

Дмитро КВАШУК

Національний авіаційний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4591-8881>[dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua](mailto:dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua)

Олеся ЯЩУК

Національний авіаційний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3137-9562>[olesia.yashchuk@npp.nau.edu.ua](mailto:olesia.yashchuk@npp.nau.edu.ua)

## АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ОБЕРТАЛЬНОГО МОМЕНТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕПРЯМИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ

У статті досліджуються алгоритми визначення обертальних параметрів електродвигунів з використанням непрямих методів вимірювання. Проведено аналіз характеристик електродвигунів за їх за енергетичними даними. Визначено можливості вимірювання на основі функціональної залежності обертального моменту від потужності електродвигуна та швидкості обертання його валу. Досліджено характеристики складових потужності та наведено результати їх моделювання. Здійснено аналіз методів визначення кутової швидкості та кутового прискорення валу електродвигуна та досліджено роль цих параметрів під час визначення обертального моменту. Запропоновано двоканальну інформаційно-вимірювальну систему мережевого типу, яка дозволяє здійснювати збір даних, та їх візуалізацію, де один канал використовується для вимірювання потужності, інший для вимірювання швидкості обертання валу.

Ключові слова: обертальний момент, кутова швидкість, електродвигун, вимірювальна система, дані, методи вимірювання, сенсори.

Dmytro KVASHUK, Olesia YASHCHUK

National Aviation University

## ALGORITHM FOR DETERMINING THE TORQUE OF ELECTRIC MOTORS USING INDIRECT MEASUREMENT METHODS

Indirect torque measurement methods can be performed in a variety of ways, depending on the specific situation and available tools. One such way is to measure the displacement, or speed of rotation of the shaft and use this information to calculate the moment using the moment of inertia equation. For this, it is necessary to know the moment of inertia and the angular acceleration, which can be measured using a gyroscope or accelerometer. Another way is to measure the voltage and current in the electrical circuit connecting the motor and the power source by determining the power of the electric motor.

However, indirect methods of measuring torques of electric motors are based on the measurement of other physical parameters that correlate with torque, such as current, voltage, rotation frequency, etc. These methods are often used because of their cost-effectiveness and ease of implementation, but they have some drawbacks. In particular: indirect methods are usually less accurate than direct methods because they depend on mathematical models and correlations between different parameters, which may be imprecise or incomplete; parameters that are measured by indirect methods may be influenced by external factors, which may affect the accuracy of measurements; calibration of devices is usually carried out in laboratory conditions, so the results may not reflect real operating conditions; the mathematical models used to determine the torque may be non-linear. This can lead to errors in measurements, especially at high or low torque values; indirect methods do not provide direct feedback about the real torque, which can lead to delays in process regulation and control. This can be critical for some applications where fast and accurate torque control is essential; indirect methods may be less efficient or unsuitable for some types of electric motors or applications. For example, when using high-frequency or multiphase motors, indirect methods may not provide sufficient accuracy or stability of measurements.

The article examines algorithms for determining the rotational parameters of electric motors using indirect measurement methods. An analysis of the characteristics of electric motors according to their energy data was carried out. The measurement possibilities are determined based on the functional dependence of the torque on the power of the electric motor and the speed of rotation of its shaft. The characteristics of the power components are studied and the results of their simulation are given. An analysis of the methods of determining the angular velocity and angular acceleration of the electric motor shaft was carried out, and the role of these parameters in the determination of the torque was investigated. A two-channel network-type information and measurement system is proposed, which allows data collection and their visualization, where one channel is used to measure power, the other to measure shaft rotation speed.

Key words: torque, angular velocity, electric motor, measurement system, data, measurement methods, sensors.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Непрямі методи вимірювання обертального моменту можуть здійснюватися різними способами, залежно від конкретної ситуації та доступних інструментів.

Один з таких способів - це вимірювання переміщення, або швидкості обертання валу і використання цієї інформації для розрахунку моменту за допомогою рівняння моменту інерції. Для цього необхідно знати момент інерції та кутове прискорення, яке може бути виміряне за допомогою гіроскопа, або акселерометра. Інший спосіб - це вимірювання напруги та струму в електричному ланцюзі, що з'єднує двигун і джерело живлення шляхом визначення потужності електродвигуна.

Разом з тим, непрямі методи вимірювання обертальних моментів електродвигунів базуються на вимірюванні інших фізичних параметрів, які корелюють з обертальним моментом, такі як струм, напруга, частота обертання, тощо. Ці методи часто використовуються через їхню економічність та зручність

реалізації, але вони мають деякі недоліки. Зокрема: непрямі методи зазвичай менш точні, ніж прямі, оскільки вони залежать від математичних моделей та кореляцій між різними параметрами, які можуть бути неточними або неповними; параметри, які вимірюються непрямими методами, можуть бути під впливом зовнішніх факторів, що може вплинути на точність вимірювань; калібрування приладів, зазвичай проводиться в лабораторних умовах, тому результати можуть не відображати реальних умов експлуатації; математичні моделі, які використовуються для визначення обертового моменту, можуть бути нелінійними. Це може призвести до помилок у вимірюваннях, особливо при високих, або низьких значеннях моменту; непрямі методи не дають безпосереднього зворотного зв'язку про реальний обертовий момент, що може призвести до затримок у регуляції та контролі процесу. Це може бути критичним для деяких застосувань, де швидкий та точний контроль обертового моменту є важливим; непрямі методи можуть бути менш ефективними, або непридатними для деяких типів електродвигунів, або застосувань. Наприклад, при використанні високочастотних або багатофазних двигунів, непрямі методи можуть не забезпечити достатню точність, або стабільність вимірювань.

Тому, з метою вдосконалення непрямих методів вимірювання обертових моментів електродвигунів необхідно враховувати не визначені параметри та шляхи їх компенсації прогнозними значеннями. Для цього ефективними є, як методи статистичних досліджень, так і методи машинного навчання із використанням нечіткої логіки та нейронних мереж.

### Аналіз досліджень та публікацій

Переважає більшість досліджень, які пов'язані із вимірюваннями обертових параметрів електродвигунів, зокрема вимірюванням кутової швидкості, кутового прискорення, моменту сили, частково враховують непрямі методи [1, 2, 3, 4, 5]. Основні параметри, що дозволяють визначити момент, це потужність та швидкість обертання валу:

$$M = F(P, \nu) = \frac{\Delta P}{\Delta \nu} k, \quad (1)$$

де  $P$  – потужність;  $\nu$  – швидкість обертання ротора,  $k$  – коефіцієнт передачі вимірювального каналу.

В даному випадку застосовують два вимірювальні канали: канал вимірювання потужності електродвигуна  $P$  і канал вимірювання швидкості обертання валу  $\nu$ .

Для отримання інформації про потужність електродвигуна доцільно перемножувати вихідні величини пристроїв знімання інформації споживаного струму та напруги електроприводу, щоб виключити фазні похибки вимірювання первинної мережі. Оскільки пристрої знімання інформації характеризуються інерційними властивостями, їх динамічні залежності визначаються рівняннями виду [6]:

$$\begin{aligned} T_1 \frac{dU_1'}{dt} + U_1' &= KU(t) \\ T_2 \frac{dU_1''}{dt} + U_1'' &= KI(t) \end{aligned}, \quad (2)$$

де  $T_1$  – постійна часу датчика струму;  $U_1'$  – вихідна величина перетворювача струму;  $U_1''$  – вихідна величина перетворювача напруги;  $T_2$  – постійна часу датчика напруги;  $K$  – коефіцієнт перетворення датчиків.

За умов, що передатні функції обох сенсорів рівні між собою:

$$W_I(P) = \frac{K}{T_2 P + 1}, \quad W_U(P) = \frac{K}{T_1 P + 1} \quad \text{та враховуючи, що згідно закону Ома: } P = UI, \text{ передатну}$$

функцію даної вимірювальної структури можна представити наступним чином:

$$W_{BC}(\rho) = W_I(\rho) \cdot W_U(\rho) = \frac{K}{(T_1 \rho + 1)(T_2 \rho + 1)} = \frac{K}{T_1 T_2 \rho^2 + (T_1 + T_2) \rho + 1}, \quad (3)$$

тоді рівняння динаміки вимірювання каналу потужності буде мати наступний вигляд:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 U_1}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dU_1}{dt} + U_1 = K^2 \rho, \quad (4)$$

$$\text{де } U_1(t) = U_1'(t) + U_1''(t).$$

Швидкість обертання валу, можна представити наступним виразом:

$$T_3 \frac{dU_2}{dt} + U_2 = Kw(t), \tag{5}$$

де  $U_2 = U_2' - U_2''$  - вихідний параметр для вимірювання швидкості обертання валу;  $T_3$  - постійна часу даного параметру.

Тоді вираз (1) буде мати наступний вигляд:

$$M = F(P, \nu) = \frac{\Delta P}{\Delta \nu} k = \frac{U_1(t)}{U_2(t)}, \tag{6}$$

Для створення алгоритму непрямих вимірювань обертальних моментів електродвигунів, можна скласти наступну систему рівнянь:

$$\begin{aligned} T_1 dU_1' + U_1' &= KU(t), \\ T_2 \frac{dU_1''}{dt} + U_2'' &= KI(t), \\ U_1(t) &= U_1'(t) - U_1''(t), \\ T_3 \frac{dU_2}{dt} + U_2 &= Kw(t), \\ U_2 &= U_2'(t) - U_2''(t), \\ M(t) &= \frac{U_1(t)}{U_2(t)}. \end{aligned} \tag{7}$$

враховуючи те, що праві частини рівнянь визначаються вихідними параметрами перетворювачів швидкості, напруги та струму, зазначену систему рівнянь можна записати у вигляді кінцевих різниць:

$$\begin{aligned} T_1 \frac{U_{i+1}' - U_i'}{\tau} + U_i' &= K_i \rho_i, \\ T_2 \frac{V_{i+1}' - V_i'}{\tau} + V_i' &= K \rho_i, \end{aligned} \tag{8}$$

за умов, якщо:  $U = U_1', V = U_1''$ .

$$\begin{aligned} U_{i+1}' + \frac{1}{T_1}(\tau - 1)U_i' &= \frac{\tau}{T_1} K \rho_i, \\ V_{i+1}' + \frac{1}{T_2}(\tau - 1)V_i' &= \frac{\tau}{T_2} K \rho_i n, \end{aligned} \tag{9}$$

$$U_1(t_1) = U_1' - U_1''.$$

В такому випадку, для кожного кроку дискретизації, можна записати такі вирази:

$$i = 0 \left\{ \begin{aligned} U_1' &= \frac{1}{T_1}(1 - \tau)U_0'' + \frac{\tau}{T_1} K \rho_0 \\ U_1'' &= \frac{1}{T_2}(1 - \tau)U_0'' + \frac{\tau}{T_2} K \rho_0 \end{aligned} \right., \tag{10}$$

$$i = 1 \left\{ \begin{aligned} U_2' &= \frac{1}{T_1}(\tau - 1)U_1' + \frac{\tau}{T_1} K \rho_1 \\ U_2'' &= \frac{1}{T_2}(\tau - 1)U_1'' + \frac{\tau}{T_2} K \rho_1 \end{aligned} \right., \tag{11}$$

$$i = n \left\{ \begin{aligned} U'_n &= \frac{1}{T_1}(\tau - 1)U'_{n-1} + \frac{\tau}{T_1}K\rho_{n-1} \\ U''_n &= \frac{1}{T_2}(\tau - 1)U''_{n-1} + \frac{\tau}{T_2}K\rho_{n-1} \end{aligned} \right. , \quad (12)$$

$$U_1(t_1) = U'_1 - U''_1; \quad U_2(t_1) = U'_2 - U''_2. \quad (13)$$

де  $\tau$  - період дискретизації (в часі);  $T_1, T_2$  - постійні часу;  $K$  - коефіцієнти передачі;  $U$  - нормуючий коефіцієнт каналу виміру напруги;  $i$  - нормуючий коефіцієнт каналу вимірювання струму;  $\rho$  - нормуючий коефіцієнт каналу вимірювання потужності.

Виходячи із зазначеного та виразів (2-6) вимірювання непрямым способом обертового моменту на валу силового приводу реалізовано завдяки перетворенню зусиль накладених на вал електродвигуна у пропорційний таким зусиллям вихідний сигнал  $M = \frac{\Delta P}{n}k$ , слід врахувати момент інерції та кутове прискорення:

$$M(t) = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (15)$$

де  $n$  - швидкість обертання валу;  $k$  - коефіцієнт передачі вимірювального каналу?  $J$  - момент інерції;  $\omega$  - кутова швидкість.

В роботі [7] представлено функціональну схему управління моментом електричного двигуна на основі досліджених параметрів потужності та кутової швидкості (рис. 1)

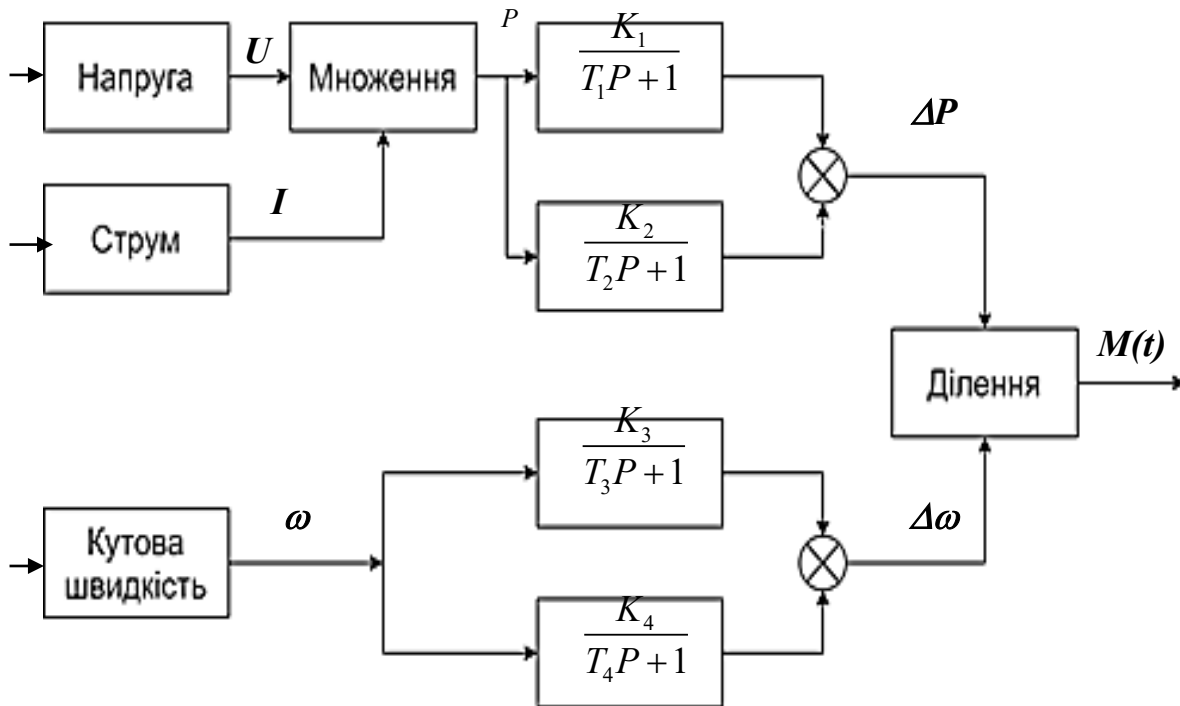


Рис. 1 Управління обертовим моментом електродвигуна на основі контролю потужності та кутової швидкості, [7]

Слід звернути увагу на нелінійність вимірювального каналу, яка може виникати під час кутового прискорення, що пов'язана із пружністю валу, в залежності від температури та механічної напруги. Тому, кутове прискорення можна розглядати, як параметр що характеризує зміну кутової швидкості валу електродвигуна протягом певного проміжку часу. Воно вимірюється у радіанах на секунду в квадраті (рад/с<sup>2</sup>) та відіграє важливу роль у розрахунку та контролі динамічних характеристик електродвигуна, таких як прискорення, гальмування та реверсування (рис. 2).

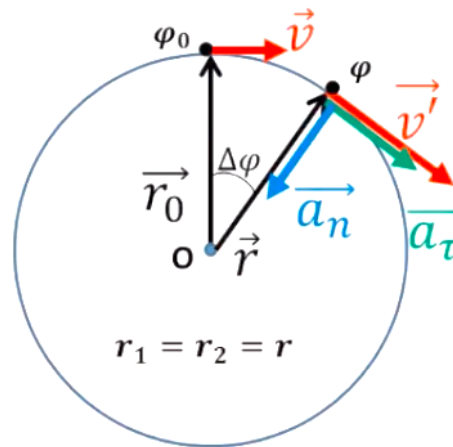


Рис. 2 Кутове прискорення. Графічна характеристика [3]

Так, зміна кутової швидкості може бути представлена як:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}, \quad \varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t}, \quad [\varepsilon] = \frac{\text{рад}}{\text{с}^2} = \text{с}^{-2}. \quad (16)$$

та може використовуватися для розрахунку кутового прискорення при наявності дискретних значень кутової швидкості та часу. Може бути представлено, як похідна кутової швидкості по часу, що використовується для визначення кутового прискорення у випадку неперервних функцій кутової швидкості та часу.

Зв'язок кутового прискорення з  $a_\tau$  і  $a_n$  згідно рис. 2, може бути описаний наступними виразами:

$$\begin{aligned} a_\tau &= \frac{\Delta v}{\Delta t}, \text{ при } t \rightarrow 0, \\ a_\tau &= \varepsilon r, \\ a_\tau &= \frac{\Delta(\omega r)}{\Delta t} = \frac{r \Delta \omega}{\Delta t} = \varepsilon r, \\ a_n &= \frac{v^2}{r} = \frac{(\omega r)^2}{r} = \omega^2 r \\ \text{Якщо } \omega_0 &= 0 \rightarrow a_n = \varepsilon^2 t^2 r. \end{aligned} \quad (17)$$

де:  $a_\tau$  - тангенціальне прискорення;  $a_n$  - нормальне прискорення;  $\varepsilon$  - кутове прискорення.

Додавши в структуру вимірювального каналу спосіб вимірювання кутового прискорення в залежності від ряду факторів, можна значною мірою зменшити інструментальну похибку.

Кутове прискорення залежить від ряду факторів, зокрема:

- від моменту сили, який діє на обертальний об'єкт. За другим законом Ньютона для обертального руху, момент сили дорівнює добутку моменту інерції на кутове прискорення. Таким чином, при застосуванні більшого моменту сили до об'єкта, його кутове прискорення збільшується. Момент інерції залежить від маси валу та його розподілу відносно осі обертання. Чим більший момент інерції, тим менше кутове прискорення при однаковому моменті сили;

- від зовнішніх сил, таких як сила тертя та аеродинамічний опір, що можуть впливати на кутове прискорення. Вони можуть сповільнювати, або прискорювати обертальний рух валу в залежності від їхнього напрямку та величини;

- від характеристик двигуна, таких як швидкість та конструкція двигуна. Двигуни з більшим моментом можуть забезпечити більше кутове прискорення;

- від режиму контролю. Контролери, такі як PID-регулятори, можуть використовуватися для регулювання кутового прискорення на основі вхідних даних від датчиків та поточного стану системи. Вони можуть автоматично змінювати кутове прискорення, щоб досягти заданої швидкості, або позиції, а також для компенсації зовнішніх сил та опорів.

### Формулювання цілей статті

Метою статті є дослідження непрямих методів вимірювання обертальних моментів електродвигунів для визначення шляхів побудови інформаційно-вимірювальної системи та розробки алгоритму вимірювання навантаження на вал з урахуванням напруги, струму, кутової швидкості та окремих параметрів, що характеризують кутове присвоєння.

### Виклад основного матеріалу

Функція перетворення вимірювального каналу для перетворювача обертального моменту електродвигуна має наступний вигляд [8]:

$$W_y(S) = \frac{I_{\text{я}}(S)}{U_y(S)} = \frac{k_I S}{(T_m T_e S^2 + T_m S + 1)}, \quad (18)$$

де:  $T_m = \frac{J R_{\text{я}}}{C_w C_e}$  - механічна постійна часу двигуна;  $T_e = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$  - електротехнічна постійна часу

роботи двигуна;  $k_I = \frac{J}{C_w C_e}$  - коефіцієнт передачі по струму;  $I_{\text{я}}$  - струм в якірному ланцюгу ЕД;  $R_{\text{я}}$  -

опір якірному ланцюга, що рівний сумі опору якірних обмоток ЕД та вхідного опору підсилювача, Ом;  $L_{\text{я}}$  - сума індуктивностей якірному ланцюга двигуна та вихідного ланцюга підсилювача, Гн;  $J$  - момент інерції якоря, Нм<sup>2</sup>;  $C_e$  - коефіцієнт моменту сили, Н·м;  $C_w$  - швидкості, В·с/рад;  $s$  - оператор Лапласа;  $U_y$  - напруга.

Враховуючи окремі дестабілізуючі фактори, зокрема вібрацію та нелінійність вимірювального каналу, крива розгону, з урахуванням моменту інерції може бути описана наступним чином (рис. 3):

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = T_m - T_l, \quad (19)$$

де:

$J$  - момент інерції ротора;  $\frac{d^2 \theta}{dt^2}$  - кутове прискорення ротора;  $B$  - коефіцієнт тертя підшипників;

$\frac{d\theta}{dt}$  - кутова швидкість ротора;  $T_m$  - момент електродвигуна;  $T_l$  - момент навантаження на вісь ротора.

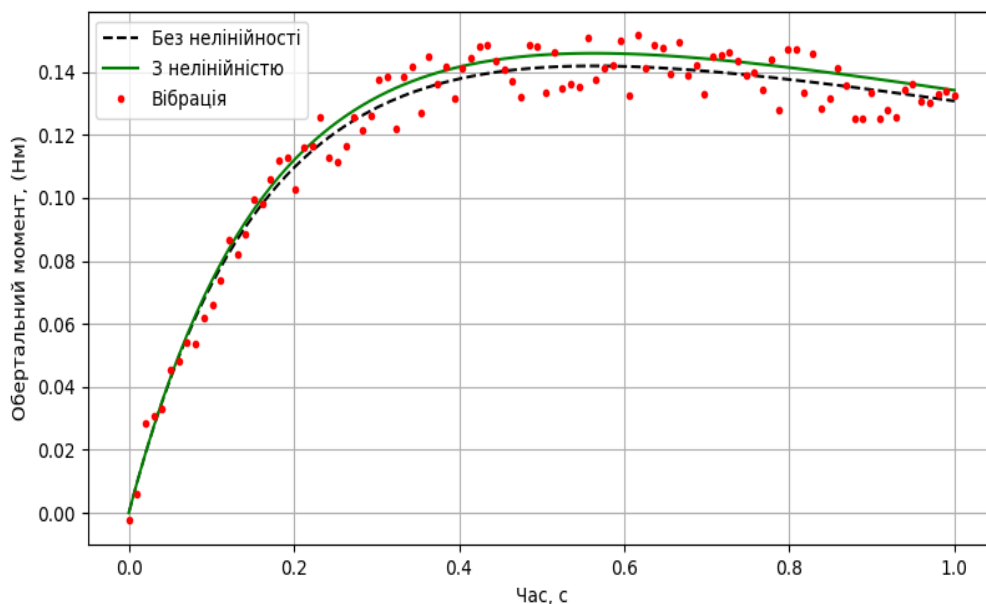


Рис. 3. Моделювання розгону електричного двигуна з урахуванням дестабілізуючих факторів

Момент електродвигуна  $T_m$  залежить від струму якоря  $I_a$  та коефіцієнта моменту  $K_m$  :

$$T_m = K_m I_a, \quad (20)$$

Струм якоря  $I_a$  можна виразити через напругу на якорі  $U_a$  та опір якоря, а також роторну напругу  $R_a$  :

$$I_a = \frac{U_a - E_r}{R_a}, \quad (21)$$

Роторна напруга  $E_r$  залежить від кутової швидкості ротора та коефіцієнта роторної напруги  $K_e$  :

$$E_r = K_e \frac{d\theta}{dt}, \quad (22)$$

Після підстановки рівнянь (20), (21) та (22) в рівняння (19) отримаємо кінцеве рівняння розгону електродвигуна:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = K_m \left( \frac{U_a - K_e \frac{d\theta}{dt}}{R_a} \right) - T_l, \quad (23)$$

Це рівняння можна розв'язати аналітично, або чисельно для різних сценаріїв розгону, враховуючи характеристики електродвигуна та умови навантаження.

Для чисельного розв'язання рівняння (23) можна скористатися методами чисельного інтегрування, такими як метод Ейлера, Рунге-Кутта та інші. У залежності від сценарію розгону та характеристик електродвигуна, параметри моменту навантаження  $T_l$  можуть бути заданими функціями часу, або кутової швидкості.

Для спрощення моделі можна припустити, що момент навантаження на вісь ротора  $T_l$  є постійним або пропорційним кутовій швидкості ротора:

- Константний момент навантаження:  $T_l = T_{l0}$ ;
- Момент навантаження, пропорційний кутовій швидкості:  $T_l = K_l \frac{d\theta}{dt}$ .

У цих випадках рівняння (23) можна записати як:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = K_m \left( \frac{U_a - K_e \frac{d\theta}{dt}}{R_a} \right) - T_{l0}, \quad (24)$$

або:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = K_m \left( \frac{U_a - K_e \frac{d\theta}{dt}}{R_a} \right) - K_l \frac{d\theta}{dt}. \quad (25)$$

Розв'язавши одне з цих рівнянь для заданих параметрів електродвигуна, можна отримати криву розгону, яка відображає динаміку зміни кутової швидкості та кута повороту ротора відносно часу.

Визначивши параметри струму, напруги, потужності, кутового прискорення та кутової швидкості, отримані дані можна обчислити за наступним алгоритмом (рис. 5), що дозволить визначити обертальний

момент використовуючи вирази (10-13), (15), (18), (19-15), згідно запропонованого алгоритму на етапі аналізу результатів вимірювання.

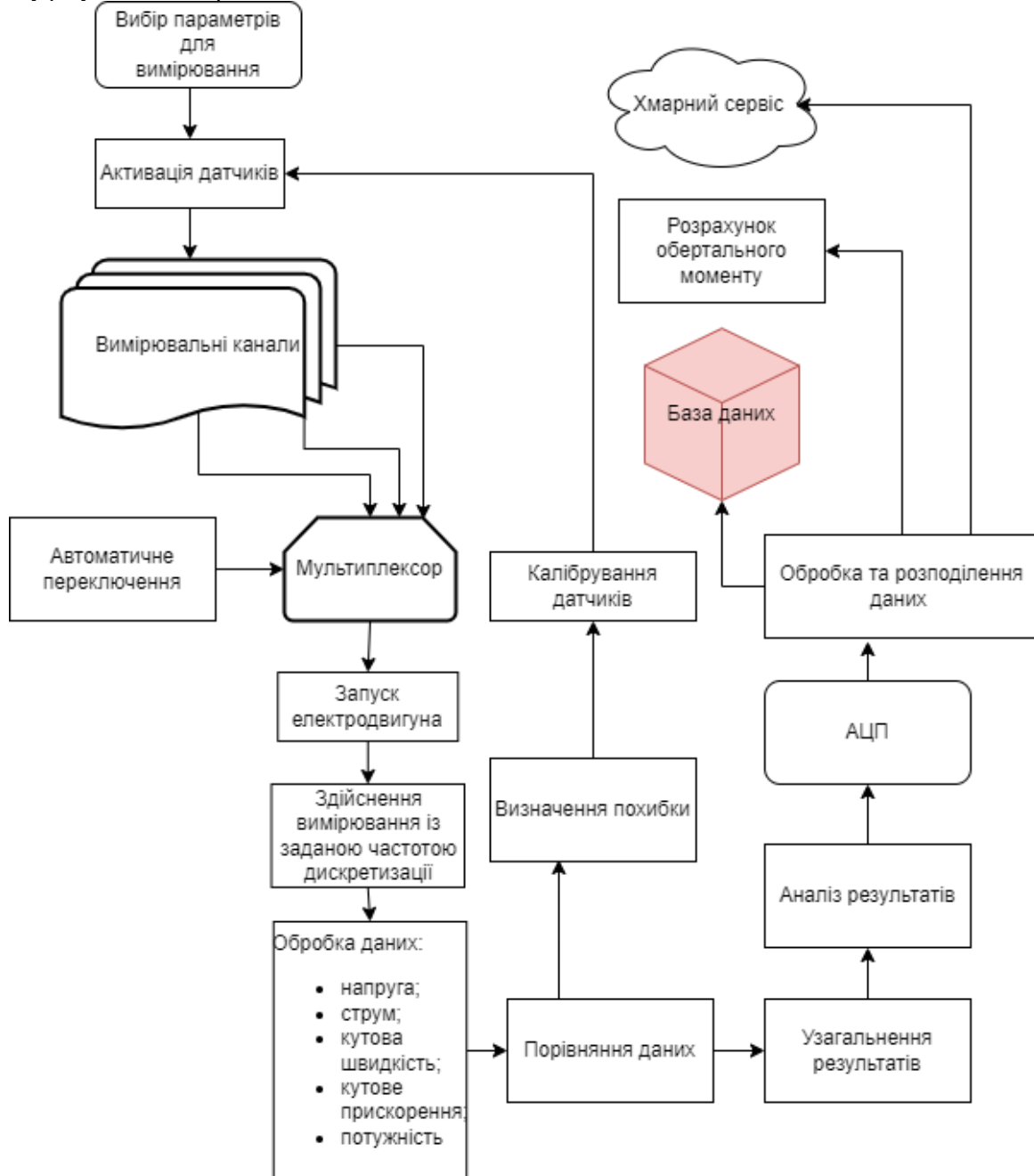


Рис. 5 Алгоритм обробки даних

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Запропонований алгоритм непрямих вимірювань обертальних моментів електродвигунів побудований на підставі залежності між потужністю, напругою, струмом та кутовою швидкістю, доповнений додатковим параметром кутового прискорення, дозволить поліпшити аналіз та контроль роботи електродвигунів, краще оцінити динаміку руху, відстежувати аномалії у роботі, вказувати на пошкодження, поліпшити регулювання швидкості та обертового моменту, краще оцінити енергоефективність та визначення оптимальних режимів роботи, оцінити взаємодію двигуна з іншими елементами системи. Таким чином врахування цього параметра може допомогти вирішити поточні технічні виклики та сприяти розвитку нових технологій у галузі електромеханіки.

### Література

1. R.J.O. de Waal, A. Bekker, P.S. Heyns, Indirect load case estimation for propeller-ice moments from shaft line torque measurements, Cold Regions Science and Technology, Volume 151, 2018, Pages 237-248, ISSN 0165-232X, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.03.016>.



2. C. Wang, W.P. Xiong, X. Chang, L.Y. Ye, X. Li, Analysis of variable working conditions for propeller-ice interaction, *Ocean Engineering*, Volume 156, 2018, Pages 277-293, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.02.026>.

3. Електропривод: Підручник / Ю. М. Лаврінченко, О. С. Марченко, П. І. Савченко, О. К. Синявський, Д. Г. Войтюк, В. П. Лисенко; За ред. Ю. М. Лаврінченка. Видавництво «Ліра-К». — К., 2009. — 504 с.

4. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній: Підручник/ С.Л. Жулай, Б.В. Зайцев, Ю.М. Лаврінченко, О.С. Марченко, Д.Г. Войтюк; За ред. С.Л. Жулая. — К.: Вища освіта, 2001. — 288 с.

5. Sebastian Schorr, Matthias Möller, Jörg Heib, Dirk Bähre, Quality Prediction of Drilled and Reamed Bores Based on Torque Measurements and the Machine Learning Method of Random Forest, *Procedia Manufacturing*, Volume 48, 2020, Pages 894-901, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.127>.

6. Перминов В. Б., Балахнов Д. А., Лихачев В. Н., Норицын А. Д. Динамические методы измерения крутящих моментов. / Приборы и системы управления. № 12, 2002

7. Анализ вариационной структуры динамического измерителя градиента крутящего момента / Б.А. Перминов, В.Б. Перминов, З.Х. Ягубов, А.Е. Лапин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2015. – № 8. – С. 15–17.

8. Ilic-Spong, M., Miller, T. J., MacMinn, S. R., & Thorp, J. S. (1987). Instantaneous torque control of electric motor drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, (1), 55-61.

#### References

1. R.J.O. de Waal, A. Bekker, P.S. Heyns, Indirect load case estimation for propeller-ice moments from shaft line torque measurements, *Cold Regions Science and Technology*, Volume 151, 2018, Pages 237-248,

2. ISSN 0165-232X, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.03.016>.

3. C. Wang, W.P. Xiong, X. Chang, L.Y. Ye, X. Li, Analysis of variable working conditions for propeller-ice interaction, *Ocean Engineering*, Volume 156, 2018, Pages 277-293, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.02.026>.

4. Електропривод: Підручник [Electric drive: Textbook] / Ю. М. Лаврінченко, О. С. Марченко, П. І. Савченко, О. К. Синявський, Д. Г. Войтюк, В. П. Лисенко; За ред. Ю. М. Лаврінченка. Видавництво «Ліра-К». — К., 2009. — 504 с.

5. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній: Підручник [Electric drive of agricultural machines, aggregates and flow lines: Textbook] / С.Л. Жулай, Б.В. Зайцев, Ю.М. Лаврінченко, О.С. Марченко, Д.Г. Войтюк; За ред. С.Л. Жулая. — К.: Вища освіта, 2001. — 288 с.

6. Perminov V. B., Balakhnov D. A., Likhachev V. N., Noritsyn A. D. Dinamicheskiye metody izmereniya krutyashchikh momentov [Dynamic methods for measuring torques] / Pribory i sistemy upravleniya. № 12, 2002

7. Analiz variatsionnoy struktury dinamicheskogo izmeritelya gradiyenta krutyashchego momenta [Analysis of the variational structure of a dynamic torque gradient meter] / B.A. Perminov, V.B. Perminov, Z.KH. Yagubov, A.Ye. Lapin // Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2015. – № 8. – С. 15–17.

8. Ilic-Spong, M., Miller, T. J., MacMinn, S. R., & Thorp, J. S. (1987). Instantaneous torque control of electric motor drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, (1), 55-61.