

Винахід відноситься до вимірювальної техніки і може знайти застосування для вимірювання моменту інерції ротора асинхронних машин. Момент інерції ротора є однією з найбільш важливих характеристик електричної машини, що визначає її динамічні властивості.

Відомий спосіб визначення моменту інерції ротора асинхронних мікромашин, який має назву - метод крутильних коливань (див. Потапов Л.А., Зотин В.Ф. Испытания микроэлектродвигателей в переходных режимах. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - С. 87-90.). Суть методу полягає в тому, що ротор двигуна підвішують у вертикальному положенні на сталевому дроті і приводять його в крутильний коливальний рух. При цьому визначається період малих крутильних коливань, який потім порівнюють з періодом коливань зразкового тіла з відомим моментом інерції. Визначають момент інерції $J_{об}$ за формулою:

$$J_{об} = J_3 \cdot \left(\frac{T_x}{T_3} \right)^2, \quad (1)$$

де

J_3 - момент інерції зразкового тіла;

T_3 - період коливань зразкового тіла;

T_x - період коливань ротора, момент інерції якого визначають.

Якщо ротор, момент інерції якого визначають, встановлено на призмі і він коливається, як фізичний маятник, то за періодом коливань маятника T знаходять момент інерції ротора $J_{об}$ за формулою:

$$J_{об} = \frac{G \cdot a \cdot T^2}{4 \cdot \pi^2}, \quad (2)$$

де

G - вага ротора;

a - відстань центра тяжіння від осі обертання.

Недоліками цього способу є велика трудомісткість, низька швидкість та точність, а також необхідність розбирання електричної машини, що принципово не дозволяє автоматизувати процес визначення інформативного параметра.

Найбільш близьким технічним рішенням є спосіб визначення моменту інерції асинхронних мікромашин (див. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю., Гоменюк А.С. Новий спосіб визначення моменту інерції електричних машин // Автоматизація технологічних процесів та промислова екологія, 1997, випуск № 1. - С. 23-27).

Суть відомого способу полягає в тому, що момент інерції ротора визначають сукупними вимірюваннями кутової швидкості ω_r з підключеним до ротора об'єкту вимірювання зразкового моменту інерції і без нього. В результаті двох вимірів ω_r в режимі самогальмування отримують систему двох рівнянь з двома невідомими, розв'язком якої знаходять величину моменту інерції.

Спільною ознакою прототипу та винаходу є визначення моменту інерції опосередкованим шляхом (за допомогою додаткових розрахунків).

До недоліків прототипу можна віднести низьку швидкість (час розрахунку приблизно 5 хвилин) та неможливість повної автоматизації процесу визначення моменту інерції.

В основу винаходу поставлено задачу розробки способу визначення моменту інерції асинхронних машин, в якому, шляхом застосування особливостей дослідження "короткого замикання", перехідних процесів двигуна та введенням нових операцій, забезпечується підвищення точності вимірювань та швидкості.

При цьому досягаються споживчі якості, спрямовані на підвищення точності вимірювань шляхом зменшення методичної похибки та автоматизацію процесу визначення моменту інерції.

Спосіб дозволяє значно зменшити методичну похибку та дає змогу реалізувати повністю автоматизовану методику визначення моменту інерції за короткий час.

Спосіб визначення моменту інерції ротора асинхронної машини, полягає в формуванні на обмотці її статора прямокутного імпульсу номінальної напруги, тривалість якого перевищує час перехідного процесу перетворювача, та в гальмуванні валу ротора через вимірювальний важіль сенсором зусилля, який відрізняється тим, що при заживлених обмотках статора, після завершення перехідного процесу в

перетворювачі, вимірюють момент M_k , а після обезструмлення обмоток вимірюють час t_*° заспокоєння вільних коливань ротора і величину моменту інерції $J_{об}$ знаходять за формулою:

$$J_{об} = \frac{t_*^\circ \cdot P}{2 \cdot \ln \left(M_k \cdot \frac{g \cdot K1}{\delta \cdot C} \right)}, \quad (3)$$

де

P - коефіцієнт заспокоєння; g - постійна тяжіння; $K1$ - функція перетворення сенсора зусилля;

C - жорсткість сенсора зусилля; δ - нормована величина, що характеризує момент закінчення вільних коливань ротора.

На фіг. 1 представлено графічне зображення перехідних процесів у перетворювачі без урахування перехідних процесів у ОБ та з урахуванням цих перехідних процесів, на фіг. 2 зображено схему пристрою для реалізації способу, на фіг. 3 зображено алгоритм виконання способу, на фіг. 4 зображені часові діаграми роботи процесорного засобу вимірювання моменту інерції.

Пристрій, який дозволяє реалізувати запропонований спосіб визначення пускового моменту електродвигуна, представляє собою мікропроцесорний засіб вимірювання, який складається з

об'єкту вимірювання 1, ротор якого через вимірювальний важіль 2 діє на вимірювальний перетворювач 3, який складається з сенсора зусилля 4, та двох перетворювачів 5 та 6, детектора з пристроєм виділення огибаючої 7, компаратора 8, вимірювача тривалості перехідного процесу, який складається з тригера 9 та електронного лічильника 10, пристрою живлення ОБ 11 та мікропроцесорної вимірювальної системи 12.

Вимірювальна система 12 складається із спеціалізованого мікропроцесора 80C196KR (13), регістра адреси 14; постійної пам'яті 15; оперативної пам'яті 16; керуючого регістра 17; формувача 18; кнопки "Пуск" 19 та генератора зразкової частоти 20. Пристрій для вимірювання пускового моменту електродвигуна працює таким чином (алгоритм див. на фіг. 3).

Після того, як натиснена кнопка "Пуск" 19, вимірювальна система переходить до виконання програми, яка прописана в постійній пам'яті 15. В регістрі 17 (розряди 0...3) формується сигнал N_{OB} , який перетворюється в напругу живлення (U_A, U_B, U_C) перетворювачем 11 та подається на ОБ 1. Очікується перехідний процес. На один з входів компаратора 8 подається нормоване значення похибки δ . Вимірюється величина моменту M_k , яка фіксується в оперативній пам'яті 16. Далі вимірювальна система 12 в регістрі 17 (розряд 4) формує сигнал Start та обезструмлює обмотки статора ОБ. Починається перехідний процес вільних затухаючих коливань ротора. Пристрій виділення огибаючої 7 перетворює сигнал з виходу ВП у постійну напругу U_Q , яка за допомогою компаратора 8 порівнюється з похибкою U_δ , і, якщо $U_Q > U_\delta$, то лічильник 10 рахує кількість імпульсів зразкової частоти f_0 . Сигнал з виходу 10 реєструється на аналоговому вході мікропроцесора 13. Як тільки $U_Q = U_\delta$, тригер 9 закривається, що свідчить про кінець вимірювання t^0 .

Часові діаграми вимірювання t^0 наведені на фіг. 4.

Суть методу полягає в наступному. В момент підключення напруги живлення на роторі об'єкту вимірювання (ОБ) при сковзанні ($S=1$) створюється обертаючий момент:

$$M_k = \frac{p \cdot m \cdot R1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot ((R1+R2)^2 + (X1+X2)^2)} \cdot U^2, \quad (4)$$

де

p - кількість пар полюсів ОБ;

m - кількість фаз статора ОБ;

f - частота поля статора;

$X1, X2$ - індуктивний опір фаз статора та ротора;

$R1, R2$ - активний опір статора та ротора;

U - номінальна напруга живлення ОБ

Цей момент M_k через вимірювальний важіль діє на сенсор зусилля (С3), який є пружним елементом.

Виникає перехідний процес, тривалість якого дорівнює t^1 . Після закінчення перехідного процесу ($t = t^1$), ОБ обезструмлюють ($U=0$) і момент на виході перетворювача, внаслідок інерційних властивостей С3,

зменшується від M_k до нуля протягом проміжку часу t^0 . Оскільки ротор ОБ здійснює вільні затухаючі коливання, тривалість яких зумовлена величиною моменту інерції ротора J_{OB} і жорсткістю сенсора зусилля

С, то вимірюючи величини M_k , t^0 та знаючи С, стає можливим знаходження моменту інерції ротора об'єкту вимірювання.

Скористаємося засадами теорії електромеханічного вимірювального перетворення (див. Кухарчук В.В. Оцінка динамічних метрологічних характеристик засобу вимірювання пускового моменту // В кн.: "Контроль і управління в технічних системах КУТС-97" за матеріалами МНТК. - Вінниця, 1997, т. 2. С. 148-155) і отримаємо диференціальне рівняння, що описує фізичні процеси в перетворювачі під час заживлення та обезструмлення ОБ із загальним ротором:

$$J \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + P \frac{d\varphi(t)}{dt} + C\varphi(t) = \begin{cases} M_k, 0 \leq t \leq t_*^1 \\ 0, t > t_*^1 \end{cases}, \quad (5)$$

де

$J = (J_{OB} + J_{BB})$ - момент інерції ротора ОБ та вимірювального важеля.

Перетворимо (5) до загальнозживаного вигляду і матимемо лінійне неоднорідне диференціальне рівняння з постійними коефіцієнтами:

$$\varphi''(t) + 2 \cdot \varepsilon \cdot \omega \cdot \varphi'(t) + \omega^2 \cdot \varphi(t) = \begin{cases} b, 0 \leq t \leq t_*^1 \\ 0, t > t_*^1 \end{cases}, \quad (6)$$

де

$\varepsilon = \frac{P}{2\sqrt{C \cdot J}}$ - ступінь застосовання вільних коливань;

$\omega = \sqrt{\frac{C}{J}}$ - частота вільних коливань перетворювача;

$b = \frac{M_k}{J}$ - стала моменту.

Отримаємо розв'язок рівняння (6), скориставшись засадами вищої математики (див. Высшая математика / Под. ред. П.Ф. Овчинникова. - К.: Выща школа, 1989. - 679 с.) у вигляді:

$$\varphi(t) = \begin{cases} \frac{b}{\omega^2} \cdot \left[1 - e^{-\varepsilon\omega t} \left(\cos(\sqrt{1-\varepsilon^2}\omega t) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\sqrt{1-\varepsilon^2}\omega t) \right) \right], & t < t_*^1 \\ \frac{b}{\omega^2} \cdot \left\{ e^{-\varepsilon\omega(t-t_*^1)} \cdot \left[\begin{aligned} &\cos(\sqrt{1-\varepsilon^2}\omega \cdot (t-t_*^1)) + \\ &+ \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\sqrt{1-\varepsilon^2}\omega \cdot (t-t_*^1)) + \\ &- e^{-\varepsilon\omega t} \left(\cos(\sqrt{1-\varepsilon^2}\omega t) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\sqrt{1-\varepsilon^2}\omega t) \right) \end{aligned} \right] \right\}, & t > t_*^1 \end{cases} \quad (7)$$

Перше рівняння в (7) дозволяє визначити тривалість перехідного процесу в перетворювачі без урахування перехідного процесу, що виникає в ОБ під час подачі на обмотки статора напруги живлення. Оскільки ОБ знаходиться в режимі "короткого замикання", то тривалість перехідного процесу $t_{об}$ із загальмованим ротором може значно перевищувати тривалість t_*^1 . Отже, якщо доповнити перше рівняння (7) системою диференціальних рівнянь, які описують ОБ (див. Кухарчук В.В. Математична модель вимірювального перетворювача пускового моменту електричних машин // Вісник ВПІ, 1995, № 1. - С. 5-9.) та отримати розв'язок створеної системи за допомогою чисельних методів у середовище символічної математики Maple V4, матимемо графічну ілюстрацію вище наведеного (див. фіг. 1).

Аналіз наведених на фіг. 1 залежностей свідчить про те, що перехідний процес у перетворювачі з урахуванням ОБ значно триваліший в часі і визначається за формулою:

$$t_{\Sigma}^1 = t_{об} + t_*^1. \quad (8)$$

Тому обезструмлювати ОБ необхідно в момент часу t_{Σ}^1 .

Знайдемо величину тривалості перехідного процесу t_*^0 , що виникає у вимірювальному перетворювачі під час обезструмлення ОБ. Представимо друге рівняння (7) з деякими позначеннями та допущенням малості другої частини рівняння у вигляді:

$$M^0(t) \cong g \cdot K1 \cdot \frac{b}{\omega^2} \cdot \left\{ e^{-\varepsilon\omega t^0} \cdot \left[\cos(\sqrt{1-\varepsilon^2}\omega \cdot t^0) + \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \sin(\sqrt{1-\varepsilon^2}\omega \cdot t^0) \right] \right\}, \quad (9)$$

де

$t^0 = t - t_{\Sigma}^1$ - тривалість перехідного процесу, що виникає після обезструмлення об'єкту вимірювання;

$$K1 = \frac{1 \cdot \xi \cdot h^3}{e \cdot g \cdot r^4}$$

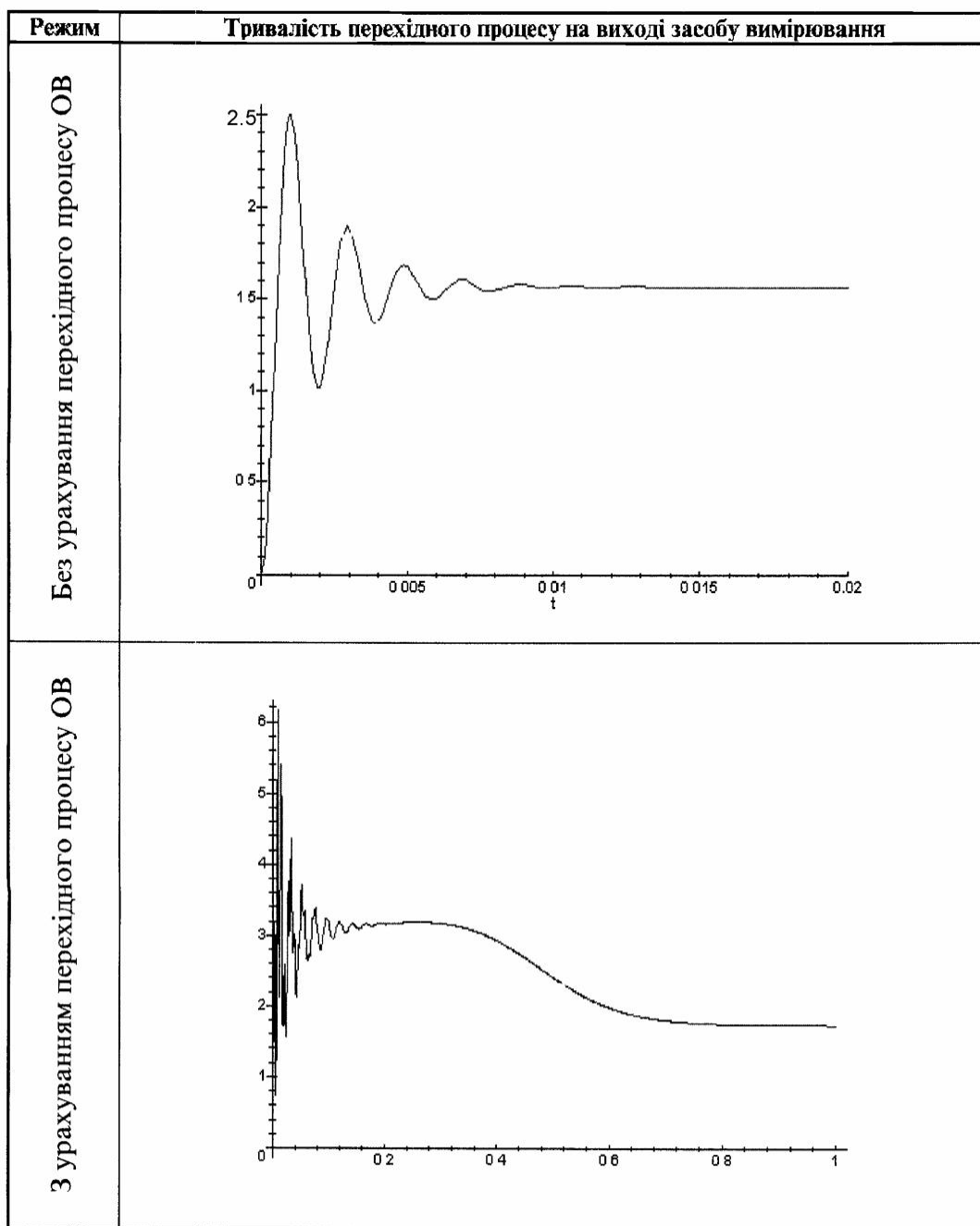
$K1$ - функція перетворення сенсора зусилля (тензорезистивний давач: g , h - радіус та товщина мембрани, ξ - модуль пружності, $e=0.17,1$ - довжина вимірювального важеля).

За існуючою методикою (див. Высшая математика / Под. ред. П.Ф. Овчинникова. - К. Выща школа, 1989. - 679 с.) отримаємо рівняння перетворення у вигляді:

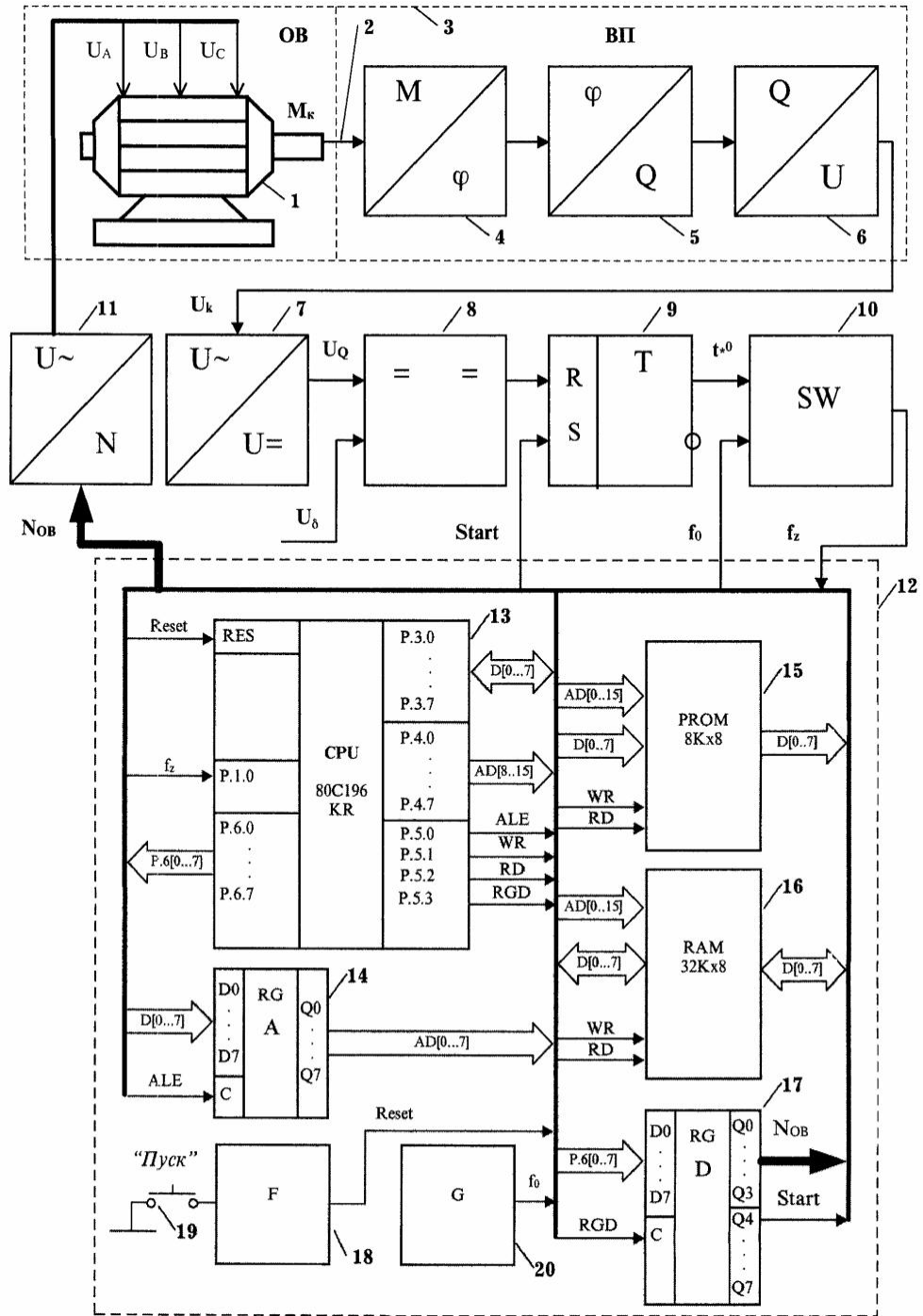
$$t_*^0 = J \cdot \frac{2}{P} \cdot \ln \left(M_k \cdot \frac{g \cdot K1}{\delta \cdot C} \right). \quad (10)$$

Остаточна формула для розрахунку моменту інерції ротора асинхронної машини матиме вигляд:

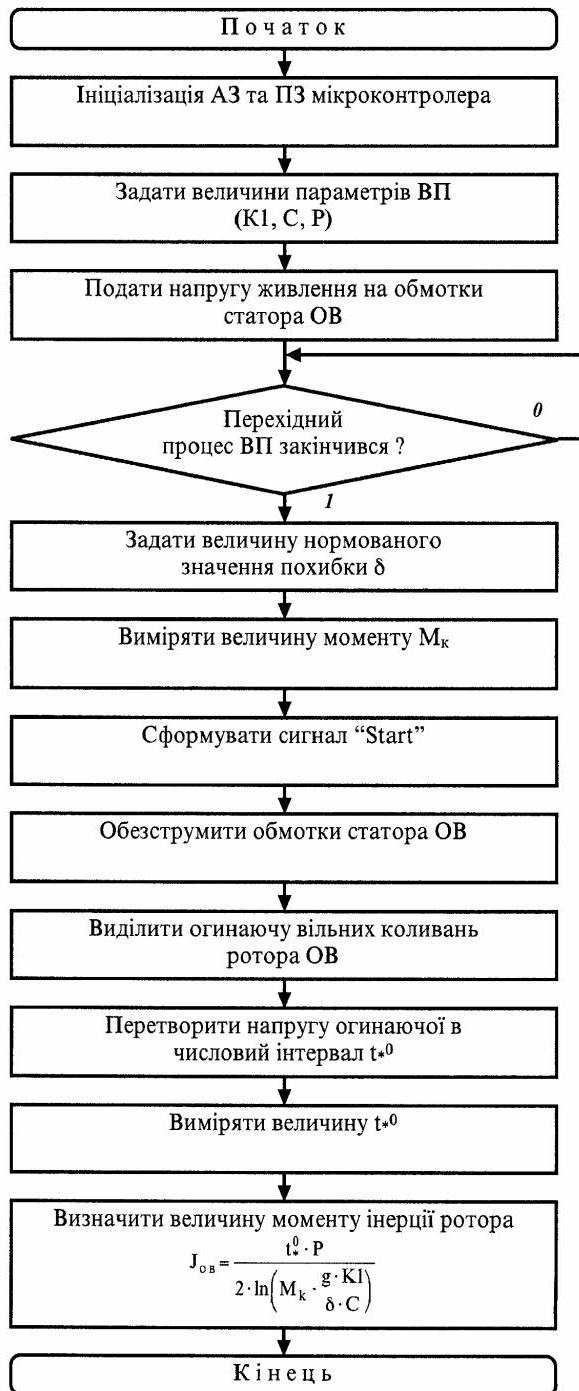
$$J_{об} = \frac{t_*^0 \cdot P}{2 \cdot \ln \left(M_k \cdot \frac{g \cdot K1}{\delta \cdot C} \right)}. \quad (11)$$



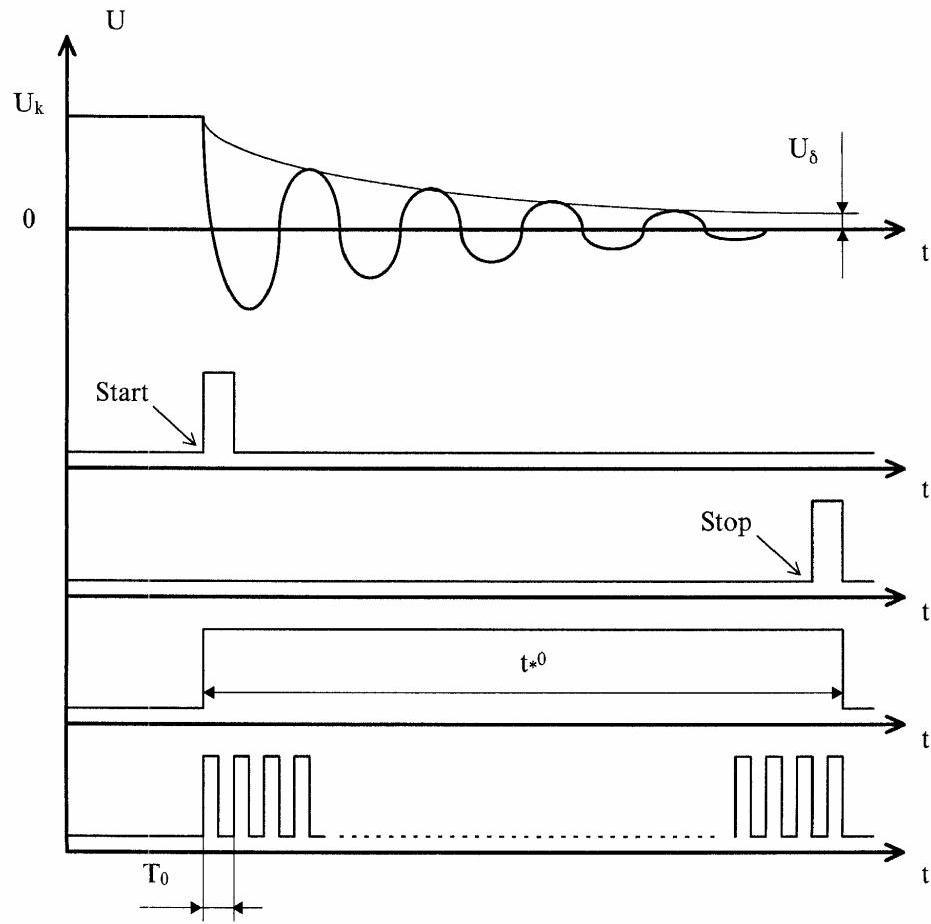
Фіг. 1



Фиг. 2



Фіг. 3



Фиг. 4