чином, через великі похибки квантування низькі частоти безпосередньо вимірюються цифровим частотоміром із невисокою точністю. Тому розв'язання завдання зменшення впливу похибки квантування на результати вимірювання завжди було одним із важливих напрямів розробки цифрової частотовимірювальної техніки. Перед тим як розглядати частотний вимірювальний канал із мікропроцесорним управлінням, який би радикально розв'язав вказане завдання, зупинимось на чотирьох способах зменшення похибки квантування при вимірюванні частоти.

Перший спосіб очевидний: збільшення тривалості еталонного часового інтервалу  $T$ , тобто часу вимірювання. Але можливості такого способу

обмежені, оскільки для одержання малої похибки квантування (наприклад,  $\delta_{кч} = 0,01\%$ ;  $f_x = 10$  Гц) потрібний дуже великий час вимірювання:

$$T_0 = \frac{1}{\delta_{кч} \cdot f_x} \cdot 100\% = \frac{100\%}{0,01 \cdot 10} = 1000 \text{ с.}$$

Другий спосіб зводиться до збільшення числа імпульсів, що квантують еталонний часовий інтервал  $T_0$ , який досягається множенням вимірюваної частоти  $f_x$ . Виконання даного способу поєднано із застосуванням додаткового блоку помножувача частоти, що ускладнює і підвищує вартість апаратурної частини.

Третій спосіб, який враховує випадкову природу похибки квантування, припускає проведення багаторазових вимірювань і усереднення їх результатів. Це ефективний шлях зменшення впливу випадкової похибки на результат вимірювання.

Четвертий спосіб полягає у безпосередньому вимірюванні періоду досліджуваного сигналу з наступним обчисленням частоти:  $f_x = \frac{1}{T_x}$ . Цей шлях дозволяє різко зменшити похибку квантування при вимірюванні низьких частот.

Щоб побачити ефект, який досягається, скористаємось наведеним раніше прикладом. Перейдемо до вимірювання періоду. Частота  $f_x = 10$  Гц. Відповідний період  $T_x = 0,1$  с. Сформуємо стробуючий імпульс тривалістю, що дорівнює періоду  $T_x$ , і проквантуємо його імпульсами, частота проходження яких  $f_0 = 10$  МГц (що, звичайно має місце в цифрових частотомірах). У цьому разі похибка квантування

$$\delta_{кп} = \frac{1}{T_x \cdot f_0} \cdot 100\% = \frac{100\%}{0,1 \cdot 10^7} = 10^{-4}\%.$$

Можна зробити висновок, що непряме вимірювання частоти  $f_x = \frac{1}{T_x}$  у даному разі дозволило різко підвищити точність порівняно з прямим вимірюванням частоти: похибка квантування зменшилась у 100000 разів.

Однак при вимірюванні високих частот (наприклад,  $f_x = 10^6$  Гц;  $T_0 = 1$  с;  $f_0 = 10^7$  Гц) похибка квантування цифрового частотоміра

$$\delta_{КЧ} = \frac{1}{T_0 \cdot f_x} \cdot 100\% = \frac{100\%}{1 \cdot 10^6} = 10^{-4}\%,$$

а похибка квантування цифрового періодоміра надмірно зростає:

$$\delta_{КП} = \frac{f_x}{f_0} \cdot 100\% = \frac{10^6 \cdot 100\%}{10^7} = 10\%.$$

Таким чином, при дослідженнях періодичних процесів у широкому діапазоні частот для досягнення заданої точності доцільно в діапазоні високих частот застосовувати цифровий частотомір, а в діапазоні низьких частот переходити до вимірювання періоду.

Частота (назвемо її критичною частотою  $f_{xk}$ ), при якій необхідно здійснювати перемикання режиму роботи частотоміра або періодоміра (рис. 4.3), визначається з умови

$$\delta_{КЧ} = \delta_{КП}.$$

Підставимо відповідні похибки квантування:

$$\frac{100\%}{T_0 \cdot f_x} = \frac{100\%}{T_x \cdot f_0}$$

і визначимо критичну частоту:

$$f_{xk} = \sqrt{f_0 / T_0}.$$

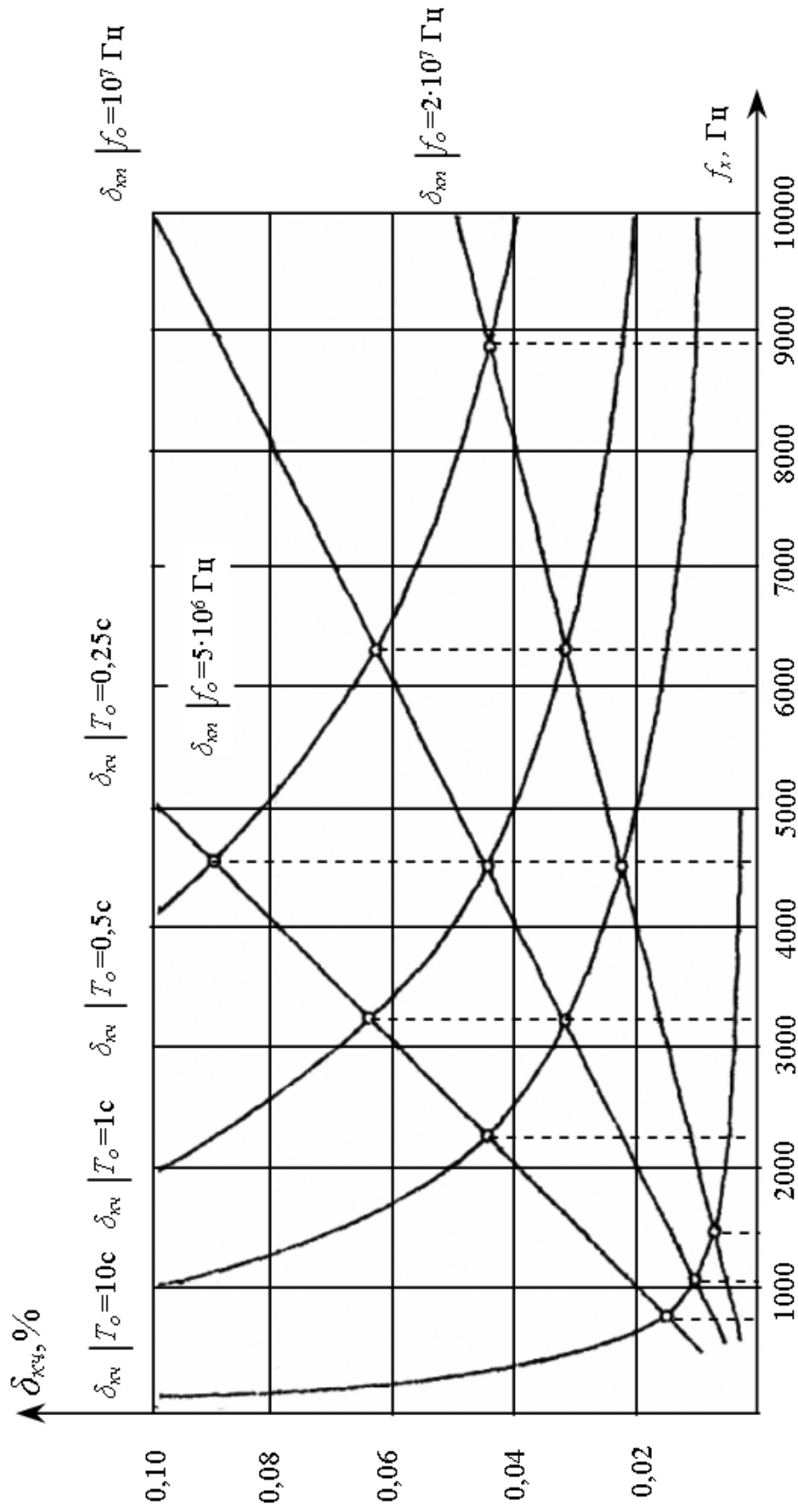


Рис. 4.3. До питання визначення частоти  $f_{\text{к}}$  перемикання структури частотоміра

При  $f_x \leq f_{xk}$  доцільно використовувати апаратну частину цифрового періодоміра, а при  $f_x > f_{xk}$  – цифрового частотоміра.

Алгоритм роботи частотного вимірювального каналу з мікропроцесорним управлінням, що дозволяє досліджувати періодичні процеси в широкому частотному діапазоні, наведено на рис. 4.4. Спочатку настраюють апаратну і програмну частини на режим, наприклад, цифрового періодоміра. Потім вимірюють невідому частоту  $f_x$  і задаються потрібною похибкою квантування  $\delta_{KЧ}$ . На основі значень  $f_x$  і  $\delta_{KЧ}$  визначають тривалість еталонного часового інтервалу:

$$T_0 = \frac{1}{\delta_{KЧ} \cdot f_x} \cdot 100\%.$$

Як квантуючу частоту  $f_0$  в мікропроцесорних частотомірах можна наприклад використовувати сигнал, що присутній на шинах управління (ШУ) мікропроцесорних систем (залежно від їх архітектури). Для переважної кількості недорогих мікроконтролерів  $f_0 \approx 2$  МГц. Якщо значення  $T_0$  і  $f_0$  відомі, визначають критичну частоту  $f_{xk}$ .

Якщо  $f_x \leq f_{xk}$ , то апаратну частину настраюють на режим цифрового періодоміра і переходять до підпрограми вимірювання частоти в цьому режимі. Алгоритм виконання програмного драйвера в режимі цифрового періодоміра подано на рис. 4.5. У іншому випадку ( $f_x > f_{xk}$ ) здійснюється режим цифрового частотоміра. Особливий інтерес у цьому режимі роботи викликає завдання формування еталонного часового інтервалу  $T_0$ . Можливі два варіанти розв'язання цього завдання.

Суть першого полягає в програмному формуванні  $T_0$ . Істотною перевагою цього способу є мінімум апаратних затрат. Проте він обмежує верхню межу вимірювання ( $f_x = 50$  кГц), тому доцільно формувати еталонний часовий інтервал  $T_0$  апаратно, що вимагає ввімкнення в структурну схему частотного вимірювального каналу додаткового блоку (програмованого

таймера, якщо його не міститься в структурі мікропроцесора або контролера).

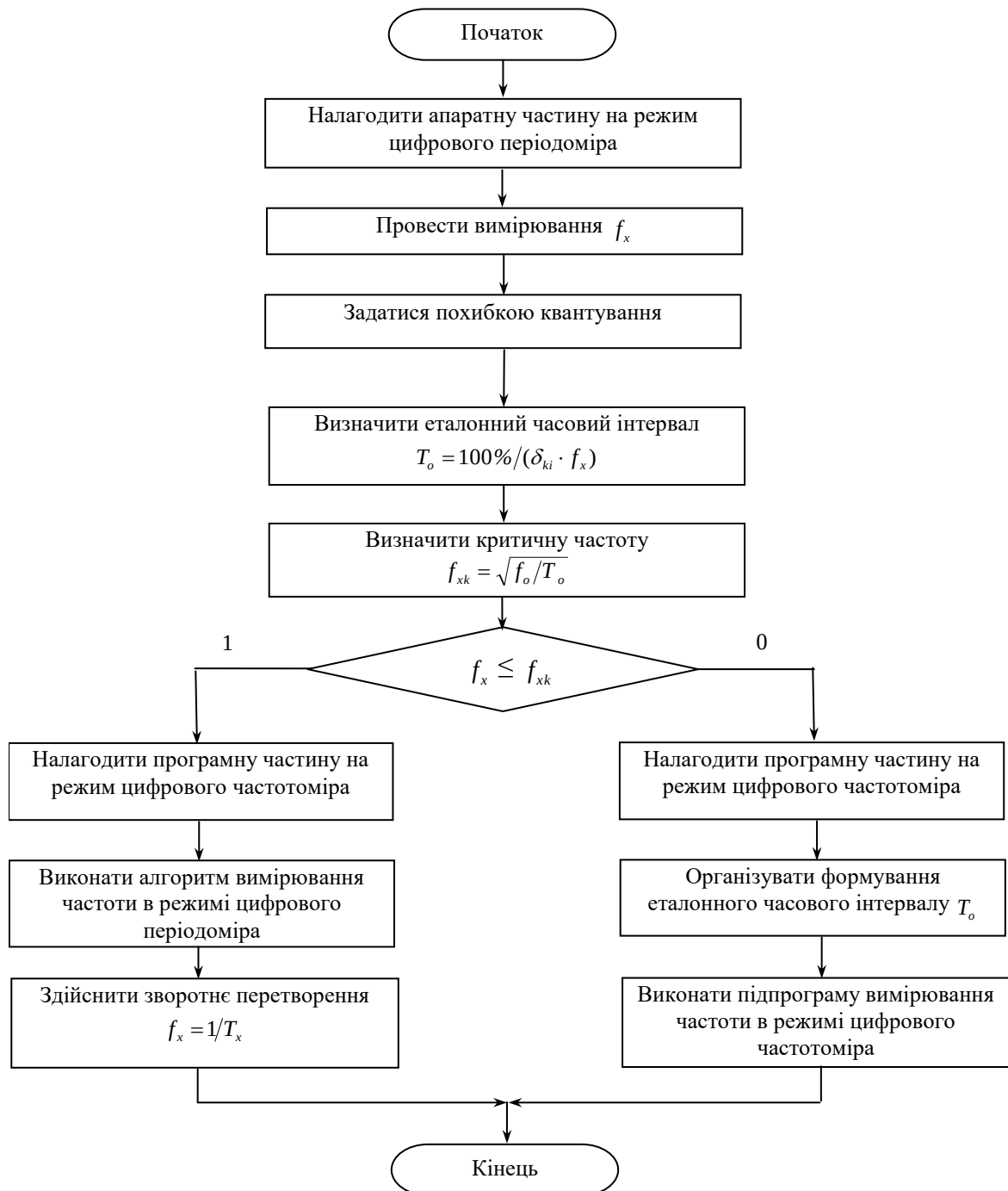


Рис. 4.4. Алгоритм виконання вимірювальної процедури в частотному вимірювальному каналі

Структурна схема мікропроцесорного частотного вимірювального каналу, яка дозволяє реалізувати наведений алгоритм, подана на рис. 4.6, а.

Вона складається з лічильного тригера  $T$  (пристрою виділення періоду), чотирьох схем збігу  $SW$ , лічильників ЛТ0 і ЛТ1, паралельного інтерфейса і мікропроцесорної системи. Схеми збігу  $SW0$  і  $SW1$  призначені для квантування періоду  $T_x$  у прилеглих інтервалах. Операції числення і кодування здійснюються в лічильниках. Паралельний інтерфейс (ПІ) виконує функції сполучення з МПС. Часові діаграми, що пояснюють роботу частотного вимірювального каналу, подані на рис. 4.6, б.

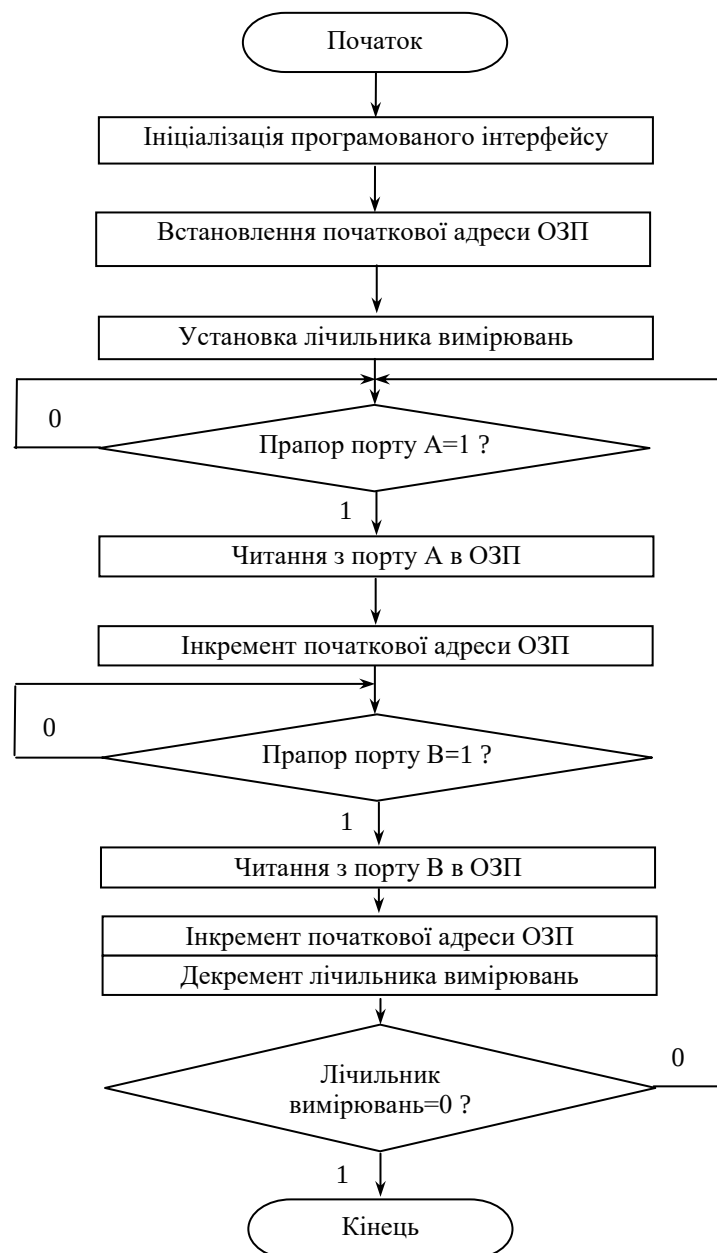


Рис. 4.5. Алгоритм виконання можливої програмної реалізації в режимі цифрового періодоміра

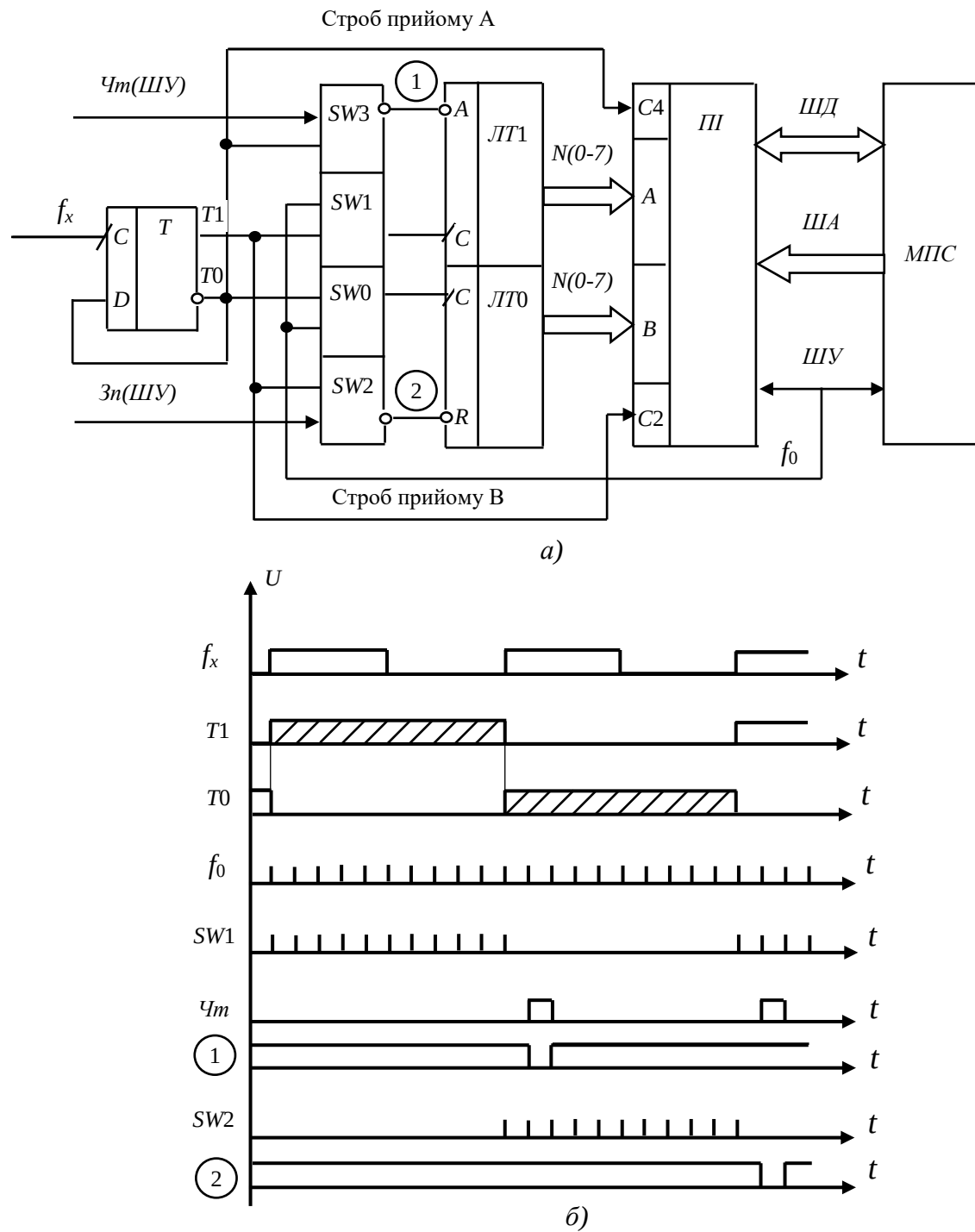


Рис. 4.6. Структурна схема (а) частотного вимірювального каналу з мікропроцесорним управлінням і часові діаграми (б) його роботи

## 4.2. Вимірювання механічних моментів електродвигунів

З метою визначення початкового пускового моменту, наприклад асинхронного двигуна, проводять дослід короткого замикання. При цьому на статор подається напруга, ротор загальмовується, а у випадку фазного ротора обмотки закорочуються накоротко на кільцях. Напруга, подавана на статор, повинна бути практично симетричною і номінальної частоти.

У процесі дослідження одночасно вимірюють підведену напругу, струм статора (лінійний струм  $I_k$  короткого замикання), споживану потужність  $P_k$  (кВт), початковий пусковий момент (для електродвигунів малої і середньої потужності), а безпосередньо після дослідження визначають опір  $r_{1k}$  обмотки статора між зажимами, що відповідає температурі наприкінці дослідження. Початковий пусковий момент  $M_n = M_k$  (Нм) вимірюють при досліді динамометром або вагами на кінці важеля (яким загальмований ротор, що закріплюється шпонкою на вільному кінці вала двигуна, або вагами балансирної машини).

Для електродвигунів його визначають розрахунково за вимірюваними втратами  $P_k$  короткого замикання (чисельно рівними потужності, споживаній при досліді):

$$M_k = 0.9 \cdot 9550 P_{kM2} / n_c,$$

де  $P_{kM2}$  – втрати в обмотці ротора при досліді короткого замикання, кВт;  
0,9 - коефіцієнт, що орієнтовно враховує дію вищих гармонік.

Втрати (кВт) в обмотці ротора при досліді короткого замикання:

$$P_{kM2} = P_k - P_{kM1} - P_c,$$

де  $P_{kM1}$  - втрати в обмотці статора при досліді короткого замикання, кВт;  
 $P_c$  - втрати в сталі, обумовлені з досліді холостого ходу, кВт.

Втрати в обмотці статора при досліді короткого замикання:

$$P_{kM1} = I_k^2 r_{1k} / 1000.$$

Для одержання залежностей споживаної потужності  $P_k$ , струму  $I_k$  і початкового пускового моменту  $M_k$  від напруги  $U_k$ , прикладеної до двигуна в

режимі короткого замикання, проводять 5...7 вимірів при різних значеннях цієї напруги.

У процесі випробувань струм і втрати короткого замикання вимірюють при одному значенні напруги короткого замикання:

$$U_k = U_H / 3,8 ,$$

де  $U_H$  – нормальна напруга двигуна.

Під час проведення дослідів короткого замикання перший відлік рекомендується проводити при наступних значеннях напруги короткого замикання в залежності від  $U_H$ :

$U_H$ , В... 127 220 380 440 500 660 3000 6000 10000

$U_k$ , В... 33 58 100 115 130 173 800 1600 2640

Другий відлік – при напрузі (1-0,1)  $U_H$ . Необхідну напругу  $U_k$  подають починаючи з мінімального значення. Щоб уникнути надмірного нагрівання обмоток струмами короткого замикання рекомендується відлік за приладами на кожному значенні підведеної напруги робити за час не більший 10 с, а після відліку двигун відразу відключати.

#### **4.2.1. Використання асинхронного двигуна в якості навантажувальної машини при вимірюваннях обертаючих моментів**

Такий спосіб вимірювання засновується на тому, що обертаючий момент навантажувальної асинхронної машини працюючої в режимі противмикання, залишається практично постійним у діапазоні ковзань від 1 до ковзання, що відповідає мінімальному обертаючому моменту, і залежать тільки від величини напруги, що підводиться до навантажувальної машини. Для запобігання провалів у кривій  $M = f(n)$  навантажувальної асинхронної машини в режимі електромагнітного гальма рекомендується в цій машині збільшити повітряний зазор між статором і ротором шляхом додаткової обробки ротора по зовнішньому діаметру.

Випробування проводять у такий спосіб: навантажувальна асинхронна машина працює в режимі противмикання, тобто її магнітне поле обертається в сторону протилежну обертанню ротора, що створює відповідний гальмовий момент для випробовуваного двигуна. Гальмівний момент регулюють напругою, що підводиться до навантажувальної машини за допомогою джерела регульованої напруги. Навантажувальну асинхронну машину варто заздалегідь протарувати, тобто визначити залежність обертаючого моменту на валу від напруги, що підводиться до машини при її роботі в режимі електромагнітного гальма. При цьому необхідно переконатися у відсутності значних коливань величини гальмового моменту навантажувальної машини при фіксованій напрузі в діапазоні ковзання від 1 до 2. Ту ж саму протаровану навантажувальну асинхронну машину внаслідок сталості моменту при заданій напрузі можна використовувати при випробуваннях двигунів з різними номінальними частотами обертання.

Для визначення мінімального обертаючого моменту на навантажувальну машину подають понижену напругу, що відповідає визначеному значенню гальмового обертаючого моменту. Одночасно з навантажувальною машиною включають на номінальну напругу випробовуваний двигун. Якщо мінімальний обертаючий момент випробовуваного двигуна менше гальмового обертаючого моменту навантажувальної машини, то агрегат затримається на проміжній частоті обертання, а якщо мінімальний обертаючий момент випробовуваного двигуна вище гальмового, то агрегат досягає повної частоти обертання випробовуваного двигуна.

Пуски випробовуваного двигуна роблять кілька разів при різних гальмових моментах на валу, значення яких регулюються напругою, що підводиться до навантажувальної машини. При випробуваннях варто визначати найбільше значення гальмового моменту, при якому агрегат досягає повної частоти обертання випробовуваного двигуна. Це значення приймають рівним знайденому значенню мінімального обертаючого моменту в процесі пуску випробовуваного двигуна.

#### 4.2.2. Використання асинхронного двигуна в якості приводної машини при вимірюваннях пускового моменту

Обертальний момент асинхронного двигуна при короткому замиканні (пусковий момент  $M_n$ ) і залежить від положення ротора щодо статора і при провертанні ротора на одне зубкове ділення він змінюється між деякими найбільшим і найменшим значеннями.

Для забезпечення автоматизації вимірювання  $M_n$  необхідно використати ще один приводний двигун. Як наслідок з цього виникає два способи вимірювання, які б могли нас задовільнити: за реакцією статора випробуваного двигуна (ВД) і за реакцією статора приводного двигуна (ПД).

У першому способі  $M_n$ , розвинений ВД за допомогою важеля, закріпленого на статорі, передається до вимірювально-реєструючого пристрою. Кріплення важеля на корпусі статора ВД погіршує технологічність способу, збільшує час підготовки об'єкта контролю до випробування. Крім того, ця операція вносить додаткову похибку в результати обчислення  $M_n = Ql$ , оскільки при заміні ВД змінюється довжина важеля  $l$  через технологічний розкид габаритних розмірів корпуса статора ( $Q$  – сила, що діє на контрольно-реєструючий прилад).

Другий спосіб позбавлений цього недоліку. Однак при вимірюванні пускового моменту в електромеханічному колі перетворення виникає додатковий момент, зумовлений втратами на тертя. В результаті цього момент на статорі ПД виявляється більшим за вимірюваний пусковий момент ВД на деяку величину

$$\Delta M_o = M_m + M_n + M_{\mu},$$

де  $M_m, M_n, M_{\mu}$  - втрати відповідно механічні (на тертя), повітряні і в з'єднувальній муфті.

В зв'язку з цим точність вимірювань  $M_n$  визначається не тільки похибкою вимірювально-реєструючого приладу, але й втратами  $\Delta M_o$  у різних механічних вузлах випробуваного стенду.

На основі аналізу всього вищесказаного, пропонується автоматизована система для вимірювання початкових пускових моментів, яка також використовується для зняття механічних характеристик електродвигунів.

**Висновки.** Показано, що для вирішення зазначених проблем при вимірюванні швидкості обертання вала двигуна потрібно створити частотний вимірювальний канал з мікропроцесорним управлінням. Це дало нам змогу не тільки автоматизувати вимірювальний процес, але й створити вимірювальний вузол – частотний вимірювальний канал, який може знайти широке використання навіть за межами розглядуваної системи.

Введення такої системи дає можливість:

- а) автоматизувати встановлення потрібного діапазону вимірювання швидкості та обчислювальні процедури;
- б) здійснювати управління всіма блоками МПС і організовувати їх взаємодію;
- в) визначати потрібну тривалість еталонного часового інтервалу  $T_0$  і формувати його безпосередньо в МПС;
- г) обробляти результати спостережень і відображати їх у зручній формі.

Також, що стосується вимірювань механічних моментів, проаналізовано способи вимірювань пускового моменту та механічного обертального моменту, що необхідно в подальшому для побудови механічних характеристик випробуваних двигунів.

## **5. ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ**

### **5.1. Мікропроцесорна система вимірювання частоти обертання електродвигунів**

Надійність центробіжних насосів багато в чому визначається працездатністю їх електроприводу. Електродвигуни в процесі експлуатації зношуються і потребують ремонту. Після ремонту електродвигуни необхідно протестувати (перевірити) на працездатність в тих чи інших умовах за їх нормативними характеристиками та параметрами. Зрозуміло, що така перевірка повинна проводитись у якомога коротший термін та в достатньо широкому діапазоні швидкостей.

Для цієї мети пропонується мікропроцесорна система контролю кутової швидкості електродвигунів, яка дозволяє якісно, та, насамперед, ефективно здійснити перевірку працездатності електродвигунів за їх нормативними характеристиками та параметрами.

Нині найточнішими вважаються дискретні методи вимірювання частоти обертання. Вони ґрунтуються на квантуванні сигналів за рівнем і дискретизацією в часі.

У першому випадку методом числення імпульсів від дискретного (частотного) датчика швидкості з одночасним кодуванням результату визначають частоту обертання за фіксований еталонний часовий інтервал  $T_0$ , що задається зразковою (еталонною) мірою часу. Такі пристрої будуються на основі цифрових тахометрів (частотомірів) середніх значень.

Відносна простота, високі технічні характеристики забезпечили цьому методу та його модифікаціям широке застосування при вимірюваннях частот обертання.

Недоліком цього методу, як вже зазначалось вище, є велика похибка квантування при вимірюванні малих частот обертання:

$$\delta_{КСЗ} = \frac{60}{T_0 \cdot n_x \cdot Z} \cdot 100 \%,$$

де  $T_0$  – еталонний часовий інтервал;  $n_x$  – вимірювана частота обертання;  $X$  – число імпульсів за один оберт частотного датчика швидкості.

Більш високі метрологічні характеристики в області низьких частот обертання мають методи, що ґрунтуються на використанні інформації про тривалість періоду  $T_x$  на виході частотного датчика швидкості. Такі вимірювання ми назвали вимірюваннями миттєвих значень.

Проте при вимірюванні високих частот обертання ми отримуємо велику похибку квантування:

$$\delta_{КМЗ} = \frac{n_x \cdot Z}{f_0 \cdot 60} \cdot 100 \%,$$

де  $f_0$  – частота квантуючих імпульсів.

Отже для отримання широкого діапазону вимірювань ми використовуємо переваги цифрових тахометрів середніх і миттєвих значень. Однак для спільного використання розглянутих цифрових методів вимірювання необхідно визначити критичну частоту обертання  $n_{ХК}$ , яка може бути вихідною інформацією для перемикання структури тахометра.

Порівнявши похибку квантування цифрових тахометрів середніх і миттєвих значень

$$\delta_{КСЗ} = \delta_{КМЗ},$$

визначимо критичну частоту обертання

$$n_{ХК} = \frac{60}{Z} \cdot \sqrt{\frac{t_0}{T_0}}.$$

Аналіз одержаної залежності приводить до висновку, що  $n_{ХК}$  залежить від таких параметрів: частоти квантуючих імпульсів і тривалості еталонного часового інтервалу  $T_0$ ; числа штрихів  $Z$  частотного датчика швидкості.

Якщо  $n_x < n_{xk}$ , то доцільніше застосувати структуру цифрового тахометра миттєвих значень. У протилежному випадку оптимальним рішенням буде використання цифрового тахометра середніх значень.

Для реалізації даного алгоритму вимірювання частоти обертання стає можливим використання частотного вимірювального каналу з мікропроцесорним управлінням при доповненні апаратних засобів датчиком частоти обертання, а програмної частини – відповідними програмами визначення  $n_x$  і  $n_{xk}$ .

Структурна схема МПС частоти обертання наведена на рис. 5.1. Вона складається з елементів: датчика швидкості ДШ, частотного вимірювального каналу, апаратного формувача еталонного часового інтервалу  $T_0$ , який реалізований на програмованому таймері ПТ і мікропроцесорній системі МПС.

Спочатку задається користувачем частота квантуючих імпульсів, тривалість еталонного часового інтервалу  $T_0$ , число штрихів  $Z$  датчика швидкості та визначається  $n_{xk_0}$ . Припустимо, що вимірювана частота обертання  $n_x = n_{xk_0}$ . У цьому разі встановлюється режим роботи цифрового тахометра миттєвих значень. Програмований таймер у цьому режимі роботи МПС участі не бере.

Датчик швидкості поєднаний із вихідним валом об'єкта вимірювання і перетворює частоту обертання  $n_x$  на частоту слідування імпульсів  $f_x$ , яка під управлінням програмного драйвера вимірюється частотним каналом, а значення інформативного параметра  $T_x$  запам'ятовуються за певною адресою в оперативному запам'ятовуючому пристрої мікропроцесорної системи.

Частота обертання:

$$n_{xi} = \frac{60}{T_{xi} \cdot Z},$$

де  $T_{xi}$  – значення періоду, одержані в результаті вимірювання.

За умови  $n_x > n_{xk}$  система автоматично перемикається на режим цифрового тахометра середніх значень. У програмований таймер записується код, що відповідає заданій тривалості еталонного часового інтервалу  $T_0$ .

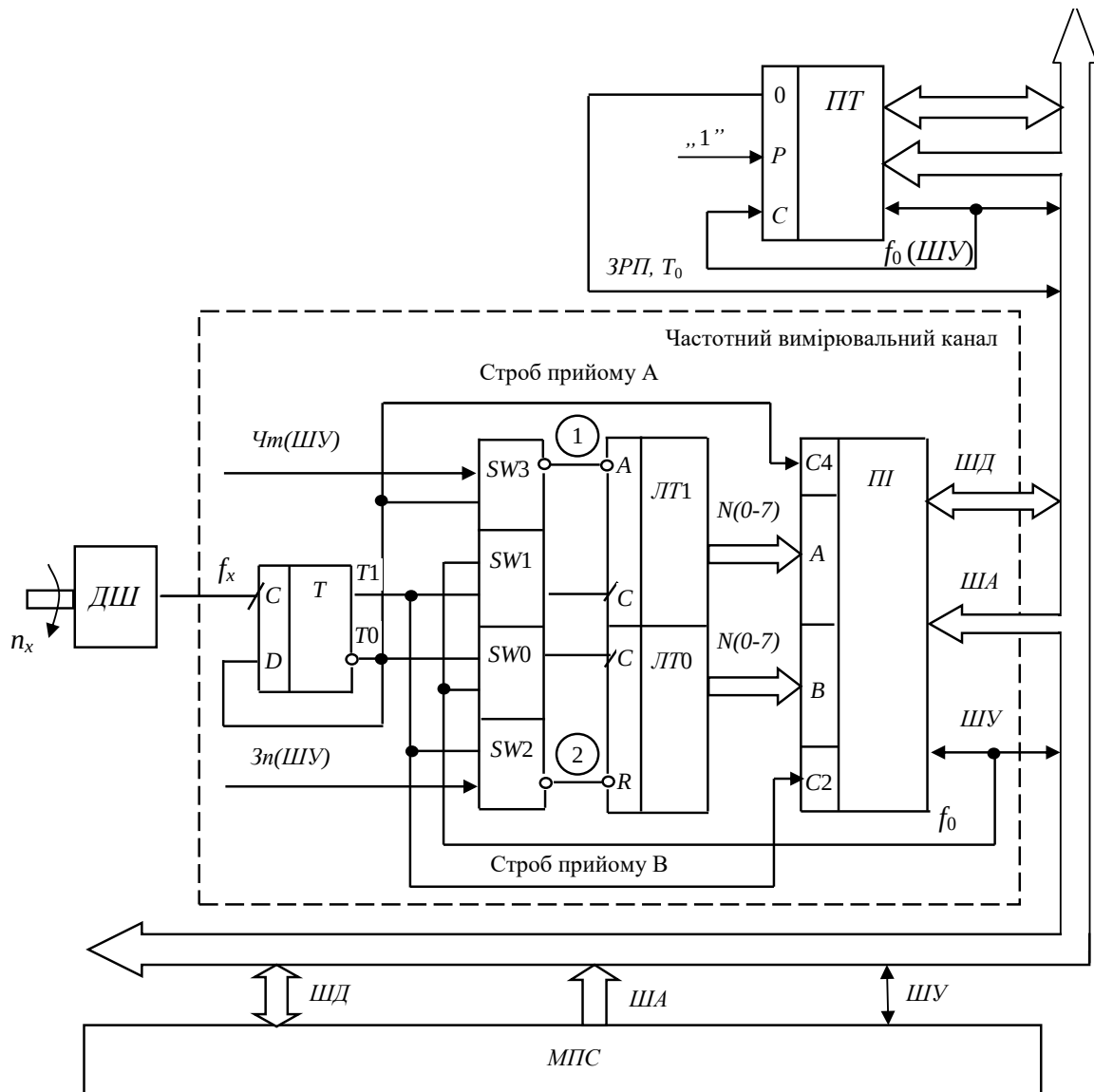


Рис. 5.1. Структурна схема МПС частоти обертання

Електронні ворота  $T_0$  формуються програмованим таймером з моменту запису в один з його лічильників коду до моменту появи на його виході сигналу ЗПР.

За цей проміжок часу підраховується кількість імпульсів на прямому й інверсному виходах тригера  $T$ . Частота обертання в цьому режимі роботи МПС:

$$n_{x_i} = \frac{f_{x_i} \cdot 60}{T_{x_i} \cdot Z},$$

де  $f_{x_i}$  – значення частоти, одержані в результаті вимірювань.

Таким чином, для реалізації даної системи, нам потрібно знати рівняння перетворення датчика  $f_x = F(x)$ , який будемо використовувати при вимірюваннях у широкому діапазоні швидкостей.

## **5.2. Мікропроцесорна система вимірювання пускового моменту електродвигунів**

Пусковий момент – дуже важлива характеристика електроприводу центробіжних насосів.

Опишемо роботу системи на прикладі асинхронного двигуна. Обертальний момент такого двигуна при короткому замиканні (пусковий момент  $M_n$ ) залежить від положення ротора щодо статора; при провертанні ротора на одне зубкове ділення він змінюється між деякими найбільшим і найменшим значеннями.

Під коротким замиканням асинхронного двигуна розуміють режим живлення обмотки статора при замкненому накоротко і загальмованому роторі.

Як вже зазначалось раніше, залежність пускового моменту асинхронного двигуна від кутового положення його ротора зумовлюється паразитними синхронними моментами, які визначаються явищами синхронізму просторових гармонік МДС і поля при нерухомому роторі. Через синхронні паразитні моменти при нерухомому роторі з'являються характерні коливання пускового моменту в функції кута повороту ротора. Наявні аналітичні способи визначення пускового моменту вимагають знання багатьох

параметрів, правильний облік впливу яких пов'язаний із значними труднощами.

Тому для вимірювання пускового моменту пропонується спосіб вимірювання, що може виконуватись у наступній послідовності:

1. Вимірюють силу опору  $\Delta Q_{ci}$  у функції кута повороту ротора  $\alpha$  приводного двигуна при відімкненому від електричної мережі випробуваному електродвигуні за один повний оберт і записують одержані значення в оперативний запам'ятовуючий пристрій комп'ютера (ОЗП).

2. Вимірюють силу, пропорційну пусковому моменту, залежно від кута повороту ротора за другий повний оберт приводного двигуна при підімкненому до електричної мережі випробуваному електродвигуні і також записують отримані значення  $Q_{ui}$  в ОЗП. При цьому на кожному значенні кута повороту ротора  $\alpha_i$  виконують не одне, а  $k$  вимірювань для того, щоб отримати середньоарифметичні значення величин  $\Delta Q_{ci}$  і  $Q_{ui}$ .

3. Виконують корекцію результатів вимірювань і визначають дійсне значення сили, пропорційної пусковому моменту:

$$Q_{di} = Q_{u_{ср}i} - \Delta Q_{c_{ср}i}.$$

4. Обчислюють  $i$ -те значення пускового моменту при відповідному кутовому положенні ротора ВД:

$$M_{ni} = Q_{di} \cdot l.$$

5. Виводять числові значення пускового моменту і кута повороту на екран монітора і будують на реєструючому приладі залежність  $M_n = f(\alpha)$ .

6. Визначають мінімальне значення  $M_{n_{min}}$  і відповідний йому кут повороту  $\alpha$ .

На рис. 5.2. показано структурну схему, яка реалізує запропонований спосіб вимірювання пускового моменту електродвигунів. Вимірювальна система містить випробувальний стенд, аналоговий вимірювальний канал

(АВК), частотний вимірювальний канал (ЧВК) і мікропроцесорну систему (МПС).

Випробувальний стенд містить випробуваний двигун ВД, закріплений на основі. Ротор приводного двигуна ПД встановлено в підшипники, які закріплені в основі так, що корпус і статор ПД можуть вільно провертатись відносно ротора. Вільний кінець валу ВД муфтою ЗМ з'єднується з валом приводного двигуна. Важіль В закріплений на корпусі статора ПД і з'єднаний з ємнісним датчиком сили ЄДС. Вихід датчика сили підімкнено до входу аналогового вимірювального каналу АВК. Вал приводного двигуна з'єднано з входом датчика кута ДК. Вихід ДК з'єднано зі входом частотно-вимірювального каналу ЧВК. Управління приводним і випробуваним електродвигунами здійснюється через тиристорний комутатор ТК.

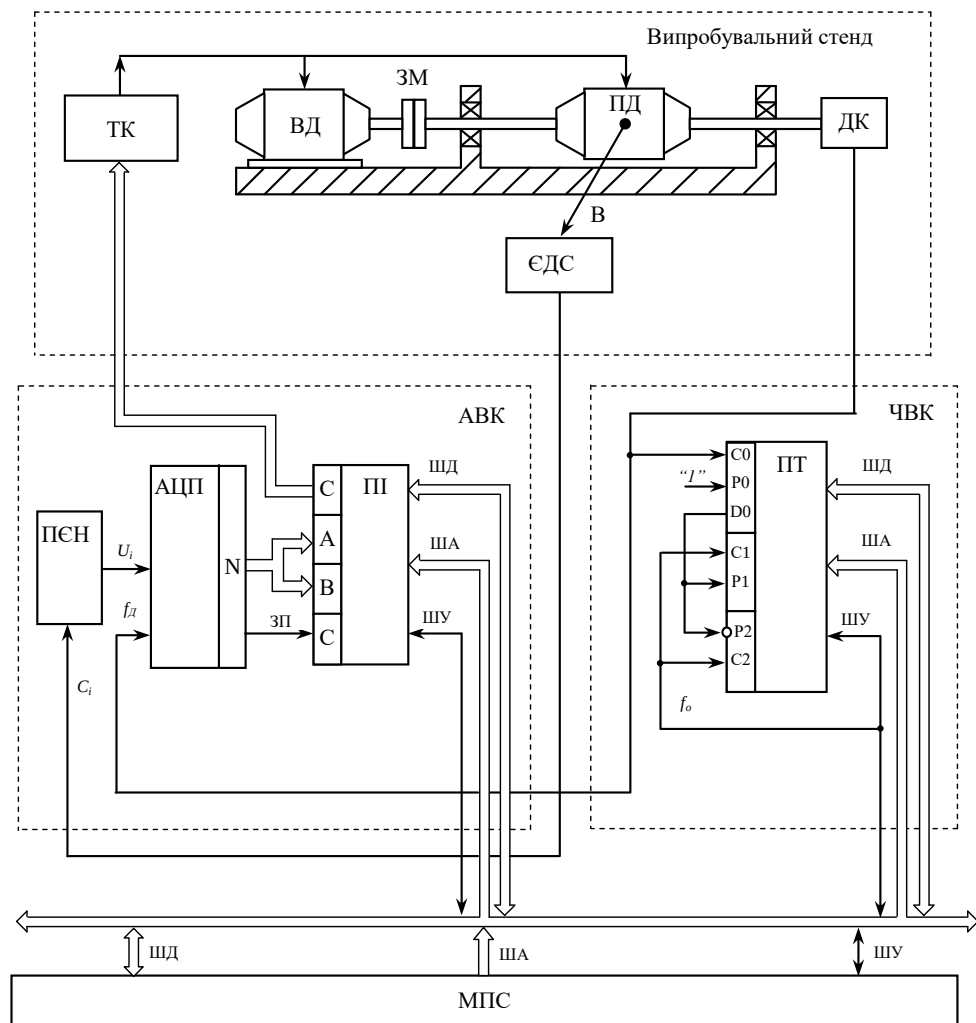


Рис. 5.2. Структурна схема вимірювальної системи пускового моменту

Аналоговий вимірювальний канал містить перетворювач ємність-напруга ПЄН, аналогово-цифровий перетворювач АЦП і паралельний інтерфейс ПІ. Порти А і В паралельного інтерфейса призначені для узгодження виходів АЦП із мікропроцесорною системою, а через порт С здійснюється управління тиристорним комутатором.

Частотно-вимірювальний канал реалізовано на програмованому таймері ПТ. Лічильник ЛТ0 програмованого таймера виконує функції пристрою виділення періоду, а лічильники ЛТ1 і ЛТ2 – вимірювача кута повороту  $\alpha$ . Запуск „ЗП” аналого-цифрового перетворювача здійснюється імпульсами  $f_d$  з виходу датчика кута.

Мікропроцесорна вимірювальна система пускового моменту працює під управлінням програмного забезпечення згідно з алгоритмом, наведеним на рис. 5.3.

Перед вмиканням приводного двигуна в оперативному запам'ятовуючому пристрої МПС встановлюються початкова адреса і довжина буфера, в якому будуть зберігатися числові значення сили  $Q_{ci}$ . Потім МПС переходить на підпрограму управління приводним двигуном.

Приводний двигун приводить в обертальний рух через муфту ротор випробуваного двигуна. При цьому на роботу КВС впливають дисипативні сили, сумарне значення яких  $\Delta M_c = \Delta Q_c \cdot l$ .

Сила  $\Delta Q_c$  створює момент опору  $\Delta M_o$  відносно осі ротора приводного двигуна, який передається на його статор і за допомогою важеля з довжиною плеча  $l$  діє на ємнісний датчик сили. На виході останнього з'являється напруга  $U_i$ , пропорційна силі опору  $\Delta Q_o$ , яка через аналоговий вимірювальний канал записується в буфер оперативного запам'ятовуючого пристрою МПС. Момент опору  $\Delta M_o$  вносить систематичну похибку при вимірюванні  $M_n$ :

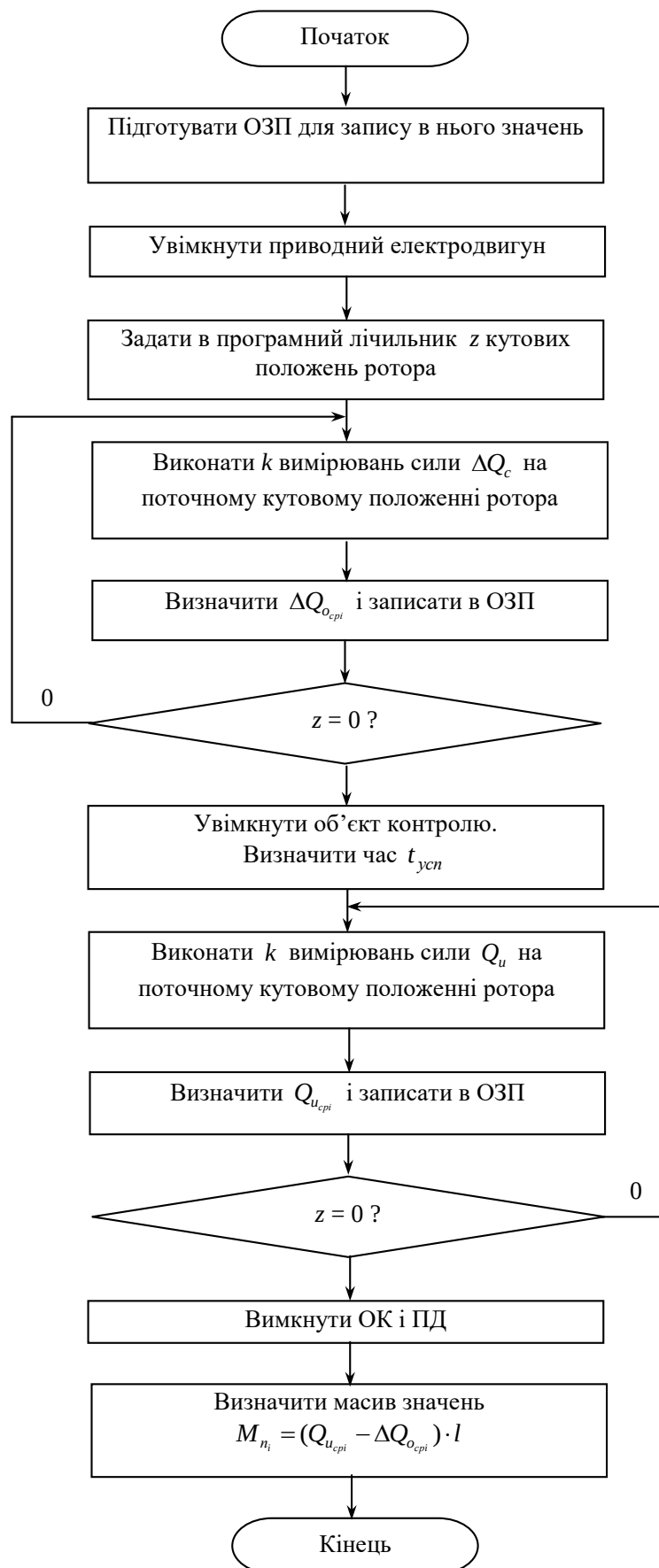


Рис. 5.3. Алгоритм визначення пускового моменту електродвигуна

$$\Delta M_o = (\Delta Q_{ВД} + \Delta Q_{ПД} + \Delta Q_{Ж} + \Delta Q_{П} + \Delta Q_{ВД} + \Delta Q_{ВПД}) \cdot l$$

,

де  $\Delta Q_{ВД}$  – систематична похибка, що виникає від сил тертя  $\Delta Q_{ПД}$  у підшипниках відповідно ВД і ПД;  $\Delta Q_{Ж}$  – систематична похибка, зумовлена неідеальністю жорсткого з’єднання муфти і наспіввісністю при поєднанні роторів приводного і випробуваного двигунів;  $\Delta Q_{П}$  – систематична похибка, що виникає від сил тертя в підшипниках випробувального стенда;  $\Delta Q_{ВД}$ ,  $\Delta Q_{ВПД}$  – вентиляційні втрати випробуваного і приводного двигуна відповідно.

Однак систематична  $\Delta Q_o$  змінюється випадковим чином при повторних вимірюваннях. Для зменшення впливу випадкової складової похибки на кожному кутовому положенні  $\alpha_i$  ротора виконують не одне, а  $k$  вимірювань сили  $\Delta Q_o$ . Оскільки на результати вимірювань впливає значна кількість випадкових похибок, можна припустити, що густина розподілу  $\Delta Q_o$  підпорядковується нормальному закону. Щоб зменшити вплив випадкового шуму, використаємо класичний метод згладжування за алгоритмом середньоарифметичного із вмісту буфера ОЗП:

$$\Delta Q_{o_{сеп}} = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k Q_{ok}.$$

Після цього результат  $\Delta Q_{o_{сеп}}$  запам’ятовується, збільшується на одиницю адреси буфера сили опору і зменшується на одиницю вміст лічильника довжини буфера  $z$ .

Приводний двигун повертається на кут  $\alpha_2$  ротор випробуваного двигуна і сила опору  $\Delta Q_{o_2}$  діють на датчик сили через важіль. Тут механічна величина перетворюється у напругу, яка в АЦП аналогового вимірювального каналу перетворюється в цифровий код. Ця інформація через системну шину записується в буфер ОЗП. У такому стані ротора виконується також  $k$

вимірювань сили опору і обчислюється наступне значення  $\Delta Q_{o_{ср2}}$ . Результат запам'ятовується в наступній комірці ОЗП. І так триває до тих пір, поки приводний двигун не завершить перший повний оберт. У результаті цього в оперативному запам'ятовуючому пристрої сформується масив даних. При цьому адреса кожного елемента масиву, в якому зберігається поточне значення сили опору, відповідає поточному значенню кута повороту ротора ВД.

Після цього в момент проходження однієї з фаз мережі живлення через нуль тиристорний комутатор подає живлення на ВД. Через час, що дорівнює  $t_{yсп}$ , по завершенні перехідного процесу у вимірювальному перетворювачі починається вимірювання моменту на роторі випробуваного двигуна. При цьому на датчик діє сила  $Q_u$  і напруга  $U_i$  на виході датчика через аналоговий вимірювальний канал записується в другий буфер ОЗП мікропроцесорної системи.

По завершенні другого повного оберту ротора ВД останній обезструмлюється. Відмикається і приводний двигун. При цьому в ОЗП крім масиву  $\Delta Q_{o_{ср}}$  нагромаджується масив із  $z$  (число градацій модулятора датчика кута) значень  $Q_{u_{ср}}$ , також впорядкований за номером кутових положень.

Потім мікропроцесорна система обчислює значення пускового моменту в кожному з  $z$  кутових положень ротора:

$$M_{n_z} = (Q_{u_{ср z}} - \Delta Q_{o_{ср z}}) \cdot l,$$

Після цього програмно визначається мінімальне значення пускового моменту  $M_{n_{min}}$  і відповідний йому кут повороту. Величина  $M_{n_{min}}$  характеризує значення пускового моменту випробуваного електродвигуна. Можливе також виведення функціональної залежності  $M_n = f(\alpha)$  на зовнішні пристрої.

### 5.3. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи визначення механічних параметрів двигунів насосного обладнання

Загальна структурна схема автоматизованої системи контролю працездатності електродвигунів приведена на рис. 5.4. Вона являє собою поєднання двох розглянутих раніше схем, тому вони на рисунку показані двома окремими функціональними блоками, без розкриття їх внутрішньої структури.

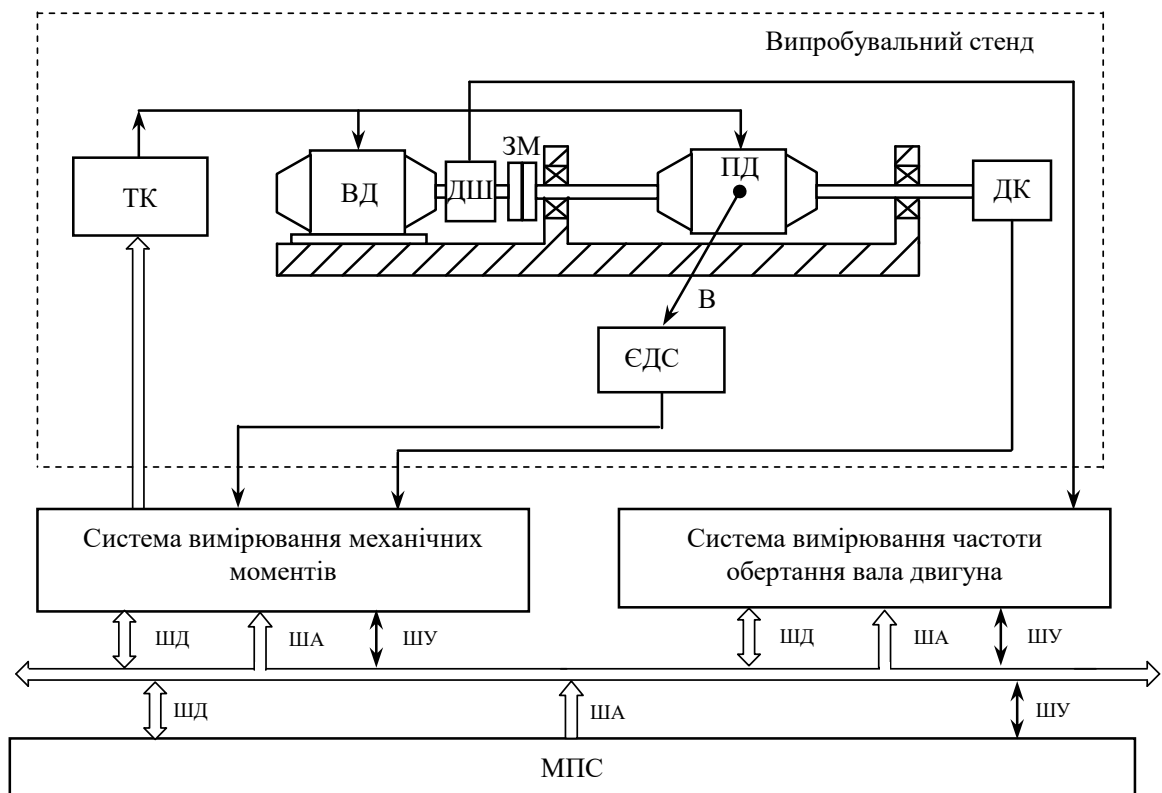


Рис. 5.4. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи для визначення механічних параметрів двигунів насосів.

Система вимірювання механічних моментів керує роботою тиристорного комутатора (ТК) перемикає режими роботи привідного двигуна ПД. Другий режим його роботи – режим навантажувальної машини. При цьому двигун працює в гальмовому режимі (противмикання). Двигун має бути попередньо протарованим – мати відому залежність  $M = f(U)$ . Регулюючи його напругу живлення ми регулюємо момент опору, який він створює випробуваному двигуну. Контролюючи при цьому за допомогою

системи вимірювання частоти обертання кутову швидкість  $\omega$  двигуна, ми знімаємо його механічну характеристику. Якщо ми будемо змінювати напругу живлення та частоту випробовуваного двигуна ми зможемо також оцінити жорсткість механічних характеристик.

Методика вимірювання пускового моменту та частоти обертання була приведена вище, тому тут не розглядається.

#### **5.4. Методика проектування мікропроцесорних вимірювальних систем**

Розглянуті мікропроцесорні вимірювальні системи можуть бути реалізовані як програмними, так і апаратними засобами. В зв'язку з цим розробка засобів вимірювання даного типу вимагає певного підходу (методики). Розглянемо методику проектування системи вимірювання пускового моменту.

Проектуванню функціональної схеми системи передують розробка структури і алгоритму. Далі проводять оцінку стандартних технічних засобів мікропроцесорної системи за такими параметрами: продуктивність центрального процесора (ЦП) і потрібна ємність запам'ятовуючого пристрою (ЗП). Потім переходять до розробки оригінальних апаратних засобів (АЗ) і прикладного програмного забезпечення (ПЗ).

Проектування АЗ і ПЗ виконується паралельно. Етап розробки АЗ пов'язаний із визначенням необхідних пристроїв (портів) введення-виведення, розподілом адресного простору, детальною проробкою функціональних вузлів і їх взаємозв'язку і закінчується розробкою функціональної схеми.

Етап розробки ПЗ включає в себе визначення складу прикладних програм, вибір мовних засобів, ініціалізацію АЗ, організацію діалогового режиму роботи, розробку драйверів аналогового і (або) частотного вимірювальних каналів, попередню і кінцеву обробку вимірювальної

інформації, організацію файлової структури результатів вимірювання, тестового забезпечення АЗ.

Після розробки функціональної схеми здійснюється проектування схем електричних принципів і пакету прикладних програм. Проводиться комплексне налагоджування АЗ і ПЗ. Виконують експериментальні дослідження, метрологічну атестацію і обробку результатів вимірювання.

Останнім етапом є розробка конструкторської і експлуатаційної документації, методики атестації і повірки засобів вимірювання.

**Оцінка продуктивності мікропроцесорної системи.** Заявками на обслуговування в розглядуваній системі є вимірювальна інформація, що надходить на обробку з виходу ємнісного датчика сили в частоту  $f_d$ . Частота проходження запускаючих імпульсів на вході аналого-цифрового перетворювача

$$f_{3П} = \frac{n Z k}{k_0},$$

де  $n$  – частота обертання приводного двигуна;  $Z$  – число градацій модулятора датчика кута;  $k$  – кількість вимірювань на одному кутовому положенні ротора;  $k_0$  – коефіцієнт переліку лічильника ЛІТД програмованого таймера частотного вимірювального каналу.

Період, проходження імпульсів ЗП, що генеруються апаратними засобами,

$$T_0^{AZ} = k_0 \cdot 60 / n Z k.$$

Максимальний час, необхідний для одержання одного виміряного значення програмними засобами,

$$T_0^{ПЗ} = T_B + T_n^{обр} + T_{виз}.$$

Час вимірювання  $T_B$  мікропроцесорного засобу

$$T_B = T_{обм} + T_{АЦП},$$

де  $T_{обм}$  – час обміну інформацією між аналоговим вимірювальним каналом і центральним процесором МПС;  $T_{АЦП}$  – час перетворення аналого-цифрового перетворювача.

Час попередньої обробки  $T_n^{обп}$  необхідний для перетворення вимірювальної інформації до вигляду, який відповідає одному з типів подання чисел у МПС.

Час обробки інформації визначається з раніше розглянутого алгоритму вимірювання пускового моменту:

$$T_{обп} = \sum Q_{ui} + \sum \Delta Q_{oi} + \frac{\sum \bar{Q}_{ui} - \sum \Delta \bar{Q}_{oi}}{k} + \frac{360\alpha}{Z} + WR_{озп}.$$

де  $\sum Q_{ui}$  і  $\sum \Delta Q_{oi}$  – час виконання операції підсумовування відповідно вимірюваних значень  $Q_{ui}$  і силу опору  $\Delta Q_{oi}$ ;  $\frac{360\alpha}{Z}$  – час виконання операції визначення дійсного значення кута повороту;  $WR_{озп}$  – час, необхідний для запису одного з дійсних значень в ОЗП;  $\frac{\sum \bar{Q}_{ui} - \sum \Delta \bar{Q}_{oi}}{k}$  – час виконання операції визначення дійсного значення пускового моменту.

Час виведення результатів вимірювання

$$T_{вив} = T_{нев} \cdot N \cdot b,$$

де  $T_{нев}$  – час тривалості циклу обміну пристроєм введення-виведення і центрального процесора;  $N$  – кількість вимірювань за один оберт приводного двигуна;  $b$  – кількість байт в одному рядку таблиці результатів вимірювання.

Таким чином, час, необхідний для одержання одного вимірюваного значення пускового моменту складає:

$$T_o^{nc} = T_{обм} + T_{АЦП} + \sum Q_{ui} + \sum \Delta Q_{ci} + \frac{\sum \bar{Q}_{ui} - \sum \Delta \bar{Q}_{ci}}{k} + \frac{360\alpha}{Z} + T_{нев} N b + T_n^{обп} + WR_{озп}.$$

Якщо умова  $T_o^{PC} \leq T_o^{AC}$  може бути виконана, то можливий режим реального часу. В противному разі необхідно:

- вибрати центральний процесор МПС з великою швидкістю;
- процес вимірювання і обробки інформації поділити, на першому етапі виміряти і запам'ятати усі значення в ОЗП, а на другому – обчислити і вивести результати.

Є можливість виконати оцінювальний розрахунок параметрів  $T_o^{AC}$  і  $T_o^{PC}$ . Період імпульсів, що генеруються АЗ (при цьому параметри системи приблизно можна прийняти:  $k_0=5$ ;  $Z=2500$ ;  $n=14$  об/хв;  $k=16$ )

$$T_o^{AC} = k_0 \cdot 60 / n Z k$$

Після цього потрібно вибрати мікропроцесор, який би задовольнив вищезгаданим умовам.

### 5.5. Програмна реалізація математичної моделі системи

Розроблено програмне забезпечення, мовою TurboPascal у вигляді пакета програм, що складається з чотирьох файлів:

IM\_MAIN.EXE

GRAPH.TPU

IM\_TPU\_.TPU

EGAVGA.BGI

Пакет програм дозволяє дослідити роботу системи, тобто здійснити вимірювальний експеримент. Опис та текст програм приведені в дод. А.

Програма написана на основі приведених алгоритмів та методики математичного моделювання (яка розглядалась в розд. 3). Вона дозволяє в процесі дослідження змінювати деякі параметри системи (наприклад напругу живлення та навантаження на валу двигуна), виводити звіт роботи в вигляді файлу.

**Висновки.** Показано, що мікропроцесорна система контролю працездатності електродвигунів складається з двох частин:

- а) блок вимірювання частоти обертання двигунів;
- б) блок вимірювання механічних моментів двигунів, зокрема пускового моменту.

Це дозволяє знімати механічні характеристики двигунів, оцінювати їх жорсткість, вимірювати пускові моменти та швидкості обертання, в залежності від програми випробувань.

Дана система створювалась з метою прискорення здійснення випробувань електродвигунів, шляхом автоматизації всіх вимірювальних операцій із застосуванням ЕОМ. Проаналізовані можливості підвищення точності вимірювання механічних моментів, шляхом зменшення кількості виникаючих похибок (похибка оператора, похибка від впливу синхронних моментів) та зниження рівня існуючих в системі похибок (випадкова похибка, похибка від впливу сили тертя, похибка неспіввісності валів випробовуваної та приводної машини), суттєво знижена похибка при вимірюваннях частоти обертання двигунів, за рахунок використання мікропроцесорного тахометра зі змінною структурою.

Аналіз також показав, що як наслідок зменшення часу підготовчих операцій (підключення випробовуваного електродвигуна до системи) можливо отримати підвищену точність вимірювань. Для цього потрібно з'єднати вали і підключити випробовуваний двигун до тиристорного комутатора. Вимірювальні операції в системі не потребують з'єднання вала двигуна з додатковими датчиками зусиль (важелями) та швидкості, як це мало місце в існуючих системах.

## ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В процесі виконання роботи було проведене комплексне дослідження.

1. Дослідження ситуації з експлуатацією та ремонтом промислового насосного обладнання на сьогоднішній день. Зокрема було відвідано декілька сайтів виробників насосного обладнання та комплектуючих до. Це такі виробники як компанія – світовий лідер в інноваціях Grundfoss, компанія DAB, італійська компанія Spegoni. Також були відвідані сайти компаній, які займаються продажем та сервісним супроводом насосного обладнання. До таких компаній відносяться і інженерні компанії, наприклад Житомирська «Магія комфорту». На базі компанії діє авторизований сервісний центр світового виробника насосного обладнання – компанії Grundfoss. Саме потреби цієї компанії наштовхнули на розробку інформаційно – вимірювальної системи для дослідження двигунів насосного обладнання. Під час проходження практики на базі цього підприємства, були зроблені висновки про основні різновиди конструкцій двигунів, які використовуються в насосному обладнанні, способи їх діагностики та ремонту, а отже і основні характеристики які потрібно контролювати після ремонту або заміни двигуна аналогічним, але іншого виробника. До того ж, подібні системи можуть широко застосовуватись і при серійному виробництві електродвигунів, оптимізуючи процес фінальних випробувань машин, перед їх постачанням замовникам. Цей факт має ще більше розширити сферу використання комп'ютеризованих інформаційно – вимірювальних систем.

2. Дослідження основних параметрів та характеристик асинхронних електродвигунів. В ході цього були досліджені переваги та недоліки основних двигунів, проаналізований їх аналітичний опис, вивчені практичні труднощі, що супроводжують експлуатацію двигуна та вимірювання його параметрів. Це наприклад різноманітні нерівномірності механічних характеристик та частоти обертання. На основі цих досліджень були

зроблені висновки щодо величин які необхідно контролювати, проведений попередній аналіз та обґрунтування методів вимірювання. Висновком стало те, що для забезпечення високої якості результатів ремонту, наприклад, а відповідно і механічної роботи двигуна необхідно контролювати його механічні характеристики.

3. Дослідження та обґрунтування, на основі попереднього аналізу, методів вимірювання. Основною задачею цього розділу роботи стало вимірювання необхідних параметрів електродвигунів при застосуванні мінімальної кількості обладнання. Тут були розглянуті методи вимірювання частоти обертання валу двигуна і тут же запропонований спосіб підвищення точності цього вимірювання, шляхом зміни структури тахометра і вимірюванні середньої або миттєвої швидкостей. При розгляді методу вимірювання механічних моментів, були також запропоновані методи підвищення точності та швидкості вимірювань шляхом автоматизації процесу випробувань двигунів.

4. Синтез, на основі попередніх та проведення додаткових досліджень, зокрема математичної моделі двигуна, структурної схеми вимірювальної системи. Система побудована на основі апаратних засобів обчислювальної техніки (АЦП, елементи комбінаційної та послідовнісної логіки) та програмних засобів, з використанням комп'ютера. Приведена структурна схема є загальним представленням і допускає заміну деяких апаратних засобів на програмні, при використанні мікропроцесора, що дозволить це. Також були розроблені алгоритми побудови програмної частини системи.

Система складається з двох складових частин:

- блок вимірювання частоти обертання двигуна;
- блок вимірювання пускового моменту.

Поєднання цих складових частин дозволяє вимірювати всі необхідні для вирішення поставлених задач величини. Зокрема блок вимірювання пускового моменту дозволяє вимірювати обертові механічні моменти.

Одночасне вимірювання механічного моменту і частоти дає змогу знімати механічні характеристики двигунів.

5. Створено програмне забезпечення для дослідження моделі системи на ЕОМ.

**Новизна результатів** отриманих в МАР полягає в наступному:

1. Запропоновано структуру та програмно-алгоритмічне забезпечення частотного вимірювального каналу комп'ютеризованої системи для визначення частоти обертання асинхронних електродвигунів.
2. Удосконалено методику та структурну схему установки для вимірювання пускових моментів та контролю працездатності асинхронних електродвигунів, що працюють з центробіжними насосами.

**Актуальність теми.** Підтвердженням актуальності теми може стати те, що навіть при серійному виробництві двигунів виробничий процес містить у собі етап випробувань електричних машин. Дослідження показали, що трудомісткість контрольних операцій складає до 13% трудомісткості виготовлення електродвигунів. Середні норми часу на проведення приймально-здавальних випробувань однієї електричної машини середньої потужності складає 3...35 год (для різних типів машин). На проведення приймальних випробувань однієї електричної машини потрібно 48 ... 250 год. Середні норми часу на обробку результатів приймально-здавальних випробувань однієї машини складають 0,6...4 год, а на обробку приймальних випробувань – 40...90 год. Тому настільки висока трудомісткість проведення випробувань і обробки їх результатів змушує шукати шляхи автоматизації випробувань і використання комп'ютерів для їх обробки.

Дана робота націлена на розробку структури та принципів роботи інформаційно - вимірювальної системи електричних двигунів. Це дозволяє одержати об'єктивні та достовірні результати випробувань, прискорити

проведення контрольних вимірів і підвищити продуктивність праці. Комп'ютер використовуються не тільки для обробки результатів випробувань, але і для керування процесом випробувань, статистичного контролю та аналізу результатів випробувань.

## РЕКОМЕНДАЦІЇ

Дана інформаційно - вимірювальна система розроблена з метою впровадження на підприємствах та інженерних компаніях, які займаються монтажем, ремонтом та обслуговуванням насосного обладнання з електроприводом. Такі системи можуть знайти застосування для діагностики будь якого електроприводу і не обмежуватись лише насосами. Це особливо актуально при теперішньому розповсюдженні механізмів з електричним приводом, в тому числі і насосів.

Напрямок подальших досліджень може стати дослідження можливостей, при розробці відповідного програмного забезпечення, вимірювання в автоматичному режимі додаткових параметрів електричних машин, які розширять сферу використання контрольно-діагностичних систем. Також принципи вимірювання, реалізовані в даній системі, дозволяють на її основі будувати більш спеціалізовані системи дослідження електродвигунів, змінивши при цьому вхідні датчики і кінцеве програмне забезпечення, що виконує обробку результатів вимірювань.

Розроблена система може стати структурним доповненням іншої, більш складної інформаційно - вимірювальної системи, розширивши при цьому її можливості. Тому результати даної атестаційної магістерської роботи можуть знайти свою практичну реалізацію в компаніях та промислових підприємствах, що широко використовують насосне обладнання або виготовляють чи компонують електричні машини та насоси. Також система може знайти своє застосування: на електроремонтних підприємствах, в науково-дослідницьких сферах, для здійснення навчального процесу в вищих навчальних закладах тощо.

## ПЕРЕЛІК ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Grundfos. <https://product-selection.grundfos.com/ua/products/cr>
2. <https://sigma.ua/nasosy-poverkhnostnye/>
3. Вища математика Підручник / Домбровський В.А., Неміш В.М. за редакцією Шинкарика М.І. –Тернопіль: Видавництво Карп'юка, 2003 - 480с.
4. Турбо Паскаль 7.0 – К.: Видавництво BHV, 2000.– 432 с.
5. Ю.П. Колонтаєвський Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник. 2-е вид. / За ред. А.Г. Соскова. - К.: Каравела, 2009. - 416 с. ISBN966-8019-38-5. 416 с.
6. Плечистий Д.Е. Датчики: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. - Житомир: ЖІТІ, 2001 - 354с.
7. Плечистий Д.Е. Методичні вказівки по курсовій роботі "Електропривод загального призначення" з дисципліни "Електротехніка й електромеханіка" - Житомир : ЖІТІ, 2002. - 46 с.
8. Електричні машини та електропривод побутової техніки: Підручник / М.Г. Попович, Л.Ф. Артеменко, О.П. Бурмістенков та ін.; За ред. Д.Б. Головка, М.Г. Поповича.— 2-ге вид., стереотип. — К.: Либідь, 2004. — 352 с.
9. Сушицький В.А. Лекції з курсу „Математичне моделювання на електронних обчислювальних машинах”. Навчальний посібник.-Житомир: ЖІТІ, 1999.-108 с.
10. Математичне моделювання систем та процесів: Навчальний посібник/ П.М. Павленко, С.Ф. Філоненко, О.М. Чередніков, В.В. Трейтак .- К. : НАУ, 2017. - 392 с.
11. Електропривід: Підручник / Ю. М. Лавріненко, О. С. Марченко, П. І. Савченко, О. Ю. Синявський, Д. Г. Войтюк, В. П. Лисенко; За ред. Ю. М. Лавріненка. видавництво «Ліра-К».-К., 2009.- 504 с.
12. <https://www.debem.com.ua/ukr/news/>
13. Коваленко І.О., Коваль А.М. Метрологія та вимірювальна техніка. — Ж.: ЖІТІ. — 2001.-456 с.

14. Колб Ант. А, Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – 2-е вид. перероб. і доп. –Д., Національний гірничий університет, 2011. – 540 с.

## **ДОДАТКИ**

## **Опис програмного забезпечення дослідження роботи електродвигунів**

Програмне забезпечення розроблене у вигляді пакета програм, що складається з чотирьох файлів:

IM\_MAIN.EXE

GRAPH.TPU

IM\_TPU\_.TPU

EGAVGA.BGI

### **ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ПРИЗНАЧЕННЯ**

Програма керування призначена для моделювання роботи та дослідження математичної моделі системи дослідження електродвигунів. Програма дозволяє керувати режимами роботи двигуна, змінювати параметри під час роботи і вести статистику роботи двигуна шляхом запису результатів у файл.

### **ВИКОРИСТОВУВАНІ ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ**

Для функціонування програми необхідна наявність IBM-сумісного комп'ютера.

### **ВИКЛИК І ЗАВАНТАЖЕННЯ**

Файлом, що виконується, у пакеті програм є файл IM-MAIN.EXE.

Після запуску програма видає коротку довідкову інформацію і пропонує ввести користувачеві робочу частоту і час моделювання роботи двигуна (у секундах).

Потім починається процес моделювання. На екрані з'являються осі координат: по осі абсцис - час ( $t$ , с), по осі ординат - кутова швидкість ( $\omega$ , радіан/с). Під час своєї роботи програма виводить графік залежності  $\omega(t)$ . Моделювання ведеться в реальному масштабі часу.

У процесі моделювання роботи двигуна в користувача є можливість змінювати деякі його параметри, для цього зарезервовані “гарячі” клавіші:

## Продовження додатку А

U - змінити напругу;

M - змінити момент на валу.

При натисканні “M” програма запропонує ввести значення моменту на валу двигуна.

При натисканні “U” програма запропонує ввести значення напруги двигуна.

При помилковому введенні будь-яких значень користувач у будь-який момент може скасувати введені числа шляхом натискання клавіші “ESC”.

Також у процесі моделювання користувачеві доступні наступні клавіші:

W - запис результатів у файл;

Q - негайний вихід із програми.

При натисканні на клавішу “W” програма зберігає результати моделювання у файлі LW.RES.

За допомогою клавіші “Q” можна негайно залишити програму, при цьому результати роботи не будуть збережені.

Після закінчення часу моделювання, заданого користувачем, програма записує протокол своєї роботи у файл LW.RES, якщо в процесі роботи цього не зробив користувач. Результати оформлені у виді таблиці.

Вхідними даними для програми є:

- робоча частота;
- час моделювання роботи двигуна (у секундах).

Інші параметри двигуна обговорені в самій програмі і виводяться екран при її запуску.

Вихідними даними програми є:

- графік залежності  $\omega(t)$ ;
- частота обертання вала двигуна;
- момент на валу двигуна;

## Продовження додатку А

- КПД;
- коефіцієнт потужності;
- живляча напруга;
- повідомлення про помилки програми.

## Протокол роботи програми IM-MAIN.EXE

Параметри двигуна:

Час моделювання: 1 с

Частота мережі живлення: 50 Гц

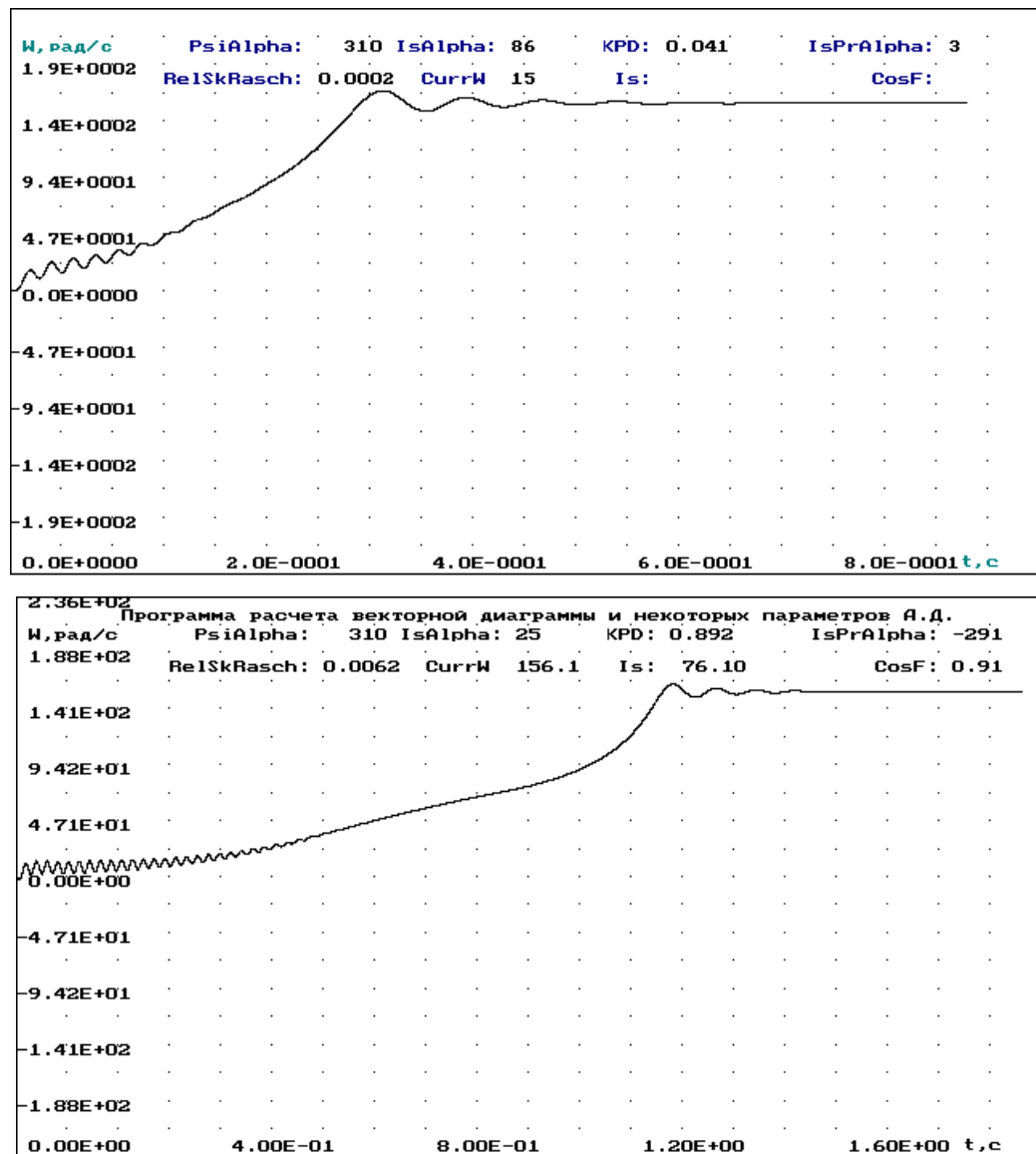


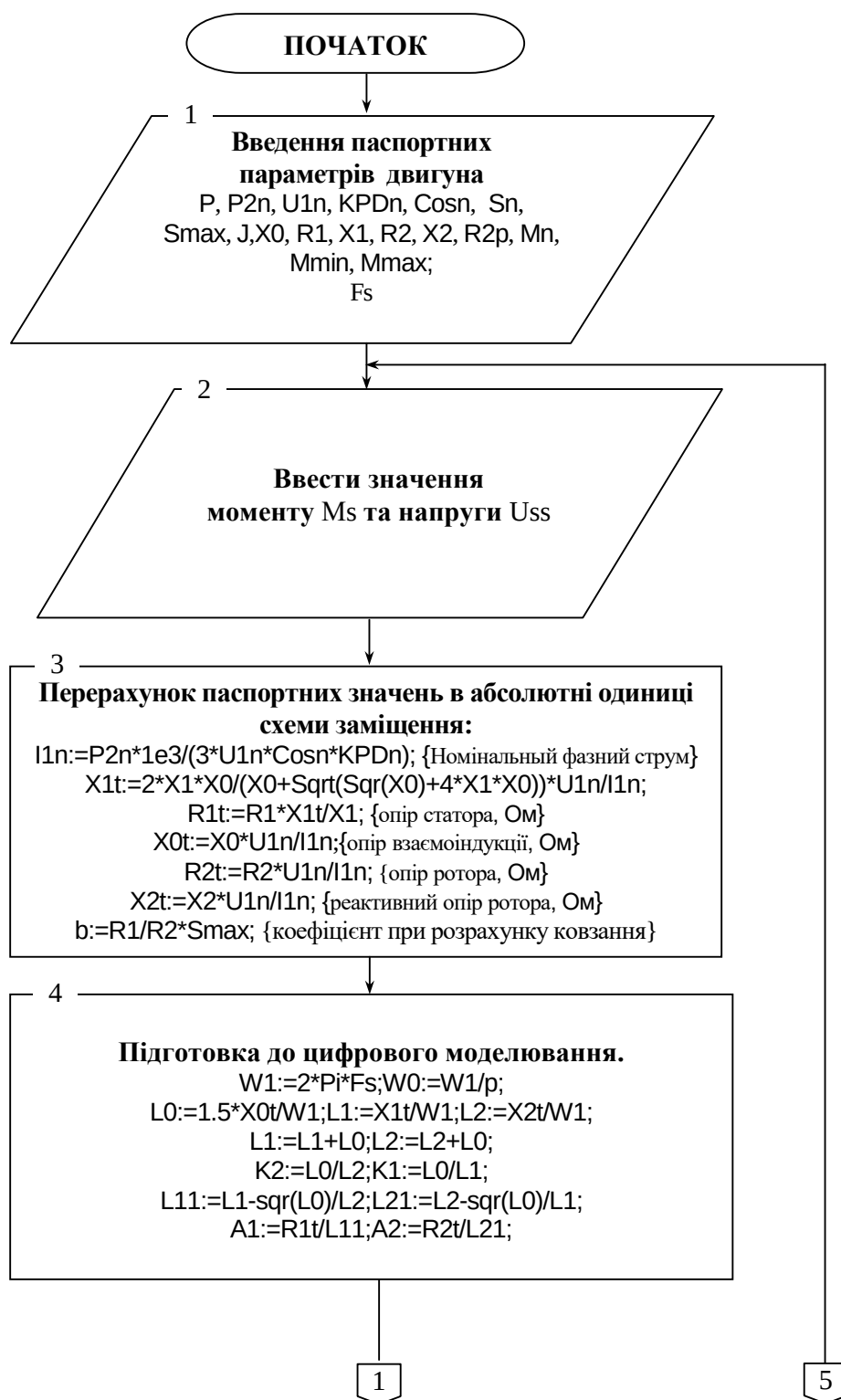
Рис. 1. Екранні форми залежності частоти обертання двигуна від часу

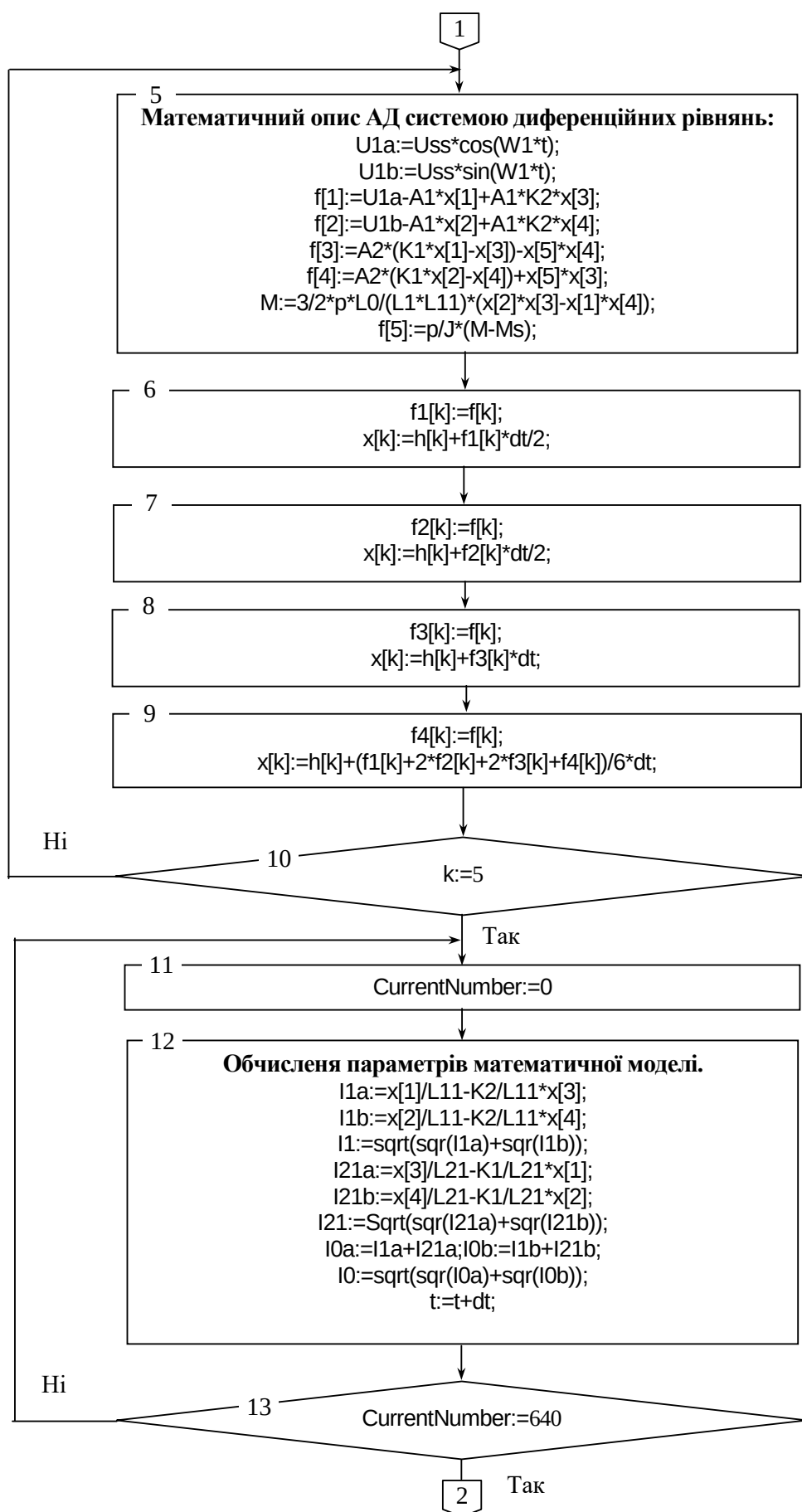
## ПОВІДОМЛЕННЯ КОРИСТУВАЧУ

Для оперативного контролю за процесом моделювання роботи в програмі передбачено вивід на екран графічної залежності  $\omega(t)$ , частоти обертання вала двигуна, моменту на валу двигуна, ККД, коефіцієнта потужності, напруги живлення тощо.

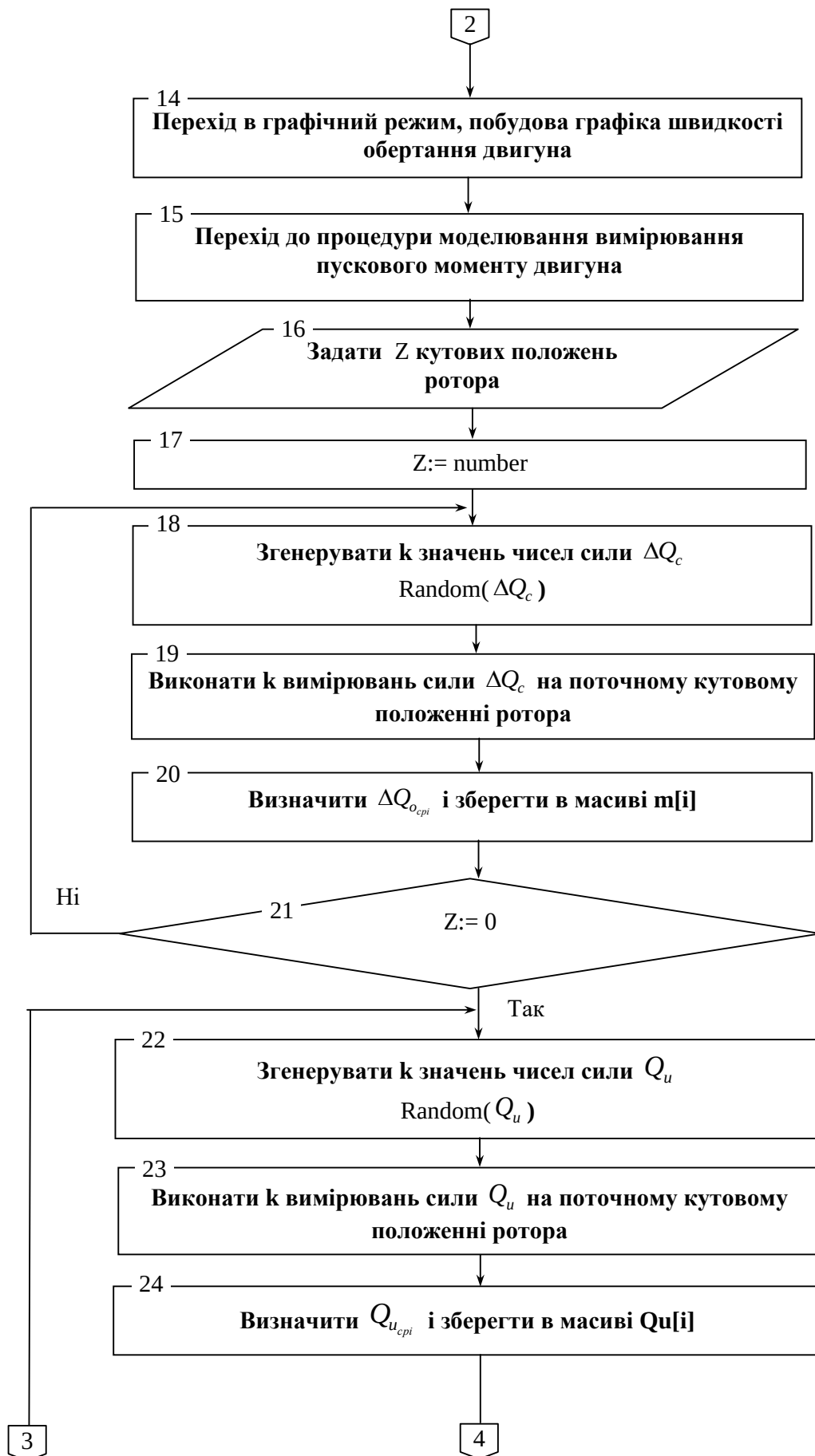
Користувач також одержує інформацію про неправильно введені з клавіатури дані.

## Алгоритм роботи програми дослідження електродвигунів

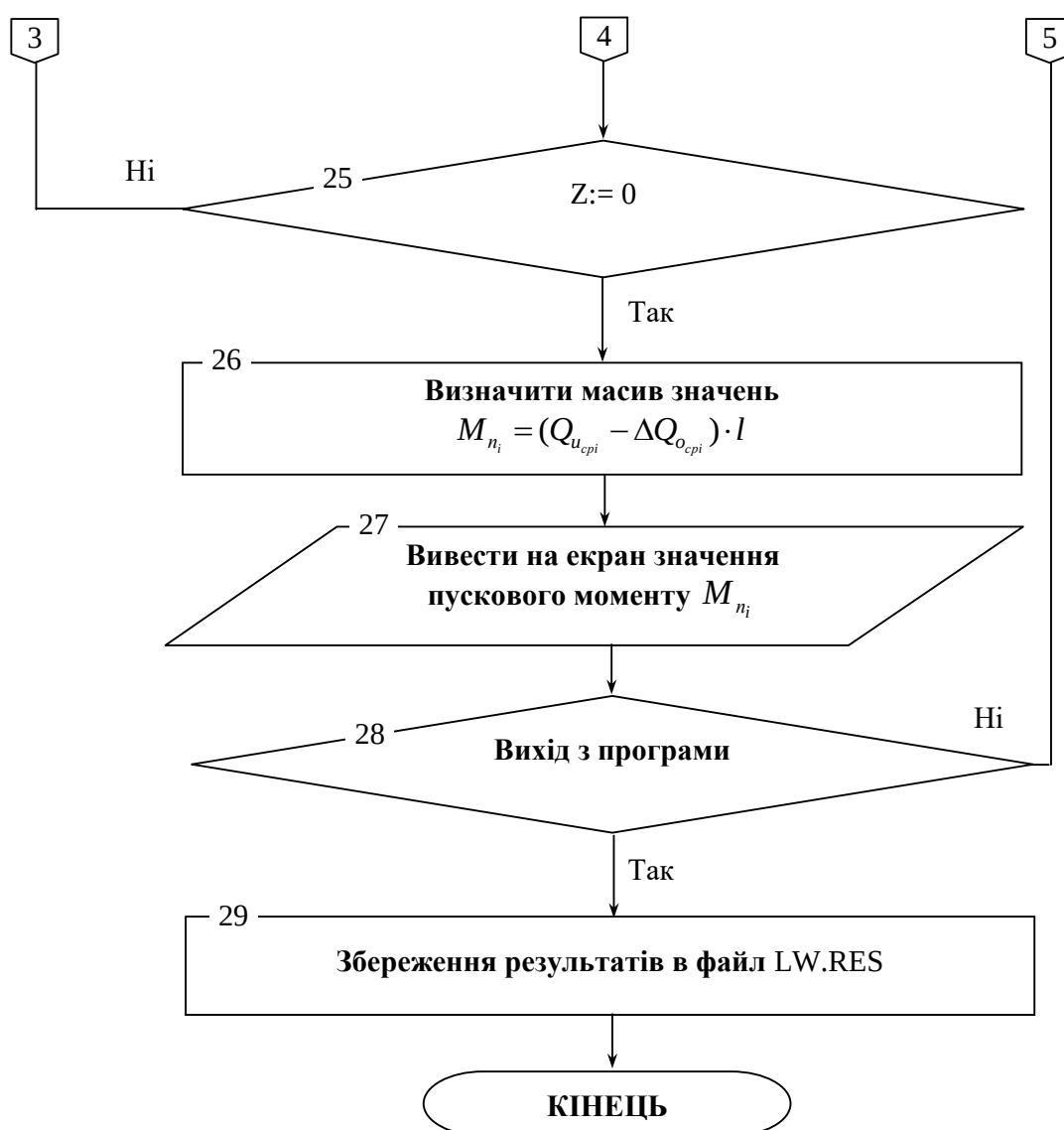




## Продовження додатку Б



## Продовження додатку Б



### **Опис алгоритму роботи програми дослідження електродвигунів**

Вище приведений алгоритм, яким описується програма моделювання системи контролю працездатності електродвигунів. Блоком 1 здійснюється об'ява змінних в програмі та встановлюються паспортні значення асинхронного двигуна. Блок 2 вводить значення моменту (навантаження на валу) та напругу живлення. За замовчуванням двигун працює в режимі холостого ходу. Блоки 3 та 4 призначені для перетворення паспортних даних в значення системи диференціальних рівнянь (Т – подібної схеми заміщення). Блок 5...10 – вирішення системи диференціальних рівнянь і знаходження невідомих  $X$ , які далі використовуються для моделювання дослідження двигунів. Рівняння вирішуються методом Рунге-Куты і задані в циклі. Цикл триває до тих пір, доки не будуть знайдені всі коефіцієнти. 11...14 блоки – обчислення параметрів математичної моделі та побудова графіка швидкості на екрані. З 15 по 27 блоки розкривають алгоритм моделювання системи вимірювання пускового моменту. 28, 29 блоки організовують збереження даних в файл та вихід з програми. Інакше пропонується ввести нове значення навантаження на валу двигуна та продовжити дослідження.

### Вихідний лістинг програми дослідження електродвигунів

```

program lw(lw);

uses crt,dos,graph,im_tpu;

const {ПАРАМЕТРИ "Г-ПОДІБНОЇ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ"}
  p=2;      {ЧИСЛО ПОЛЮСІВ}
  P2n=7.5;   {НОМІНАЛЬНА ПОТУЖНІСТЬ, кВт}
  U1n=220;   {НОМІНАЛЬНА ФАЗНА НАПРУГА, В}
  KPDn=0.925; {НОМІНАЛЬНИЙ КПД}
  Cosn=0.89; {НОМІНАЛЬНИЙ Cos(f)}
  Sn=0.016;  {НОМІНАЛЬНЕ ВІДНОСНЕ КОВЗАННЯ, о.е.}
  Smax=0.1;  {КРИТИЧНЕ ВІДНОСНЕ КОВЗАННЯ, о.е.}
  J=0.6;     {МОМЕНТ ІНЕРЦІЇ РОТОРА, кг*м^2}
  X0=4.6;    {ОПІР ВЗАЄМОІНДУКЦІЇ, о.е.}
  R1=0.037;  {АКТИВНИЙ ОПІР СТАТОРА, о.е.}
  X1=0.1;    {ІНДУКТИВНИЙ ОПІР СТАТОРА, о.е.}
  R2=0.017;  {АКТИВНИЙ ОПІР РОТОРА, о.е.}
  X2=0.16;   {ІНДУКТИВНИЙ ОПІР РОТОРА, о.е.}
  R2p=0.036; {ПУСКОВИЙ ОПІР РОТОРА, о.е.}
  Mn=9550*P2n/(3e3/p*(1-Sn));{НОМІНАЛЬНИЙ МОМЕНТ, н*м}
  Mmin=1*Mn; {МІНІМАЛЬНИЙ МОМЕНТ, н*м}
  Mmax=2.5*Mn; {КРИТИЧНИЙ МОМЕНТ, н*м}

type StringSwitch=(ST11,ST12,ST13,ST14,ST15,ST16,ST17,DATA1,DATA2,
  ST21,ST22,ST23,ST24,ST25,ENDT1,ENDT2);

var t,dt,U1a,U1b,M,A1,A2,K1,K2,L11,L21,L1,L2,L0,W1,EndT,SpeedScale,
  I0a,I0b,I1a,I1b,I21a,I21b,KPD,CosF,I1,I21,W0,Psi1,Psi2,Psi0,s,I0,
  I1n,X1t,R1t,X0t,R2t,X2t,R2pt,Smin:real;

  RepeatNumber,CurrentNumber,CurrentRepeat,i,k,Ms,Uss,PsiAlpha,IsAlpha,
  IsPsirAlpha,PsisRAngle,UssAbsoluteAngle,PsirRAngle,IsRAngle,IrsRAngle,
  PsioRAngle,Fs:integer;

x,f,h,f1,f2,f3,f4:array[1..5] of real;

StringKPD,StringPsiAlpha,StringIsAlpha,StringIsPsirAlpha,StringCurrW,
StringAlphaRasch,StringIs,StringCosF, VectorString,VectorString0:string;

color:word;

Result:text;

{ПЕРЕРАХУНОК ПАСПОРТНИХ ДАНИХ В АБСОЛЮТНІ ОДИНИЦІ "Т"-ПОДІБНОЇ СХЕМИ}
procedure ReCalculation;
var b:real;

```

## Продовження додатку В

```

begin
  I1n:=P2n*1e3/(3*U1n*Cosn*KPDn); {НОМІНАЛЬНИЙ ФАЗНИЙ СТРУМ}
  X1t:=2*X1*X0/(X0+Sqrt(Sqr(X0)+4*X1*X0))*U1n/I1n;
  R1t:=R1*X1t/X1; {ОПІР СТАТОРА, Ом}
  X0t:=X0*U1n/I1n;{ОПІР ВЗАЄМОІНДУКЦІЇ, Ом}
  R2t:=R2*U1n/I1n;
  X2t:=X2*U1n/I1n;{ОПІР РОТОРА, Ом}
  R2pt:=R2p*U1n/I1n;
  b:=R1/R2*Smax;
  Smin:=Smax/Mmin*((1+b)*Mmax-b*Mmin+Sqrt((1+b)*(Mmax-Mmin)*((1-b)*Mmin+(1+b)*Mmax)));
end;

{ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ РІВНЯННЯ АД В ДВОФАЗНІЙ СИСТЕМІ КООРДИНАТ (a,b), НЕРУХОМІЙ ВІДНОСНО
СТАТОРА }
procedure Right_Part;
begin
  if s>smin then A2:=(R2t+(R2pt-R2t)*(S-Smin)/(1-Smin))/L21
    else A2:=R2t/L21;
  U1a:=Uss*cos(W1*t);
  U1b:=Uss*sin(W1*t);
  f[1]:=U1a-A1*x[1]+A1*K2*x[3];
  f[2]:=U1b-A1*x[2]+A1*K2*x[4];
  f[3]:=A2*(K1*x[1]-x[3])-x[5]*x[4];
  f[4]:=A2*(K1*x[2]-x[4])+x[5]*x[3];
  M:=3/2*p*L0/(L1*L11)*(x[2]*x[3]-x[1]*x[4]);
  f[5]:=p/J*(M-Ms);
  S:=(W1-x[5])/W1;
end;

{ МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД РУНГЕ-КУТА 4 ГО ПОРЯДКУ }
procedure Runge;
begin
  for k:=1 to 5 do h[k]:=x[k];
  Right_Part;
  for k:=1 to 5 do
    begin
      f1[k]:=f[k];
      x[k]:=h[k]+f1[k]*dt/2;
    end;
  Right_Part;
  for k:=1 to 5 do
    begin
      f2[k]:=f[k];
      x[k]:=h[k]+f2[k]*dt/2;
    end;
  Right_Part;
  for k:=1 to 5 do
    begin
      f3[k]:=f[k];
      x[k]:=h[k]+f3[k]*dt;
    end;
  Right_Part;
  for k:=1 to 5 do
    begin

```

## Продовження додатку В

```

        f4[k]:=f[k];
        x[k]:=h[k]+(f1[k]+2*f2[k]+2*f3[k]+f4[k])/6*dt;
    end;
end;

```

```

procedure Init_Graph;
var GraphDriver,GraphMode:integer;
    i:integer;
    color:word;
begin
    GraphDriver:=0;
    DetectGraph(GraphDriver,GraphMode);
    if GraphMode>1 then GraphMode:=1;
    InitGraph(GraphDriver,GraphMode,'e:\tp\bgi');
    color:=GetMaxColor;
    TextMode(1);
    Writeln;
    Writeln('  Graph Initialisate And ',GraphErrorMsg(GraphResult));
    Writeln;
    Writeln(' Use:  GraphMode - ',GetModeName(GraphMode));
    Writeln('      GraphDriver - ',GetDriverName);
    Writeln;
    Writeln(' The Number Of Using Colors :',GetMaxColor);
    for i:=1 to 4 do Writeln;
    Writeln('      ПАРАМЕТРИ АД:');
    Writeln;
    Writeln('  As =',A1:6,' Ar =',A2:6);
    Writeln('  Ks =',K1:6,' Kr =',K2:6);
    Writeln('  Ls`=',L11:6,' Lr`=',L21:6);
    for i:=1 to 7 do Writeln;
    Writeln('  Press Any Key To Continue');
    pausa;
    SetGraphMode(GraphMode);
end;

```

{ ПРОЦЕДУРА ПІДГОТОВКИ ДО ЦИФРОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПО ПАСПОРТНИМ ДАННИМ ДВИГУНА }

```

procedure Prepeare;
var HelpVariable:integer;
begin
    W1:=2*Pi*Fs;W0:=W1/p;
    L0:=1.5*X0t/W1;L1:=X1t/W1;L2:=X2t/W1;
    L1:=L1+L0;L2:=L2+L0;
    K2:=L0/L2;K1:=L0/L1;
    L11:=L1-sqr(L0)/L2;L21:=L2-sqr(L0)/L1;
    A1:=R1t/L11;A2:=R2t/L21;
    for HelpVariable:=1 to 5 do
        begin
            f[HelpVariable]:=0;
            x[HelpVariable]:=0;
        end;
end;

```

[illegible]

## Продовження додатку В

```

Psi2:=sqrt(sqr(x[3])+sqr(x[4]));Psi0:=l0*L0;
Str(Psi2:6:4,VectorString0);VectorString:='|';OutStringSum;
Str(PsirRAngle:6,VectorString0);OutStringSum;
Str(l1:6:2,VectorString0);OutStringSum;
Str(lsrRAngle:6,VectorString0);OutStringSum;
Str(l21:6:2,VectorString0);OutStringSum;
Str(lrsRAngle:6,VectorString0);OutStringSum;
Str(Psi0:6:4,VectorString0);OutStringSum;
Str(PsioRAngle:6,VectorString0);OutStringSum;
Str(0.003*Uss/sqrt(2)*l1:6:2,VectorString0);OutStringSum;
Str(0.003*Uss/sqrt(2)*l1*CosF:6:2,VectorString0);OutStringSum;
Str(M:6:2,VectorString0);OutStringSum;
GetVectorString:=VectorString;
end;
ENDT2:GetVectorString:='+'-----+'
end
end;

procedure SolveDiagram;Forward;
{ ПРОЦЕДУРА ВИХОДУ З ПРОГРАМИ }
procedure quit;
begin
  Write(Result,GetVectorString(ENDT1));Writeln(Result,GetVectorString(ENDT2));
  Close(Result);GraphDefaults;CloseGraph;Halt;
end;

{ ПРОЦЕДУРА АНАЛІЗУ СКЕН КОДА }
procedure PressKeyAnalysis;
var p:char;
begin
  p:=chr(0);
  if KeyPressed=True then
    Case ReadKey of
      'M','m':begin
        Ms:=NumberInput('Момент');
        SolveDiagram;
      end;
      'U','u':begin
        Uss:=round(NumberInput('НАПРУГА')*sqrt(2));
        SolveDiagram;
      end;
      'W','w':begin
        Write(Result,GetVectorString(DATA1));
        Writeln(Result,GetVectorString(DATA2));
        SolveDiagram;
      end;
      'Q','q':quit
    else
      SetColor(GetMaxColor);
      SetVisualPage(0);
    end
  end;
end;
end;

```

## Продовження додатку В

```

{ПРОЦЕДУРА МОДЕЛЮВАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА}
procedure Model;
begin
  RepeatNumber:=round(EndT/(dt*640));
  SpeedScale:=GetMaxY/(3*W0);
  for CurrentNumber:=0 to 640 do
  begin
    for CurrentRepeat:=1 to RepeatNumber do
    begin
      Runge;
      l1a:=x[1]/L11-K2/L11*x[3];
      l1b:=x[2]/L11-K2/L11*x[4];
      l1:=sqrt(sqr(l1a)+sqr(l1b));
      l21a:=x[3]/L21-K1/L21*x[1];
      l21b:=x[4]/L21-K1/L21*x[2];
      l21:=sqrt(sqr(l21a)+sqr(l21b));
      l0a:=l1a+l21a;l0b:=l1b+l21b;
      l0:=sqrt(sqr(l0a)+sqr(l0b));
      t:=t+dt;
      PutPixel(CurrentNumber,round(GetMaxY/2-SpeedScale*x[5]/p),color);
    end;
    PutPixel(CurrentNumber,round(GetMaxY/2-SpeedScale*x[5]/p),color);
    SetActivePage(0);
    PsiAlpha:=AbsoluteAngle(l0a,l0b)-AbsoluteAngle(x[3],x[4]);
    lPsiAlpha:=AbsoluteAngle(l1a,l1b)-AbsoluteAngle(x[3],x[4]);
    lAlpha:=AbsoluteAngle(l1a,l1b)-AbsoluteAngle(l1a,l1b);
    CosF:=cos(lAlpha*Pi/180);
    if (Uss*l1)<>0 then KPD:=abs(M*Fs*4*Pi/(3*p*Uss*l1));
    Str(Uss:5,StringPsiAlpha);Str(lAlpha,StringlAlpha);
    Str(KPD:5:3,StringKPD);Str(lPsiAlpha,StringlPsiAlpha);
    Str(s:6:4,StringAlphaRasch);Str(x[5]/p:5:1,StringCurrW);
    Str(l1:6:2,Stringl1);Str(CosF:4:2,StringCosF);

    SetViewPort(184,20,240,30,False);ClearViewPort;SetViewPort(304,20,368,30,False);ClearViewPort;

    SetViewPort(400,20,472,30,False);ClearViewPort;SetViewPort(576,20,638,30,False);ClearViewPort;

    SetViewPort(184,40,248,50,False);ClearViewPort;SetViewPort(296,40,368,50,False);ClearViewPort;

    SetViewPort(400,40,472,50,False);ClearViewPort;SetViewPort(576,40,638,50,False);ClearViewPort;
    SetViewPort(0,0,GetMaxX,GetMaxY,True);
    OutTextXY(192,20,StringPsiAlpha);OutTextXY(312,20,StringlAlpha);
    OutTextXY(408,20,StringKPD);OutTextXY(584,20,StringlPsiAlpha);
    OutTextXY(192,40,StringAlphaRasch);OutTextXY(312,40,StringCurrW);
    OutTextXY(408,40,Stringl1);OutTextXY(584,40,StringCosF);
    PressKeyAnalysis;
  end;
end;
{ ПРОЦЕДУРА ФОРМУВАННЯ ЗАГОЛОВКА ФАЙЛА }
procedure FileHead;
begin
  Assign(Result,'lw.res');
  Rewrite(Result);
  Writeln(Result,GetVectorString(ST11));Writeln(Result,GetVectorString(ST12));

```

## Продовження додатку В

```

Write(Result,GetVectorString(ST13));Writeln(Result,GetVectorString(ST21));
Write(Result,GetVectorString(ST14));Writeln(Result,GetVectorString(ST22));
Write(Result,GetVectorString(ST15));Writeln(Result,GetVectorString(ST23));
Write(Result,GetVectorString(ST16));Writeln(Result,GetVectorString(ST24));
Write(Result,GetVectorString(ST17));Writeln(Result,GetVectorString(ST25));
end;
procedure Moment;
{uses crt;}
Var
  m,m1,m2,m3,m4,m5,m6,m7,m8,m9,sum:array [1..100] of real;
  Qu,Qu1,Qu2,Qu3,Qu4,Qu5,Qu6,Qu7,Qu8,Qu9,sumQu,Mp:array [1..100] of real; {sila treniya Qc}
  ranj,k,i,number:integer;
  m0,false,suma,min:real;

procedure mywindow(x1,y1,x2,y2,fon,txtcol:byte);
begin
  window(x1,y1,x2,y2);
  TextBackGround(fon);
  textcolor(txtcol);
  clrscr;
end;
Begin
  begin
    MyWindow(1,1,80,25,0,7);
    Writeln(' ');
    Writeln(' vvod kolichestva elementov');
    Readln(number);
    For i:=1 to number do
      If number<250 Then
        begin
          MyWindow(1,1,80,25,0,3);
          ranj:=5;
          m[i]:=random(ranj)+1;
          m1[i]:=random(ranj)+1;
          m2[i]:=random(ranj)+1;
          m3[i]:=random(ranj)+1;
          m4[i]:=random(ranj)+1;
          m5[i]:=random(ranj)+1;
          m6[i]:=random(ranj)+1;
          m7[i]:=random(ranj)+1;
          m8[i]:=random(ranj)+1;
          m9[i]:=random(ranj)+1;
          MyWindow(1,1,80,25,0,3);

        end
      else
        begin
          mywindow(1,1,80,25,0,3);
          writeln('ПОМИЛКА!')
          writeln('НЕКОРЕКТНЕ ЗНАЧЕННЯ');
        end;
        begin
          mywindow(1,1,80,25,0,3);
          for i:=1 to number do

```

## Продовження додатку В

```

        sum[i]:=(m[i]+m1[i]+m2[i]+m3[i]+m4[i]+m5[i]+m6[i]+m7[i]+m8[i]+m9[i])/10;
    for i:=1 to number do
        Writeln(i,'sr.ar.znach.' , sum[i]:8:2);
        readln;
    end;
begin
MyWindow(1,1,80,25,0,3);
For i:=1 to number do
If number<250 Then
    begin
        MyWindow(1,1,80,25,0,3); k:=1000;
        Qu[i]:=random(k)+600;
        Qu1[i]:=random(k)+600;
        Qu2[i]:=random(k)+600;
        Qu3[i]:=random(k)+600;
        Qu4[i]:=random(k)+600;
        Qu5[i]:=random(k)+600;
        Qu6[i]:=random(k)+600;
        Qu7[i]:=random(k)+600;
        Qu8[i]:=random(k)+600;
        Qu9[i]:=random(k)+600;
        MyWindow(1,1,80,25,0,3);
    end
    else
begin
mywindow(1,1,80,25,0,3);
writeln();
writeln();
end;
    begin
        mywindow(1,1,80,25,0,3);
        for i:=1 to number do
            sumQu[i]:=(Qu[i]+Qu1[i]+Qu2[i]+Qu3[i]+Qu4[i]+Qu5[i]+Qu6[i]+Qu7[i]+Qu8[i]+Qu9[i])/10;
        for i:=1 to number do
            Writeln(i,'sr.ar.znach.Qu' , sumQu[i]:8:2);
            readln;
        for i:=1 to number do
            Mp[i]:=(sumQu[i]-sum[i])*3e-1;
        for i:=1 to number do
            Writeln(i,'uglovoe znach. Mp' , Mp[i]:8:2);
            readln;
        end;
    end;
end;
end;
{ Основна програма }
begin
    ReCalculation;
    ClrScr;Writeln;
    TextColor(10);WriteLn(' ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ І ВИВЕДЕННЯ ВЕКТОРНОЇ ДІАГРАМИ
АСИНХРОННОГО ДВИГУНА. ');
    TextColor(12);Writeln(' IBM PC');
    for i:=0 to 4 do Writeln;TextColor(15);
    Write('ВВЕДІТЬ ЧАС ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДВИГУНА: ');Readln(EndT);

```

## Продовження додатку В

```

Write('ВВЕДІТЬ ЧАСТОТУ МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ (Гц): ');Readln(Fs);
t:=0;dt:=1e-4;Ms:=0;Uss:=round(310*Fs/50);
FileHead;Prepeare;Init_Graph;TextMode(2);
SetActivePage(0);SetVisualPage(0);
Scale(1.5*W0,-1.5*W0,EndT,'t,c','W,рад/с');
SetColor(round(GetMaxColor*0.7));
OutTextXY(66,8,'ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ');
SetColor(round(GetMaxColor*0.9));
OutTextXY(112,20,'PsiAlpha:');OutTextXY(240,20,'IsAlpha:');
OutTextXY(368,20,'KPD:');OutTextXY(496,20,'IsPrAlpha:');
OutTextXY(96,40,'RelSkRasch:');OutTextXY(256,40,'CurrW:');
OutTextXY(376,40,'Is:');OutTextXY(536,40,'CosF:');
SetViewPort(0,0,GetMaxX,GetMaxY,True);
color:=GetMaxColor;SetColor(color);
Model;
Moment;
Quit;
end.

```

## Продовження додатку В

```
{ ВИХІДНИЙ ТЕКСТ МОДУЛЯ СЕРВІСНИХ ПРОЦЕДУР ТА ФУНКЦІЙ }
```

```
Unit Im_tpu;
```

```
Interface
```

```
uses graph,dos,crt,printer;
```

```
type string4=string[4];
```

```
procedure pausa;
```

```
procedure Scale(Ymax,Ymin,Tmax:real;XText,YText:string);
```

```
function AbsoluteAngle(AComponent,BComponent:real):integer;
```

```
procedure PutVector(Xb,Yb,MVector,AVector,Col:real;Name:string4);
```

```
function NumberInput(What:string):integer;
```

```
procedure TextOut(X,Y:integer;Col:real;TextString:string);
```

```
function Sgn(v:real):integer;
```

```
function DefTime:string;
```

```
procedure TimeOut;
```

```
procedure PrintPausa;
```

```
Implementation
```

```
{ ПАУЗА ДО ПЕРШОЇ НАТИСНУТОЇ КЛАВІШІ }
```

```
procedure pausa;
```

```
begin
```

```
Repeat Until ReadKey<>#0
```

```
end;
```

```
{ ВИВІД НА ЕКРАН СИСТЕМИ КООРДИНАТ }
```

```
procedure Scale(Ymax,Ymin,Tmax:real;XText,YText:string);
```

```
var Ybeg,Ystep,Tstep,t1:real;
```

```
ScaleGrad:string;
```

```
Col:word;
```

```
SDrawX,SDrawY,HelpVar,GDriver,GMode:integer;
```

```
begin
```

```
DetectGraph(GDriver,GMode);GMode:=1;
```

```
InitGraph(Gdriver,GMode,"");
```

```
SetBkColor(0);SetColor(GetMaxColor);
```

```
Col:=GetMaxColor;PutPixel(0,0,Col);
```

```
LineTo(GetMaxX,0);LineTo(GetMaxX,GetMaxY);
```

```
LineTo(0,GetMaxY);LineTo(0,0);
```

```
for SDrawX:=1 to 19 do
```

```
for SdrawY:=1 to 19 do
```

```
PutPixel(SdrawX*GetMaxX div 20,SdrawY*GetMaxY div 20,col);
```

```
SetTextStyle(0,0,1);
```

```
if Ymin<0 then Ystep:=(Ymax-Ymin)/10
```

```
else
```

```
Ystep:=Ymax/10;
```

```
for HelpVar:=0 to 10 do
```

```
begin
```

```
Str(Ymax:9,ScaleGrad);
```

```
OutTextXY(0,HelpVar*GetMaxY div 10,ScaleGrad);
```

```
Ymax:=Ymax-Ystep;
```

```
end;
```

## Продовження додатку В

```

Tstep:=Tmax/5;t1:=0;
for HelpVar:=0 to 4 do
begin
  Str(t1:9,ScaleGrad);
  OutTextXY(HelpVar*GetMaxX div 5,GetMaxY-10,ScaleGrad);
  t1:=t1+Tstep;
end;
SetColor(round(GetMaxColor/1.25));
OutTextXY(GetMaxX-48,GetMaxY-11,XText);OutTextXY(8,20,YText);
SetColor(GetMaxColor);
end;

{ ФУНКЦІЯ ГЕОМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ І РОЗРАХУНКУ АБСОЛЮТНОГО КУТА ВЕКТОРА }
function AbsoluteAngle(AComponent,BComponent:real):integer;
var IntAngle:integer;
begin
  if AComponent<>0 then IntAngle:=round(180/Pi*ArcTan(BComponent/AComponent));
  if AComponent=0 then
    begin
      if BComponent>0 then IntAngle:=90
      else IntAngle:=-90;
    end
  else
    if BComponent=0 then
      begin
        if AComponent>0 then IntAngle:=0
        else IntAngle:=180;
      end
    else
      if ((AComponent>0) and (BComponent>0)) or (AComponent>0) and
(BComponent<0) then
        { ПЕРШИЙ І ДРУГИЙ КВАДРАНТИ }
        IntAngle:=IntAngle
      else
        IntAngle:=180+IntAngle;{ДРУГИЙ І ТРЕТІЙ КВАДРАНТИ};
        if IntAngle<0 then IntAngle:=360+IntAngle;
        AbsoluteAngle:=IntAngle;
      end;
  end;
end;

{ ПРОЦЕДУРА ВИВЕДЕННЯ ВЕКТОРА ПО ЗАДАНИМ КООРДИНАТАМ }
procedure PutVector(Xb,Yb,MVector,AVector,Col:real;Name:string4);
const LengthPoint=8;
var Xbh,Ybh,Xeh,Yeh,Xp,Yp,AVAngle:integer;
    Xk,Yk,Colh:word;
    Kx:real;
begin
  GetAspectRatio(Xk,Yk);Kx:=Yk/Xk;
  Xbh:=round(Xb);Ybh:=Round(Yb);
  Xeh:=Round(Xb+Kx*MVector*cos(Pi/180*AVector));
  Yeh:=round(Yb-MVector*sin(Pi/180*AVector));
  Colh:=round(Col);SetColor(Colh);
  Line(Xbh,Ybh,Xeh,Yeh);
  AVAngle:=AbsoluteAngle((Xeh-Xbh),(Ybh-Yeh));
  Xp:=round(LengthPoint*Kx*Cos(Pi/180*(AVAngle+10)));
  Yp:=round(LengthPoint*Sin(Pi/180*(AVAngle+10)));

```

## Продовження додатку В

```

    Xp:=Xeh-Xp;Yp:=Yeh+Yp;
    Line(Xeh,Yeh,Xp,Yp);
    Xp:=round(LengthPoint*Kx*cos(Pi/180*(AVAngle-10)));
    Yp:=round(LengthPoint*Sin(Pi/180*(AVAngle-10)));
    Xp:=Xeh-Xp;Yp:=Yeh+Yp;
    Line(Xeh,Yeh,Xp,Yp);
    OutTextXY(Xeh+4,Yeh,Name);
end;

{ ФУНКЦІЯ ВВЕДЕННЯ ЧИСЛА З КЛАВІАТУРИ В ГРАФІЧНОМУ РЕЖИМІ }
function NumberInput(What:string):integer;
var InputChar:char;
    number:integer;
begin
    SetActivePage(1);SetVisualPage(1);
    SetColor(round(GetMaxColor*0.8));What:=What+' :';
    OutTextXY(0,GetMaxY-80,What);Number:=0;MoveTo(120,GetMaxY-80);
    Repeat
        InputChar:=ReadKey;
        if (InputChar>'/') and (InputChar<':') then
            begin
                Number:=Number*10-48+ord(InputChar);
                OutText(InputChar);
            end;
    Until ord(InputChar)=13;
    SetColor(GetMaxColor);SetBkColor(0);
    SetViewPort(0,GetMaxY-80,300,GetMaxY-72,True);
    ClearViewPort;NumberInput:=Number;
    SetViewPort(0,0,GetMaxX,GetMaxY,True);
    SetActivePage(0);
end;

{ ПРОЦЕДУРА ВИВЕДЕННЯ НА ЕКРАН В ЗАДАНУ ПОЗИЦІЮ (X,Y)
  ЗАДАНОГО ТЕКСТУ (TextString) ЗАДАНИМ КОЛЬОРОМ (Col) }
procedure TextOut(X,Y:integer;Col:real;TextString:string);
begin
    SetColor(round(Col*GetMaxColor));
    OutTextXY(X,Y,TextString);
end;

{ ВИЗНАЧЕННЯ ЗНАКУ ВИРАЗУ }
function Sgn(v:real):integer;
begin
    if v<0 then Sgn:=-1
    else
        Sgn:=1;
    if v=0 then Sgn:=0;
end;

{ ФУНКЦІЯ РОЗРАХУНКУ ЧАСУ ВІДЛІКУ }
function DefTime:string;
var cw,mw,sw,sdw:word;
    cs,ms,ss,sds:string;
begin

```

## Закінчення додатку В

```
        GetTime(cw,mw,sw,sdw);
        str(cw,cs);str(mw,ms);str(sw,ss);str(sdw,sds);
        DefTime:=cs+'.'+ms+'.'+ss+'.'+sds;
    end;

{ ПРОЦЕДУРА ВИВЕДЕННЯ НА ЕКРАН ЧАСУ ВІДЛІКУ }
procedure TimeOut;
var ST:string;
begin
    ST:='          Время счета : '+DefTime;
    GoToXY(10,10);
    Write(ST);
end;

end.
```