



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **39949** (13) **U**
(51) МПК (2009)
H02P 21/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ПОТОКОЗЧЕПЛЕНЬ РОТОРА Й ШВИДКОСТІ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

1

2

(21) u200809286

(22) 16.07.2008

(24) 25.03.2009

(46) 25.03.2009, Бюл. № 6, 2009 р.

(72) ВОЛКОВ ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ, СКА-
ЛЬКО ЮРІЙ СЕРГІЙОВИЧ

(73) ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

(57) 1. Спосіб визначення потокозчеплень ротора й швидкості частотно-регульованого асинхронного двигуна, який полягає у тому, що контролюють проекції узагальнених векторів статорної напруги й струму двигуна на осі нерухомої ортогональної координатної системи "α-β", пов'язаної віссю "α" з геометричною віссю статорної обмотки фази "А" двигуна, обчислюють проекції узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна на осі "α" і "β" зазначеної нерухомої ортогональної координатної системи у вигляді діленої на коефіцієнт зв'язку ротора різниці проекцій узагальненого вектора статорної напруги на відповідну вісь даної координатної системи й двох від'ємників, перший з яких дорівнює добутку активного опору статорної обмотки двигуна на значення проекції узагальненого вектора статорного струму на цю ж вісь нерухомої ортогональної координатної системи, а другий - добутку сумарної індуктивності розсіювання двигуна на похідну за часом від тієї ж проекції узагальненого вектора статорного струму, розраховують проекції U_α , U_β узагальненого вектора напруги ротора на осі "α" і "β" нерухомої ортогональної координатної системи шляхом вирахування із проекцій E_α , E_β узагальненого вектора ЕРС ротора добутків, обчислених у результаті множення проекцій $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ узагальненого вектора статорного струму на коефіцієнт λ :

$$\begin{cases} U_\alpha = E_\alpha - \lambda I_{s\alpha} \\ U_\beta = E_\beta - \lambda I_{s\beta} \end{cases}, \quad (1)$$

через визначені значення проекцій ψ_α , ψ_β узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна й розраховані проекції узагальненого вектора

напруги ротора знаходять швидкість двигуна зі співвідношення:

$$\omega = (\psi_\alpha U_\beta - \psi_\beta U_\alpha) / (\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2), \quad (2)$$

через визначені значення швидкості й проекцій узагальненого вектора напруги ротора й задане зворотне значення q електромагнітної постійної часу ротора обчислюють оцінні значення проекцій ψ_α , ψ_β узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна із залежностей:

$$\begin{cases} \psi_\alpha' = (\omega U_\beta - q U_\alpha) / (\omega^2 + q^2) \\ \psi_\beta' = (\omega U_\alpha + q U_\beta) / (\omega^2 + q^2) \end{cases}, \quad (3)$$

який **відрізняється** тим, що проекції ψ_α , ψ_β узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна визначають у результаті інтегрування за часом t різниці проекцій E_α , E_β узагальненого вектора ЕРС ротора й керуючих сигналів F_α , F_β :

$$\begin{cases} \psi_\alpha = \int_0^t (E_\alpha - F_\alpha) dt \\ \psi_\beta = \int_0^t (E_\beta - F_\beta) dt \end{cases}, \quad (4)$$

при цьому контролюють відхилення $\Delta \psi_\alpha$, $\Delta \psi_\beta$ між визначеними й оцінними значеннями проекцій узагальненого вектора потокозчеплення ротора:

$$\begin{cases} \Delta \psi_\alpha = \psi_\alpha - \psi_\alpha' \\ \Delta \psi_\beta = \psi_\beta - \psi_\beta' \end{cases}, \quad (5)$$

пропорційно значенням яких формують згадані керуючі сигнали F_α , F_β , а зазначений коефіцієнт λ обчислюють у вигляді добутку індуктивності намагнічування двигуна на зворотне значення його електромагнітної постійної часу ротора.

2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що обчислюють уточнені значення проекцій E_α^* , E_β^* узагальненого вектора ЕРС ротора шляхом множення на корегувальний коефіцієнт ξ визначених

(19) **UA** (11) **39949** (13) **U**

проекцій E_α , E_β узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна:

$$\left. \begin{aligned} E_\alpha^* &= \xi E_\alpha, \\ E_\beta^* &= \xi E_\beta \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

при цьому розраховують значення косинуса й синуса від аргументу θ_I узагальненого вектора статорного струму двигуна в результаті ділення відповідно проекцій $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ узагальненого вектора статорного струму на корінь квадратний із суми квадратів визначених проекцій:

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_I &= \frac{I_{s\alpha}}{\sqrt{I_{s\alpha}^2 + I_{s\beta}^2}}, \\ \sin \theta_I &= \frac{I_{s\beta}}{\sqrt{I_{s\alpha}^2 + I_{s\beta}^2}} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

визначають уточнене значення проекції E_v^* узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна на вісь "v" обертової ортогональної координатної системи "u-v", орієнтованої віссю "u" за узагальненим вектором статорного струму, у вигляді:

$$E_v^* = E_\beta^* \cos \theta_I - E_\alpha^* \sin \theta_I, \quad (8)$$

контролюють кутову частоту ω_ψ узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна й визначають оцінні значення E'_α , E'_β проекцій узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна із залежностей:

$$\left. \begin{aligned} E'_\alpha &= -\omega_\psi \psi_\beta, \\ E'_\beta &= \omega_\psi \psi_\alpha \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

обчислюють оцінне значення E'_v проекції узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна на вісь "v" обертової ортогональної координатної системи "u-v" зі співвідношення:

$$E'_v = E'_\beta \cos \theta_I - E'_\alpha \sin \theta_I, \quad (10)$$

а значення корегувального коефіцієнта ξ визначають у результаті виділення постійної складової із сигналу, обчисленого у вигляді частки від ділення згаданих уточненої й оцінної проекцій узагаль-

неного вектора ЕРС ротора на вісь "v" обертової ортогональної координатної системи "u-v".

3. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що обчислюють модуль ψ узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна у вигляді кореня квадратного із суми квадратів визначених проекцій ψ_α , ψ_β цього вектора на осі "α" і "β" нерухомої ортогональної координатної системи, розраховують значення косинуса й синуса від аргументу θ_ψ узагальненого вектора потокозчеплення ротора шляхом ділення відповідно проекцій ψ_α , ψ_β на модуль узагальненого вектора потокозчеплення ротора, визначають проекції узагальненого вектора ЕРС ротора й статорного струму двигуна на вісь "x" обертової ортогональної координатної системи "x-y", орієнтованою віссю "x" за узагальненим вектором потокозчеплення ротора двигуна, у вигляді відповідно:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_\alpha \cos \theta_\psi + E_\beta \sin \theta_\psi, \\ I_{sx} &= I_{s\alpha} \cos \theta_\psi + I_{s\beta} \sin \theta_\psi \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

розраховують інтеграли I_1 , I_2 за часом за однаковий часовий інтервал τ від абсолютного значення проекції E_x узагальненого вектора ЕРС ротора й від абсолютного значення різниці між модулем ψ узагальненого вектора потокозчеплення ротора й добутком індуктивності L_m намагнічування двигуна на проекцію I_{sx} узагальненого вектора статорного струму:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \int_0^\tau |E_x| dt, \\ I_2 &= \int_0^\tau |\psi - L_m I_{sx}| dt \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

а зворотне значення q електромагнітної постійної часу ротора двигуна задають у вигляді частки від ділення зазначених інтегралів.

Корисна модель відноситься до галузі електротехніки, а саме – до частотно-регульованих асинхронних електроприводів з векторним керуванням, у яких поточні значення потокозчеплень ротора й швидкості двигуна визначаються непрямым способом через його статорні напруги й струми.

Непряме визначення потокозчеплень і швидкості асинхронного двигуна (через згадані його статорні напруги й струми) дозволяє виключити встановлення додаткових датчиків усередині (датчиків магнітного потоку або вимірювальних обмоток ЕРС) або на валу (швидкості, положення ротора) двигуна, що, у свою чергу, спрощує конструкцію двигуна (не вимагає переробки серійного двигуна або виготовлення його із двома кін-

цями вала) та підвищує експлуатаційну надійність (через відсутність датчиків у повітряному зазорі або на валу двигуна) частотно-регульованого асинхронного електропривода в цілому, а також – розширює область застосування зазначеного електропривода на запилені, агресивні та вибухонебезпечні середовища.

Відомий з [1] спосіб визначення потокозчеплень ротора частотно-регульованого асинхронного двигуна, який полягає у тому, що контролюють проекції узагальнених векторів статорної напруги й струму двигуна на осі нерухомої ортогональної координатної системи «α-β», пов'язаною віссю «α» с геометричною віссю статорної обмотки фази «А» двигуна, обчислюють проекції узагальненого вектора ЕРС статора двигуна на осі «α» і «β» за-

значеної нерухомої ортогональної координатної системи у вигляді різниці проекції узагальненого вектора статорної напруги на відповідну вісь координатної системи й добутку активного опору статорної обмотки двигуна на поточне значення проекції узагальненого вектора статорного струму на ту ж вісь нерухомої ортогональної координатної системи, за допомогою аперіодичних ланок розраховують через обчислені проекції узагальненого вектора ЕРС статора на осі « α » і « β » координатної системи проекції узагальненого вектора потокозчеплення статора двигуна на відповідні осі нерухомої ортогональної координатної системи, віднімаючи з останніх добутки сумарної індуктивності розсіювання статора двигуна на поточне значення проекції узагальненого вектора статорного струму двигуна, визначають поточні значення проекцій узагальненого вектора потокозчеплення ротора на осі « α » і « β » нерухомої координатної системи.

Недоліком відомого способу є невисока точність визначення проекцій узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна, обумовлена тим, що в цьому способі із проекцій узагальненого вектора ЕРС статора здійснюється знаходження проекцій узагальненого вектора потокозчеплення статора за допомогою аперіодичних ланок, а не – шляхом інтегрування (як необхідно при точному розрахунку проекцій потокозчеплень статора). У той же час застосування ідеального інтегрування у відомому способі на практиці виявляється неможливим внаслідок виникнення помилки, що накопичується, у існуючих інтеграторів (яка призводить також до помилки у визначенні проекцій потокозчеплення ротора, у тому числі – у вигляді зсуву нульового рівня, і, як наслідок, до порушення нормального функціонування способу). У свою чергу, через похибку при визначенні проекцій узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна в частотно-регульованих асинхронних електроприводах з векторним керуванням відбувається порушення координатної орієнтації обертової ортогональної координатної системи (орієнтованої зазвичай за узагальненим вектором потокозчеплення ротора, у якій відбувається регулювання електромагнітних параметрів режиму двигуна), внаслідок чого знижується якість регулювання електромеханічних процесів привода.

Найбільш близьким за технічною сутністю до запропонованого способу є спосіб визначення потокозчеплень ротора й швидкості частотно-регульованого асинхронного двигуна [2], який полягає у тому, що контролюють проекції узагальнених векторів статорної напруги й струму двигуна на осі нерухомої ортогональної координатної системи « α – β », пов'язаної віссю « α » з геометричною віссю статорної обмотки фази «А» двигуна, обчислюють проекції узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна на осі « α » і « β » зазначеної нерухомої ортогональної координатної системи у вигляді діленої на коефіцієнт зв'язку ротора різниці проекції узагальненого вектора статорної напруги на відповідну вісь даної координатної системи й двох від'ємників, перший з яких дорівнює добутку активного опору статорної обмотки двигуна на значення проекції узагальненого вектора статорного струму

на цю ж вісь нерухомої ортогональної координатної системи, а другий – добутку сумарної індуктивності розсіювання двигуна на похідну за часом від тієї ж проекції узагальненого вектора статорного струму, розраховують проекції U_α , U_β узагальненого вектора напруги ротора на осі « α » і « β » нерухомої ортогональної координатної системи шляхом віднімання із проекцій E_α , E_β узагальненого вектора ЕРС ротора добутків, обчислених у результаті множення проекцій $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ узагальненого вектора статорного струму на активний опір ротора R_r і коефіцієнт зв'язку ротора k двигуна:

$$\begin{cases} U_\alpha = E_\alpha - k R_r I_{s\alpha}, \\ U_\beta = E_\beta - k R_r I_{s\beta} \end{cases} \quad (1)$$

визначають проекції Ψ_α , Ψ_β узагальненого вектора потокозчеплення ротора й швидкість ω двигуна в результаті розв'язання для кожного поточного моменту часу системи рівнянь:

$$\begin{cases} \Psi_\alpha = (\omega U_\beta - U_\alpha / T) / (\omega^2 + 1/T^2), \\ \Psi_\beta = -(\omega U_\alpha + U_\beta / T) / (\omega^2 + 1/T^2), \\ \omega = (\Psi_\alpha U_\beta - \Psi_\beta U_\alpha) / (\Psi_\alpha^2 + \Psi_\beta^2) \end{cases}, \quad (2)$$

де T – електромагнітна постійна часу ротора двигуна.

До переваг відомого способу відноситься знаходження в ньому проекцій узагальненого вектора потокозчеплення ротора й швидкості в загальноприйнятій (для машин змінного струму) системі відносних одиниць [3], що скорочує й нормує межі зміни обумовлених параметрів, за рахунок чого може бути зменшена розрядність застосовуваного обчислювача. Недоліком відомого способу є відносна громіздкість виконуваних обчислень при функціонуванні даного способу, обумовлена використанням у ньому чисельним (ітераційним) методом розрахунку поточних значень параметрів, що визначаються, у кожній часовій точці розрахунку.

В основу корисної моделі поставлене завдання розробки більш простого в технічній реалізації способу визначення потокозчеплень ротора й швидкості частотно-регульованого асинхронного двигуна, за допомогою якого досягається здешевлення системи автоматичного керування частотно-регульованих асинхронних електроприводів при збереженні високої точності регулювання зазначених параметрів режиму двигуна.

Вирішення цього завдання досягається тим, що в способі визначення потокозчеплень ротора й швидкості частотно-регульованого асинхронного двигуна контролюють проекції узагальнених векторів статорної напруги й струму двигуна на осі нерухомої ортогональної координатної системи « α – β », пов'язаної віссю « α » з геометричною віссю статорної обмотки фази «А» двигуна, обчислюють проекції узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна на осі « α » і « β » зазначеної нерухомої ортогональної координатної системи у вигляді діленої на коефіцієнт зв'язку ротора різниці проекції узагальненого вектора статорної напруги на відповідну вісь даної координатної системи й двох від'ємни-

ків, перший з яких дорівнює добутку активного опору статорної обмотки двигуна на значення проекції узагальненого вектора статорного струму на цю ж вісь нерухомої ортогональної координатної системи, а другий – добутку сумарної індуктивності розсіювання двигуна на похідну за часом від тієї ж проекції узагальненого вектора статорного струму, розраховують проекції U_α , U_β узагальненого вектора напруги ротора на осі « α » і « β » нерухомої ортогональної координатної системи шляхом віднімання із проекцій E_α , E_β узагальненого вектора ЕРС ротора добутків, обчислених у результаті множення проекцій $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ узагальненого вектора статорного струму на коефіцієнт λ :

$$\left. \begin{aligned} U_\alpha &= E_\alpha - \lambda I_{s\alpha}, \\ U_\beta &= E_\beta - \lambda I_{s\beta} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

через визначені значення проекцій Ψ_α , Ψ_β узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна й розраховані проекції узагальненого вектора напруги ротора знаходять швидкість двигуна зі співвідношення:

$$\omega = (\Psi_\alpha U_\beta - \Psi_\beta U_\alpha) / (\Psi_\alpha^2 + \Psi_\beta^2), \quad (4)$$

через визначені значення швидкості й проекцій узагальненого вектора напруги ротора й задане зворотне значення q електромагнітної постійної часу ротора обчислюють оцінні значення проекцій Ψ'_α , Ψ'_β узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна із залежностей:

$$\left. \begin{aligned} \Psi'_\alpha &= (\omega U_\beta - q U_\alpha) / (\omega^2 + q^2), \\ \Psi'_\beta &= -(\omega U_\alpha + q U_\beta) / (\omega^2 + q^2) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

додатково проекції Ψ_α , Ψ_β узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна визначають у результаті інтегрування за часом t різниці проекцій E_α , E_β узагальненого вектора ЕРС ротора й керуючих сигналів F_α , F_β :

$$\left. \begin{aligned} \Psi_\alpha &= \int_0^t (E_\alpha - F_\alpha) dt, \\ \Psi_\beta &= \int_0^t (E_\beta - F_\beta) dt \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

при цьому контролюють відхилення $\Delta\Psi_\alpha$, $\Delta\Psi_\beta$ між визначеними й оцінними значеннями проекцій узагальненого вектора потокозчеплення ротора:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\Psi_\alpha &= \Psi_\alpha - \Psi'_\alpha, \\ \Delta\Psi_\beta &= \Psi_\beta - \Psi'_\beta \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

пропорційно значенням яких формують згадані керуючі сигнали F_α і F_β , а зазначений коефіцієнт λ обчислюють у вигляді добутку індуктивності намагнічування двигуна на зворотне значення його електромагнітної постійної часу ротора.

Для підвищення точності визначення потокозчеплень ротора двигуна додатково обчислюють уточнені значення проекцій E_α^* , E_β^* узагальненого вектора ЕРС ротора шляхом множення на корегувальний коефіцієнт ξ визначених проекцій E_α , E_β

узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна:

$$\left. \begin{aligned} E_\alpha^* &= \xi E_\alpha, \\ E_\beta^* &= \xi E_\beta \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

при цьому розраховують значення косинуса й синуса від аргументу θ_1 узагальненого вектора статорного струму двигуна в результаті ділення відповідно проекцій $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ узагальненого вектора статорного струму на корінь квадратний із суми квадратів зазначених проекцій:

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_1 &= I_{s\alpha} / \sqrt{I_{s\alpha}^2 + I_{s\beta}^2}, \\ \sin \theta_1 &= I_{s\beta} / \sqrt{I_{s\alpha}^2 + I_{s\beta}^2} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

визначають уточнене значення проекції E_V^* узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна на вісь « v » обертової ортогональної координатної системи « $u-v$ », орієнтованою віссю « u » за узагальненим вектором статорного струму, у вигляді:

$$E_V^* = E_\beta^* \cos \theta_1 - E_\alpha^* \sin \theta_1, \quad (10)$$

контролюють кутову частоту ω_ψ узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна й визначають оцінні значення E'_α , E'_β проекцій узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна із залежностей:

$$\left. \begin{aligned} E'_\alpha &= -\omega_\psi \Psi_\beta, \\ E'_\beta &= \omega_\psi \Psi_\alpha \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

обчислюють оцінне значення E'_V проекції узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна на вісь « v » обертової ортогональної координатної системи « $u-v$ » зі співвідношення:

$$E'_V = E'_\beta \cos \theta_1 - E'_\alpha \sin \theta_1, \quad (12)$$

а значення корегувального коефіцієнта λ визначають у результаті виділення постійної складової із сигналу, обчисленої у вигляді частки від ділення згаданих уточненої й оцінної проекції узагальненого вектора ЕРС ротора на вісь « v » обертової ортогональної координатної системи « $u-v$ ».

Для підвищення точності визначення швидкості двигуна додатково обчислюють модуль Ψ узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна у вигляді кореня квадратного із суми квадратів визначених проекцій Ψ_α , Ψ_β цього вектора на осі « α » і « β » нерухомої ортогональної координатної системи, розраховують значення косинуса й синуса від аргументу θ_ψ узагальненого вектора потокозчеплення ротора шляхом ділення відповідно проекцій Ψ_α і Ψ_β на модуль узагальненого вектора потокозчеплення ротора, визначають проекції узагальненого вектора ЕРС ротора й статорного струму двигуна на вісь « x » обертової ортогональної координатної системи « $x-y$ », орієнтованої віссю « x » за узагальненим вектором потокозчеплення ротора двигуна, у вигляді відповідно:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_\alpha \cos \theta_\Psi + E_\beta \sin \theta_\Psi, \\ I_{sx} &= I_{s\alpha} \cos \theta_\Psi + I_{s\beta} \sin \theta_\Psi \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

розраховують інтеграли I_1 , I_2 за часом за однаковий часовий інтервал τ від абсолютного значення проекції E_x узагальненого вектора ЕРС ротора й від абсолютного значення різниці між модулем Ψ узагальненого вектора потокозчеплення ротора й добутком індуктивності L_m намагнічування двигуна на проекцію I_{sx} узагальненого вектора статорного струму:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \int_0^\tau |E_x| dt, \\ I_2 &= \int_0^\tau |\Psi - L_m I_{sx}| dt \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

а зворотне значення q електромагнітної постійної часу ротора двигуна задають у вигляді частки від ділення зазначених інтегралів.

У запропонованому способі визначення проекцій узагальненого вектора потокозчеплення ротора й швидкості двигуна здійснюється з використанням відносно простих операцій обчислення. По-перше, – керуючих сигналів F_α , F_β , пропорційних відхиленням між визначеними Ψ_α , Ψ_β і оцінними Ψ'_α , Ψ'_β значеннями проекцій узагальненого вектора потокозчеплення ротора (які формуються, наприклад, за допомогою пропорційних або пропорційно-інтегральних ланок). По-друге, – інтегралів за часом від різниць між проекціями E_α , E_β узагальненого вектора ЕРС ротора й згаданих керуючих сигналів F_α , F_β . За рахунок цього виключається ітераційна (циклічна) послідовність розрахунку на кожному часовому кроці розрахунку й забезпечується скорочення загального числа обчислювальних операцій, а також – зменшення загального часу розрахунку, що, у свою чергу, дозволяє знизити вимоги до обчислювальної потужності й швидкодії застосовуваного в системі автоматичного керування обчислювача, а, отже, – зменшити вартість системи автоматичного керування електроприводом і частотно-регульованим асинхронним електроприводом у цілому.

Таким чином, нові ознаки при взаємодії з відомими ознаками забезпечують появу нових технічних властивостей. Зокрема, шляхом введення нових операцій розроблено спосіб визначення потокозчеплень ротора й швидкості частотно-регульованого асинхронного двигуна. Це забезпечує усій заявленій сукупності ознак способу відповідність критерію «новизна».

Аналоги, які містять ознаки, що відрізняються від прототипу, не знайдені, рішення явно не витікає з відомого рівня техніки. Виходячи з вищевикладеного, можна зробити висновок, що запропоноване рішення задовольняє критерію «винахідницький рівень».

Ідея корисної моделі пояснюється кресленнями:

на Фіг.1 – функціональна схема пристрою, що реалізує запропонований спосіб;

на Фіг.2 – функціональна схема пристрою, що реалізує запропонований спосіб при підвищеній точності визначення потокозчеплень ротора двигуна;

на Фіг.3 і Фіг.4 – функціональні схеми варіантів реалізації датчика частоти;

на Фіг.5 – функціональна схема пристрою, що реалізує запропонований спосіб при підвищеній точності визначення швидкості двигуна;

на Фіг.6 і Фіг.7 – векторні діаграми, що пояснюють функціонування пристроїв, показаних на схемах на Фіг.2 і Фіг.3 відповідно.

Функціональна схема пристрою на Фіг.1 містить блоки обчислювачів 1 і 2, обчислювачі швидкості 3 і оцінних значень потокозчеплень ротора 4, задатчик зворотного значення постійної часу ротора 5, датчики проекцій статорних напруг 6, 7 і статорних струмів 8, 9. Блоки обчислювачів 1 і 2 виконані між собою ідентично й містять кожний у своєму складі: регулятор 10 і інтегратор 11, два суматори 12 і 13, обчислювач проекції напруги ротора 14 і датчик проекції ЕРС ротора 15, що складається із суматора 16, пов'язаного своїм першим і другим входами відповідно через пропорційну ланку 17 і диференціююча ланка 18 з першим входом блоку обчислювачів 1 (або 2), а третій вхід суматора 16 є другим входом зазначеного блоку обчислювачів 1 (або 2). Причому вихід суматора 16 є виходом датчика проекції ЕРС ротора 15 і підключений до першого входу суматора 13 і першому входу обчислювача проекції напруги ротора 14, у якого другий вхід приєднаний до першого входу блоку обчислювачів 1 (або 2), а третій вхід і вихід обчислювача проекції напруги ротора 14 є відповідно третім входом і першим виходом зазначеного блоку обчислювачів 1 (або 2).

При цьому вихід суматора 12 пов'язаний через регулятор 10 із другим входом суматора 13, вихід якого зв'язаний через інтегратор 11 з першим входом суматора 12, що є другим виходом блоку обчислювачів 1 (або 2), а другий вхід суматора 12 є четвертим входом зазначеного блоку обчислювачів 1 (або 2). Перший і другий входи блоків обчислювачів 1 і 2 підключені до виходів датчиків проекцій статорного струму 8, 9 і статорної напруги 6, 7 відповідно, треті входи блоків обчислювачів 1 і 2 з'єднані разом і підключені до виходу задатчика зворотного значення постійної часу ротора 5, а четверті входи блоків обчислювачів 1 і 2 приєднані відповідно до першого й другого виходів обчислювача оцінних значень потокозчеплень ротора 4. Перші входи блоків обчислювачів 1 і 2 підключені відповідно до першого й другого входів обчислювача швидкості 3 і першому й другому входом обчислювача оцінних значень потокозчеплень ротора 4. Другі входи зазначених блоків обчислювачів 1 і 2 приєднані відповідно до третього й четвертого входів обчислювача швидкості 3, вихід якого з'єднаний із третім входом обчислювача оцінних значень потокозчеплень ротора 4.

У функціональній схемі пристрою на Фіг.2 (що реалізує запропонований спосіб при підвищеній точності визначення потокозчеплень ротора двигуна) блоки обчислювачів 1 і 2 виконані ідентично між собою й містять у своєму складі додатково

множний блок 19, підключений між виходом датчика проєкцій ЕРС ротора 15 і першим входом суматора 13, причому другий вхід і вихід множного блоку 19 є відповідно п'ятим входом і третім виходом блоку обчислювачів 1 (або 2).

При цьому згадані п'ять входи блоків обчислювачів 1 і 2 з'єднані разом і приєднані до виходу обчислювача корегувального коефіцієнта 20, що містить у своєму складі: перші й другий координатні перетворювачі 21 і 22, перший ділильний блок 23, фільтр 24, обчислювач оцінного значення ЕРС 25, датчик частоти 26 і обчислювач гармонійних функцій 27, що складається із других і третього ділильних блоків 28 і 29, квадраторного обчислювача 30 (що обчислює корінь квадратний із суми квадратів). Перші входи обчислювача 30 і ділильного блоку 28 з'єднані разом і підключені до виходу датчика проєкції статорного струму 8, другий вхід обчислювача 30 і перший вхід ділильного блоку 29 з'єднані разом і підключені до виходу датчика проєкції статорного струму 9, а другі входи ділильних блоків 28 і 29 з'єднані разом і підключені до виходу обчислювача 30.

Перші входи координатних перетворювачів 21 і 22 з'єднані разом і підключені до виходу ділильного блоку 28, другі входи координатних перетворювачів 21 і 22 з'єднані разом і підключені до виходу ділильного блоку 29, а виходи першого 21 і другого 22 координатних перетворювачів приєднані відповідно до першого й другого входів ділильного блоку 23, підключеного своїм виходом до виходу фільтра 24, вихід якого є виходом обчислювача корегувального коефіцієнта 20. Третій і четвертий входи координатного перетворювача 21 з'єднані з першим і другим виходами обчислювача оцінного значення ЕРС 25, у якого перший і другий входи підключені до других виходів блоків обчислювачів 1 і 2 відповідно, а третій вхід – з'єднаний з виходом датчика частоти 26. Третій і четвертий входи координатного перетворювача 22 приєднані до третіх виходів блоків обчислювачів 1 і 2 відповідно.

Функціональна схема першого можливого варіанта реалізації датчика частоти 26 представлена на Фіг.3 і містить: суматор 31, пропорційно-інтегральний регулятор 32, інтегратор 33, обчислювачі синуса 34 і косинуса 35, координатний перетворювач 36, перший і другий входи якого підключені до других виходів блоків обчислювачів 1 і 2 відповідно. При цьому вихід координатного перетворювача 36 пов'язаний через послідовно підключені суматор 31, регулятор 32 і інтегратор 33 із з'єднаними між собою разом входами обчислювачів 34 і 35, виходи яких підключені відповідно до третього й четвертого входів координатного перетворювача 36; причому, другий вхід суматора 31 з'єднаний із загальним виводом живлення, а вихід регулятора 32 є виходом датчика частоти 26.

Функціональна схема другого можливого варіанта реалізації датчика частоти представлена на Фіг.4 і містить: множні блоки 37–40, суматори 41 і 41, ділильний блок 43. При цьому перші входи множних блоків 37 і 38 підключені до першим входом суматора 13 у блоках обчислювачів 1 і 2 відповідно, другий вхід множного блоку 37 підключе-

ний до з'єднаного разом першому й другому входам множного блоку 39 і до другого виходу блоку обчислювачів 1, другий вхід множного блоку 38 підключений до з'єднаного разом першому й другому входам множного блоку 40 і до другого виходу блоку обчислювачів 2. Виходи множних блоків 37 і 38 приєднані відповідно до першого й другого входів суматора 41, виходи множних блоків 39 і 40 приєднані відповідно до першого й другого входів суматора 42, а виходи суматорів 41 і 42 підключені відповідно до першого й другого входів ділильного блоку 43, вихід якого є виходом датчика частоти 26.

У функціональній схемі пристрою на Фіг.5 (що реалізує запропонований спосіб при підвищеній точності визначення швидкості двигуна) задатчик зворотного значення постійної часу ротора 5 виконаний у вигляді координатних перетворювачів 44 і 45, обчислювача гармонійних функцій 46, блоків виділення модуля 47 і 48, інтеграторів 49 і 50, суматора 51 і пропорційної ланки 52, ділильного блоку 53, генератора імпульсів 54 і регістра 55. Обчислювач гармонійних функцій 46 складається з ділильних блоків 56 і 57, квадраторного обчислювача 58. Причому, перші входи ділильного блоку 56 і обчислювача 58 з'єднані разом і підключені до другого виходу блоку обчислювачів 1, перший вхід ділильного блоку 57 і другий вхід обчислювача 58 з'єднані разом і підключені до другого виходу блоку обчислювачів 2, другі входи ділильних блоків 56 і 57 з'єднані разом і підключені до виходу обчислювача 58 і до першого входу суматора 51, а виходи ділильних блоків 56 і 57 приєднані відповідно до перших і других входів координатних перетворювачів 44 і 45.

Третій і четвертий входи координатного перетворювача 44 підключені до перших входів суматора 13 у блоках обчислювачів 1 і 2 відповідно, а вихід – зв'язаний через послідовно з'єднані між собою блок виділення модуля 47 і інтегратор 49 з першим входом ділильного блоку 53. Третій і четвертий входи координатного перетворювача 45 з'єднані з виходами датчиків проєкцій статорного струму 8 і 9 відповідно, а вихід – зв'язаний через послідовно підключені між собою пропорційну ланку 52, суматор 51, блок виділення модуля 48 і інтегратор 50 із другим входом ділильного блоку 53, з'єднаного виходом із входом регістра 55. Вихід генератора імпульсів 54 підключений до з'єднаних разом другим (настановним) входам інтеграторів 49, 50 і регістра 55, а вихід регістра 55 є виходом задатчика зворотного значення постійної часу ротора 5.

На векторній діаграмі на Фіг.6 (яка пояснює функціонування пристрою на Фіг.2) показані: нерухома « α - β » (пов'язана зі статором двигуна) і обертова « u - v » (пов'язана віссю « u » з узагальненим вектором статорного струму двигуна) ортогональні координатні системи; узагальнені вектори статорної напруги \bar{U}_s й статорного струму \bar{I}_s двигуна;

розрахункові складові $(-R_s \bar{I}_s)$ і $(-L_\sigma \frac{d\bar{I}_s}{dt})$ уза-

гальненого вектора ЕРС \bar{E} ротора двигуна; оцін-

не значення проекції E'_γ узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна.

На векторній діаграмі на Фіг.7 (яка пояснює функціонування пристрою на Фіг.2) показані: нерухома « α - β » (зв'язана зі статором двигуна) і обертова « x_1 - y_1 » (з аргументом θ_k дійсної осі « x_1 ») ортогональні координатні системи; $\bar{\Psi}$ – узагальнений вектор потокозчеплення ротора; Ψ_{y1} – проекція узагальненого вектора потокозчеплення ротора на вісь « y_1 » обертової координатної системи « x_1 - y_1 ».

Запропонований спосіб визначення потокозчеплень ротора й швидкості частотно-регульованого асинхронного двигуна функціонує (розглянемо на прикладі пристрою, показаного на Фіг.1) у такий спосіб. За допомогою датчиків статорної напруги 6, 7 і датчиків статорного струму 8, 9 контролюють проекції $U_{s\alpha}$, $I_{s\alpha}$ і $U_{s\beta}$, $I_{s\beta}$ узагальнених векторів відповідно статорної напруги \bar{U}_s й статорного струму \bar{I}_s на осі нерухомої ортогональної координатної системи « α - β » (пов'язаної віссю « α » з геометричною віссю статорної обмотки фази «А» двигуна). На виходах пропорційної 17 і диференціюючої 18 ланок, що входять до складу блоків обчислювачів 1 і 2, визначають проекції (на осі « α » і « β » нерухомої ортогональної координатної системи) падінь напруги $\Delta U_{R\alpha}$, $\Delta U_{L\alpha}$ і $\Delta U_{R\beta}$, $\Delta U_{L\beta}$ (від протікання статорних струмів) відповідно на активному опорі R_s статора й на сумарній індуктивності розсіювання L_σ двигуна:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{R\alpha} &= R_s I_{s\alpha}, & \Delta U_{L\alpha} &= L_\sigma \frac{dI_{s\alpha}}{dt}, \\ \Delta U_{R\beta} &= R_s I_{s\beta}, & \Delta U_{L\beta} &= L_\sigma \frac{dI_{s\beta}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

За допомогою датчиків проекцій ЕРС ротора 15, що входять до складу блоків обчислювачів 1 і 2, розраховують проекції E_α , E_β узагальненого вектора ЕРС ротора \bar{E} двигуна на осі « α » і « β » нерухомої ортогональної координатної системи у вигляді діленої на коефіцієнт k зв'язку ротора різниці проекцій $U_{s\alpha}$ (або $U_{s\beta}$) узагальненого вектора статорної напруги \bar{U}_s на відповідну вісь даної координатної системи й двох від'ємників, перший з яких дорівнює добутку активного опору R_s статорної обмотки двигуна на значення проекції $I_{s\alpha}$ (або $I_{s\beta}$) узагальненого вектора статорного струму \bar{I}_s на цю же вісь нерухомої ортогональної координатної системи, а другий – добутку сумарної індуктивності розсіювання L_σ двигуна на похідну за часом від тієї ж проекції $I_{s\alpha}$ (або $I_{s\beta}$) узагальненого вектора статорного струму:

$$\left. \begin{aligned} E_\alpha &= \left[U_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha} - L_\sigma \frac{dI_{s\alpha}}{dt} \right] / k, \\ E_\beta &= \left[U_{s\beta} - R_s I_{s\beta} - L_\sigma \frac{dI_{s\beta}}{dt} \right] / k \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

За допомогою обчислювачів проекції статорної напруги 14, що входять до складу блоків обчислювачів 1 і 2, розраховують проекції U_α , U_β узагальненого вектора напруги ротора \bar{U} на осі « α » і « β »

нерухомої ортогональної координатної системи шляхом віднімання із проекцій E_α (або E_β) узагальненого вектора ЕРС ротора добутків, обчислених у результаті множення проекцій $I_{s\alpha}$ (або $I_{s\beta}$) узагальненого вектора статорного струму на коефіцієнт λ :

$$\left. \begin{aligned} U_\alpha &= E_\alpha - \lambda I_{s\alpha}, \\ U_\beta &= E_\beta - \lambda I_{s\beta} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

При цьому значення даного коефіцієнта λ у зазначеному обчислювачі 14 розраховують у вигляді добутку індуктивності намагнічування L_m двигуна на зворотне значення q його електромагнітної постійної часу (що надходить із задатчика даного значення 5):

$$\lambda = L_m q, \quad \text{де } q = 1/T. \quad (18)$$

Виходячи з відомих співвідношень для розрахунку електромагнітної постійної часу ротора T і коефіцієнта зв'язку k ротора [2]:

$$\left. \begin{aligned} T &= (L_m + L_{\sigma r}) / R_r, \\ k &= L_m / (L_m + L_{\sigma r}) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

обчислене значення коефіцієнта λ дорівнює добутку коефіцієнта зв'язку ротора k на активний опір R_r ротора двигуна:

$$\lambda = k R_r, \quad (20)$$

де $L_{\sigma r}$ – індуктивність розсіювання ротора.

З урахуванням останнього, залежності з (17) повністю рівнозначні співвідношенням (1), що використовуються у способі-прототипі для обчислення проекцій узагальненого вектора напруги ротора двигуна.

Через визначені на виходах інтеграторів 11 (що входять у блоки обчислювачів 1 і 2) значення проекцій Ψ_α , Ψ_β узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна й розраховані проекції U_α , U_β узагальненого вектора напруги ротора в обчислювачі 3 знаходять швидкість двигуна зі співвідношення:

$$\omega = (\Psi_\alpha U_\beta - \Psi_\beta U_\alpha) / (\Psi_\alpha^2 + \Psi_\beta^2). \quad (21)$$

В обчислювачі 4 через визначені значення швидкості ω і проекцій U_α , U_β узагальненого вектора напруги ротора, через задане від обчислювача 5 зворотне значення q електромагнітної постійної часу ротора розраховують оцінні значення проекцій Ψ'_α , Ψ'_β узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна із залежностей:

$$\left. \begin{aligned} \Psi'_\alpha &= (\omega U_\beta - q U_\alpha) / (\omega^2 + q^2), \\ \Psi'_\beta &= -(\omega U_\alpha + q U_\beta) / (\omega^2 + q^2) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

ідентичних, з урахуванням (17), співвідношенням з (2).

За допомогою суматорів 12 (що входять до складу блоків обчислювачів 1 і 2) контролюють відхилення $\Delta \Psi_\alpha$, $\Delta \Psi_\beta$ між визначеними (на виходах інтеграторів 11) значеннями Ψ_α , Ψ_β і оцінними значеннями Ψ'_α , Ψ'_β (отриманими на виходах обчислювача 4) проекцій узагальненого вектора потокозчеплення ротора у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\Psi_\alpha &= \Psi_\alpha - \Psi'_\alpha, \\ \Delta\Psi_\beta &= \Psi_\beta - \Psi'_\beta \end{aligned} \right\}. \quad (23)$$

Пропорційно даним відхиленням $\Delta\Psi_\alpha$ і $\Delta\Psi_\beta$, що надходять на входи регуляторів 10 (що входять до складу блоків обчислювачів 1 і 2), на виході зазначених регуляторів (виконаних, наприклад, у вигляді пропорційних або пропорційно-інтегральних ланок) формують керуючі сигнали F_α і F_β . На виході суматорів 13 (що входять також до складу блоків обчислювачів 1 і 2) розраховуються різниці між проекціями E_α , E_β узагальненого вектора ЕРС ротора й згаданих керуючих сигналів F_α , F_β :

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_\alpha &= E_\alpha - F_\alpha, \\ \Delta U_\beta &= E_\beta - F_\beta \end{aligned} \right\}. \quad (24)$$

При цьому за допомогою інтеграторів 11 (що входять до складу блоків обчислювачів 1 і 2) визначають шукані значення Ψ_α , Ψ_β проекцій узагальненого вектора потокозчеплення ротора шляхом інтегрування за часом t отриманих з (24) різниць ΔU_α і ΔU_β :

$$\left. \begin{aligned} \Psi_\alpha &= \int_0^t \Delta U_\alpha dt = \int_0^t (E_\alpha - F_\alpha) dt, \\ \Psi_\beta &= \int_0^t \Delta U_\beta dt = \int_0^t (E_\beta - F_\beta) dt \end{aligned} \right\}. \quad (25)$$

Запропонований спосіб, у порівнянні із прототипом, доповнений наступними простими операціями обчислення: віднімання й інтегрування, – які порівняно просто реалізуються сучасними цифровими обчислювачами. При цьому, шляхом здійснення в запропонованому способі безперервного контролю відхилень $\Delta\Psi_\alpha$ і $\Delta\Psi_\beta$ (між визначеними Ψ_α , Ψ_β і оцінними Ψ'_α , Ψ'_β значеннями проекцій узагальненого вектора потокозчеплення ротора) і впливу (у функції цих відхилень) регуляторів 10 своїми вихідними сигналами F_α , F_β на один із входів суматора 13, забезпечується ефективна компенсація часового дрейфу нуля інтеграторів 11 (що входять до складу блоків обчислювачів 1 і 2).

У запропонованому способі (на відміну від способу-прототипу) здійснюється визначення проекцій потокозчеплення Ψ_α , Ψ_β ротора й швидкості ω двигуна без застосування ітераційних (циклічних) розрахунків (на кожному часовому кроці розрахунку), що скорочує загальну кількість виконуваних обчислювальних операцій і зменшує час розрахунку. Це, у свою чергу, дозволяє знизити вимоги до обчислювача (застосовуваному в системі автоматичного керування) за обчислювальною потужністю та швидкодією, а, отже, – зменшити вартість зазначеного обчислювача й частотно-регульованого асинхронного електропривода в цілому.

Пристрій на Фіг.2 (у якому реалізується запропонований спосіб при підвищеній точності визначення потокозчеплень ротора двигуна) функціонує аналогічно розглянутому пристрою на Фіг.1 з наступними відмінностями. Через проекції $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ статорного струму двигуна, що поступають на його

входи з виходів датчиків 8 і 9, обчислювач гармонічних функцій 27 розраховує на своїх виходах значення косинуса й синуса від аргументу узагальненого вектора статорного струму двигуна шляхом ділення відповідно зазначених проекцій $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ на корінь квадратний із суми квадратів цих проекцій:

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_1 &= I_{s\alpha} / \sqrt{I_{s\alpha}^2 + I_{s\beta}^2}, \\ \sin \theta_1 &= I_{s\beta} / \sqrt{I_{s\alpha}^2 + I_{s\beta}^2} \end{aligned} \right\}, \quad (26)$$

які надходять на перший і другий входи координатних перетворювачів 21 і 22.

На виході множних блоків 19 (що входять до складу блоків обчислювачів 1 і 2) контролюють

уточнені значення проекцій E_α^* , E_β^* узагальненого

вектора ЕРС ротора, які надходять на третій і четвертий входи координатного перетворювача 22. Даний координатний перетворювач 22 визначає

уточнене значення проекції E_v^* узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна на вісь «v» обертової ортогональної координатної системи «u–v», орієнтовану віссю «u» за узагальненим вектором статорного струму, у вигляді:

$$E_v^* = E_\beta^* \cos \theta_1 - E_\alpha^* \sin \theta_1. \quad (27)$$

За допомогою датчика частоти 26 контролюють кутову частоту ω_ψ узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна. Через вказане значення кутової частоти ω_ψ і значення проекцій Ψ_α , Ψ_β узагальненого вектора потокозчеплення ротора, що поступають із других виходів блоків обчислювачів 1 і 2, за допомогою обчислювача 25 розраховують оцінні значення E'_α , E'_β проекцій узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна на осі нерухомої ортогональної координатної системи «α–β»:

$$\left. \begin{aligned} E'_\alpha &= -\omega_\psi \Psi_\beta, \\ E'_\beta &= \omega_\psi \Psi_\alpha \end{aligned} \right\}, \quad (28)$$

які надходять на третій і четвертий входи координатного перетворювача 21.

Даний координатний перетворювач 21 обчислює на своєму виході оцінне значення E'_v проекції узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна на вісь «v» обертової ортогональної координатної системи «u–v» зі співвідношення:

$$E'_v = E'_\beta \cos \theta_1 - E'_\alpha \sin \theta_1. \quad (29)$$

Ділильний блок 23 через сигнали E'_v й E_v^* , що поступають на його входи з виходів координатних перетворювачів 21 і 22, розраховує частку від ділення уточненої E'_v й оцінної E_v^* проекцій узагальненого вектора ЕРС ротора на вісь «v» обертової ортогональної координатної системи «u–v» у вигляді: E_v^* / E'_v . Фільтр (низької частоти) 24 шляхом виділення з вихідного сигналу блоку ділення 23 постійної складової визначає значення корегу-

вального коефіцієнта ξ .

Множинні блоки 19 (що входять до складу блоків обчислювачів 1 і 2) обчислюють уточнені значення проєкцій E_{α}^* , E_{β}^* узагальненого вектора ЕРС ротора шляхом множення на корегувальний коефіцієнт ξ визначених проєкцій E_{α} , E_{β} цього вектора (що надходять із виходу датчика проєкції ЕРС ротора 15 у блоках обчислювачів 1 і 2):

$$\left. \begin{aligned} E_{\alpha}^* &= \xi E_{\alpha}, \\ E_{\beta}^* &= \xi E_{\beta} \end{aligned} \right\}. \quad (30)$$

У тому випадку, якщо згадані уточнені E_{α}^* й оцінна E'_{α} проєкції рівні між собою, то, очевидно, значення корегувального коефіцієнта ξ дорівнює одиниці, і функціонування пристрою на Фіг.2 відбувається аналогічно описаному раніше пристрою, показаному на Фіг.1. Така ситуація виникає в тому випадку, якщо пропорційною ланкою 17 у датчику проєкцій ЕРС ротора (що входить до складу блоків обчислювачів 1 і 2) задаються правильні (істинні) значення падінь напруги $R_s^* I_{s\alpha}$, $R_s^* I_{s\beta}$ на активному опорі статорних обмоток двигуна:

$$R_s^* I_{s\alpha} = R_s I_{s\alpha} \quad \text{та} \quad R_s^* I_{s\beta} = R_s I_{s\beta}, \quad (31)$$

де R_s^* і R_s – відповідно заданий (пропорційною ланкою 17) і фактичний активні опори статора двигуна.

Очевидно, у розглянутому випадку задане й фактичне значення активного опору статорної обмотки двигуна рівні: $R_s^* = R_s$. У результаті цього на виходах датчиків ЕРС 15 і множинних блоків 19 обчислюються істинні значення проєкцій ЕРС ротора двигуна:

$$E_{\alpha}^* = E_{\alpha} \quad \text{та} \quad E_{\beta}^* = E_{\beta}, \quad (32)$$

а на виході інтеграторів 11 – визначаються точні (істинні) значення проєкцій Ψ_{α} , Ψ_{β} потокозчеплень ротора двигуна.

На практиці ж, внаслідок варіювання температурного режиму роботи двигуна (викликаного, наприклад, зміною його струмового навантаження або температури зовнішнього навколишнього середовища), спостерігається пов'язана із цим зміна фактичного значення R_s активного опору статорної обмотки двигуна, що призводить до нерівності заданого R_s^* (у пропорційній ланці 17) і фактично-

го R_s активних опорів ($R_s^* \neq R_s$). У результаті цього здійснюється неправильна (неповна) компенсація пропорційною ланкою 17 (у блоках обчислювачів 1 і 2) падінь напруг на активному опорі статорної обмотки двигуна:

$$R_s^* I_{s\alpha} \neq R_s I_{s\alpha} \quad \text{та} \quad R_s^* I_{s\beta} \neq R_s I_{s\beta}, \quad (33)$$

що, у свою чергу, призводить у пристрої на Фіг.1 до помилки у визначенні проєкцій E_{α} , E_{β} узагальненого вектора ЕРС ротора, і, як наслідок, – до помилки при визначенні потокозчеплень ротора

Ψ_{α} , Ψ_{β} на виході інтеграторів 11 у блоках обчислювачів 1 і 2.

У пристрої на Фіг.2 при даній ситуації виникає відхилення (відмінність) між оцінним E'_{α} (що розраховується координатним перетворювачем 21 з (28) і (29) через проєкції Ψ_{α} , Ψ_{β} узагальненого вектора потокозчеплення ротора й кутову частоту ω_{ψ})

і уточненим E_{α}^* (що обчислюють на виході координатного перетворювача 22) значеннями проєкцій узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна на вісь «v» обертової ортогональної координатної системи «u-v» (орієнтованої віссю «u» за узагальненим вектором статорного струму двигуна). При цьому, відповідно до векторної діаграми на Фіг.6, проєкція на згадану вісь «v» узагальненого вектора ЕРС ротора \vec{E} не залежить від падіння напруги ($-R_s I_s$) на активному опорі статорної обмотки двигуна, а, отже, – і від значення R_s активного опору статора двигуна.

При виникненні зазначених відхилень між уточненим E_{α}^* (не залежним від активного опору статора R_s) і оцінним E'_{α} значеннями проєкцій узагальненого вектора ЕРС ротора стає відмінним від одиниці значення корегувального коефіцієнта ξ , що розраховується на виході обчислювача 20. За допомогою даного корегувального коефіцієнта знаходяться із (30) нові уточнені значення E_{α}^* , E_{β}^* проєкцій узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна, які забезпечують рівність між собою уточненого E_{α}^* й оцінного E'_{α} значень проєкцій узагальненого вектора ЕРС ротора на вісь «v» обертової ортогональної координатної системи «u-v»:

$$E_{\alpha}^* = E'_{\alpha}. \quad (34)$$

При цьому, очевидно, при виконанні умови (34) у визначених уточнених значеннях E_{α}^* , E_{β}^*

проєкцій узагальненого вектора ЕРС ротора (на осі нерухомої ортогональної координатної системи «α-β») здійснюється повною мірою компенсація падінь напруг ($R_s I_{s\alpha}$) і ($R_s I_{s\beta}$) на активному опорі R_s статорної обмотки двигуна. За рахунок цього, у свою чергу, забезпечується уточнене визначення проєкцій Ψ_{α} , Ψ_{β} узагальненого вектора потокозчеплення ротора на виході інтеграторів 11 у блоках обчислювачів 1 і 2 при температурному дрейфі активного опору R_s статорної обмотки двигуна.

Варіант реалізації датчика частоти 26, показаний на Фіг.3, функціонує в такий спосіб. На виході інтегруючої ланки 33 формується сигнал аргументу θ_k дійсної осі «x₁» обертової ортогональної координатної системи «x₁-y₁». Через зазначений сигнал аргументу θ_k на виході обчислювачів 34 і 35 обчислюються гармонійні функції: $\sin \theta_k$ і $\cos \theta_k$ відповідно. На виході координатного перетворювача 36 через сигнали проєкцій Ψ_{α} , Ψ_{β} узагальненого вектора потокозчеплення ротора, що поступають на його входи із других виходів блоків обчислювачів 1 і 2, і згадані сигнали гармонійних функцій $\cos \theta_k$, $\sin \theta_k$ розраховується проєкція Ψ_{y1}

узагальненого вектора потокозчеплення ротора на вісь «у₁» обертової ортогональної координатної системи «x₁-y₁» зі співвідношення:

$$\Psi_{y1} = \Psi_{\beta} \cos \theta_k - \Psi_{\alpha} \sin \theta_k. \quad (35)$$

З виходу суматора 31 на вхід пропорційно-інтегрального регулятора 32 надходить відхилення між заданим (яке задається рівним нулю) і розрахованим з (35) значенням проекції Ψ_{y1} узагальненого вектора потокозчеплення. Швидкодіючий регулятор 32 впливає своїм вихідним сигналом ω_k на вхід інтегральної ланки 33 таким чином, щоб на вході цього регулятора підтримувався сигнал близьким до нуля:

$$\Psi_{y1} \approx 0. \quad (36)$$

Відповідно до векторної діаграми на Фіг.7 це означає, що опиняються сполученими вісь «x₁» і «у₁» координатної системи «x₁-y₁» відповідно з віссю «x» і «у» обертової ортогональної координатної системи «x-y», зв'язаною віссю «x» з узагальненим вектором потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}$ двигуна. У цьому випадку, очевидно, аргументи θ_k і θ_{ψ} дійсної осі «x₁» координатної системи «x₁-y₁» і узагальненого вектора потокозчеплення ротора рівні між собою:

$$\theta_k = \theta_{\psi}, \quad (37)$$

а, отже, рівні і їхні похідні:

$$\omega_k = \frac{d\theta_k}{dt} = \omega_{\psi} = \frac{d\theta_{\psi}}{dt}, \quad (38)$$

що представляють собою кутові частоти обертання координатної системи «x₁-y₁» і узагальненого вектора $\bar{\Psi}$ потокозчеплення ротора двигуна відповідно.

Беручи до уваги інтегральну передавальну функцію ланки 33, на його вході, очевидно, формується сигнал, що дорівнює кутовій частоті обертання узагальненого вектора потокозчеплення ротора:

$$\omega_k = \omega_{\psi}, \quad (39)$$

який є вихідним сигналом датчика 26 у пристрої на Фіг.4.

Інший варіант реалізації датчика частоти 26, наведений на Фіг.4, функціонує в такий спосіб.

Через проекції E_{α} (або E_{α}^*), E_{β} (або E_{β}^*) узагальненого вектора ЕРС ротора (що поступають з перших входів суматорів 13 і із других виходів блоків обчислювачів 1 і 2) та проекції Ψ_{α} , Ψ_{β} узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна на виході множних блоків 37 і 38 розраховуються добутки: $\Psi_{\alpha}E_{\beta}$ і $\Psi_{\beta}E_{\alpha}$, а на виході суматора 41 – вираз $(\Psi_{\alpha}E_{\beta} - \Psi_{\beta}E_{\alpha})$, що дорівнює різниці вказаних добутків. При цьому на виході множних блоків 39 і 40 розраховуються квадрати проекцій узагальненого вектора потокозчеплення ротора: Ψ_{α}^2 і Ψ_{β}^2 відповідно, а на виході суматора 42 – сума

$(\Psi_{\alpha}^2 + \Psi_{\beta}^2)$ зазначених квадратів проекцій. З урахуванням вищевикладеного на виході ділильного блоку 43 обчислюється кутова частота ω_{ψ} уза-

гальненого вектора потокозчеплення ротора у вигляді [2]:

$$\omega_{\psi} = (\Psi_{\alpha}E_{\beta} - \Psi_{\beta}E_{\alpha}) / (\Psi_{\alpha}^2 + \Psi_{\beta}^2). \quad (40)$$

Пристрій на Фіг.5 (у якому реалізується запропонований спосіб при підвищеній точності визначення швидкості двигуна) функціонує аналогічно розглянутому пристрою на Фіг.1 з наступною відмінністю. На входи обчислювача гармонійних функцій 46 надходять із других виходів блоків обчислювачів 1 і 2 проекції Ψ_{α} , Ψ_{β} узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна. За допомогою обчислювача 58 розраховують модуль Ψ узагальненого вектора потокозчеплення ротора у вигляді кореня квадратного із суми квадратів певних проекцій Ψ_{α} , Ψ_{β} цього вектора на осі «α» і «β» нерухомої ортогональної координатної системи:

$$\Psi = \sqrt{\Psi_{\alpha}^2 + \Psi_{\beta}^2}. \quad (41)$$

За допомогою множних блоків 56 і 57 розраховують значення косинуса й синуса від аргументу θ_{ψ} узагальненого вектора потокозчеплення ротора шляхом ділення відповідно проекцій Ψ_{α} і Ψ_{β} на модуль узагальненого вектора потокозчеплення ротора:

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_{\psi} &= \Psi_{\alpha} / \Psi, \\ \sin \theta_{\psi} &= \Psi_{\beta} / \Psi \end{aligned} \right\}. \quad (42)$$

Розраховані значення зазначених гармонійних функцій $\cos \theta_{\psi}$ і $\sin \theta_{\psi}$ надходять на перший й другий входи координатних перетворювачів 44 і 45. На третій і четвертий входи координатного перетворювача 44 надходять проекції E_{α} (або E_{α}^*), E_{β}

(або E_{β}^*) узагальненого вектора ЕРС ротора з першого входу суматора 13. На третій і четвертий входи координатного перетворювача 45 надходять проекції $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ узагальненого вектора статорного струму з датчиків струму 8 і 9 відповідно.

За допомогою координатних перетворювачів 44 і 45 визначають відповідно проекцію E_x узагальненого вектора ЕРС ротора й проекцію I_{sx} узагальненого вектора статорного струму двигуна на вісь «x» обертової ортогональної координатної системи «x-y», орієнтованої віссю «x» за узагальненим вектором потокозчеплення ротора двигуна, у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_{\alpha} \cos \theta_{\psi} + E_{\beta} \sin \theta_{\psi}, \\ I_{sx} &= I_{s\alpha} \cos \theta_{\psi} + I_{s\beta} \sin \theta_{\psi} \end{aligned} \right\}. \quad (43)$$

На виході пропорційної ланки 52 обчислюють добуток: $(L_m I_{sx})$, а на виході суматора 51 – вираз: $(\Psi - L_m I_{sx})$, де L_m – індуктивність намагнічування двигуна. За допомогою блоків виділення модуля 47 і 48 визначають абсолютні значення від вищезгаданих добутків й вираз у вигляді: $|L_m I_{sx}|$ і $|\Psi - L_m I_{sx}|$ відповідно.

За допомогою інтеграторів 49 і 50 розраховують інтеграли I_1 , I_2 за часом за однаковий часовий інтервал τ (наприклад, рівний 10–20 мс) від абсолютного значення проекції E_x узагальненого

вектора ЕРС ротора й від абсолютного значення різниці між модулем Ψ узагальненого вектора поточкозчеплення ротора й добутком індуктивності L_m намагнічування двигуна на проекцію I_{sx} узагальненого вектора статорного струму:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \int_0^{\tau} |E_x| dt, \\ I_2 &= \int_0^{\tau} |\Psi - L_m I_{sx}| dt \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

За допомогою ділильного блоку 53 розраховують частку від ділення зазначених інтегралів у вигляді: I_1 / I_2 , – яка надходить на вхід регістра 55. При цьому на настановні входи регістра 55, інтеграторів 49 і 50 надходять вузькі прямокутні імпульси (з періодом τ) від генератора імпульсів 54, із приходом яких відбувається періодичне обнулення вихідних сигналів інтеграторів 49, 50 і передача сигналу, рівного I_1 / I_2 , із входу регістра 55 на його вихід. У такий спосіб із приходом кожного чергового імпульсу від генератора 54 на виході задатчика 5 встановлюється нове зворотне значення q електромагнітної постійної часу ротора. Це нове значення залишається незмінним протягом періоду τ генератора імпульсів 54 і дорівнює частці від ділення інтегралів з (44):

$$q = I_1 / I_2. \quad (45)$$

При цьому відомо, що внаслідок зміни температурного режиму двигуна також відбувається зміна активного опору R_r ротора двигуна, що призводить, як впливає з (19), до варіювання значення електромагнітної постійної часу T ротора двигуна. Це, у свою чергу, має вплив на точність розрахунку зі співвідношення (21) швидкості двигуна, оскільки вхідні в це співвідношення проекції U_α , U_β узагальненого вектора напруги ротора залежать, згідно (17) і (18), від зворотного значення q електромагнітної постійної часу ротора двигуна.

Для короткозамкненого асинхронного двигуна відомі співвідношення [2]:

$$\left. \begin{aligned} L_m I_{sx} &= \Psi + T \frac{d\Psi}{dt}, \\ E_x &= \frac{d\Psi}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

з яких стає можливим визначення зворотного значення q електромагнітної постійної часу ротора у вигляді:

$$q = \frac{1}{T} = \frac{E_x}{L_m I_{sx} - \Psi}. \quad (47)$$

Для виключення в останньому співвідношенні виконання обчислень за різноимених можливих знаках значень, що містяться у чисельнику й зна-

меннику, а також – для виключення можливого ділення на близькі до нуля значення в знаменнику, у запропонованому способі розрахунковий вираз (47) замінено еквівалентними йому співвідношеннями (44) і (45), у яких зворотне значення q електромагнітної постійної часу ротора визначається у вигляді частки від ділення часових інтегралів (за період τ), узятих від абсолютних значень виразів: $|\Psi - L_m I_{sx}|$ і $|E_x|$.

З урахуванням цього в пристрої на Фіг.5 за допомогою задатчика 5 періодично (з періодом, що дорівнює τ) визначають уточнені зворотні значення q електромагнітної постійної часу ротора двигуна, які надходять на входи обчислювачів проекцій напруги ротора 14 (у блоках обчислювачів 1 і 2), а також – на вхід обчислювача оцінних значень проекцій поточкозчеплення ротора 4. Як наслідок, обчислювачі 14 і 4 визначають уточнені (враховуючі температурні зміни постійної часу ротора двигуна) значення проекцій U_α , U_β узагальненого вектора напруги ротора зі співвідношень (17), (18) і оцінні значення Ψ'_α , Ψ'_β проекцій узагальненого вектора поточкозчеплення ротора із залежностей (22). Це, у свою чергу, дозволяє (за рахунок використання зазначених уточнених значень) обчислювачу 3 визначати більш точно зі співвідношення (21) поточну швидкість ω двигуна.

Уточнене визначення за допомогою запропонованого способу поточкозчеплення ротора та швидкості двигуна дозволяє підвищити швидкодію та поліпшити якість регулювання електромеханічних процесів частотно-регульованих асинхронних електроприводів, що створюються на базі різних типів статичних перетворювачів частоти (інверторів напруги та струму, безпосередніх перетворювачів частоти) з широтно-імпульсною модуляцією.

Виходячи з вищевикладеного можна зробити висновок, що запропоноване рішення задовольняє критерію «Промислова придатність».

Джерела інформації:

1. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор) /Л.Х. Дацковский, В.И. Роговой, Б.И. Абрамов и др. – Электротехника. – 1996. – №10. – С.22.
2. Волков А.В. Идентификация поточкозчепления ротора частотно-регулируемого асинхронного двигателя // Электротехника. – 2002. – №6. – С.40-46.
3. Шрейнер Р.Т., Дмитренко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224с.

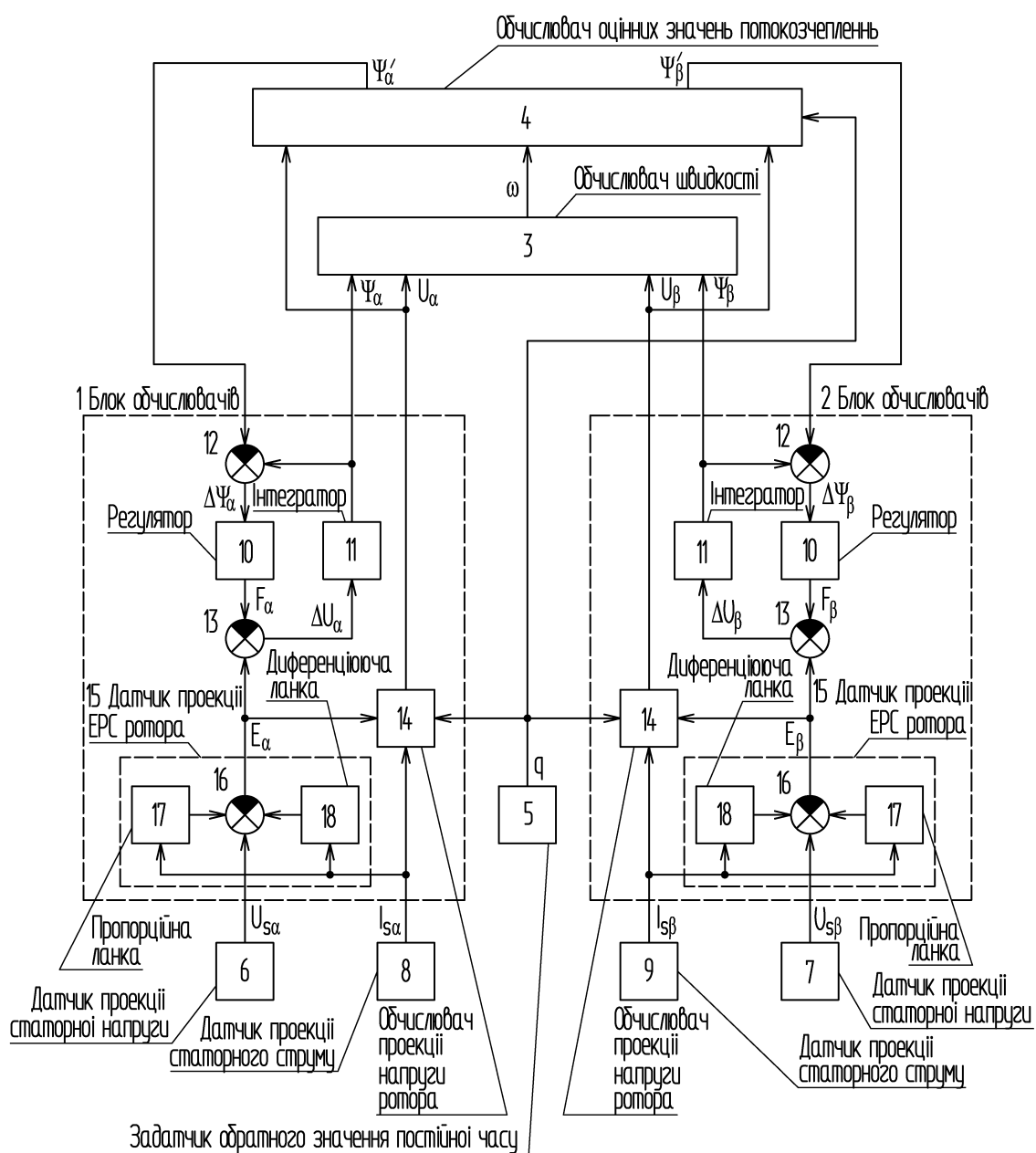


Fig. 1

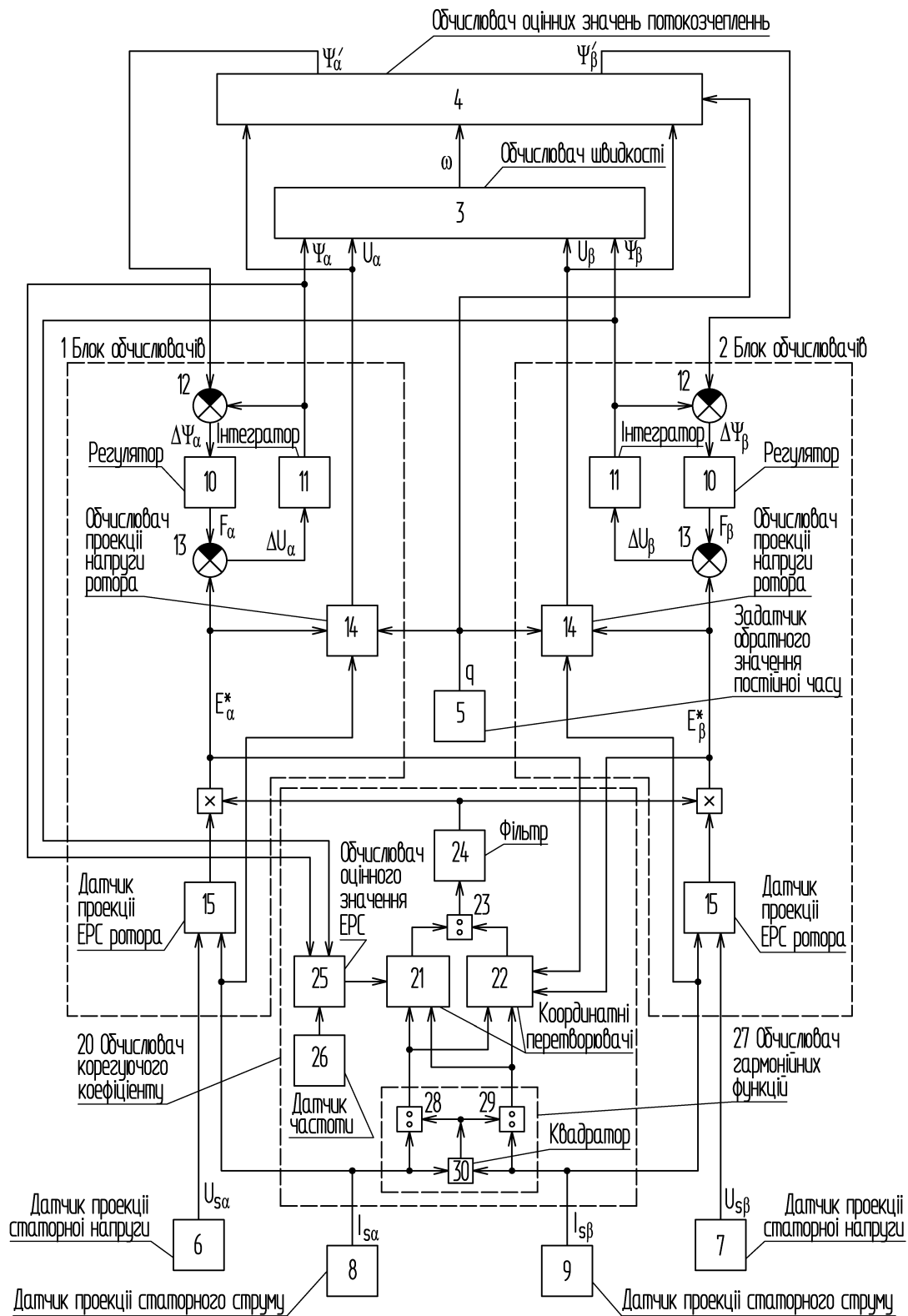
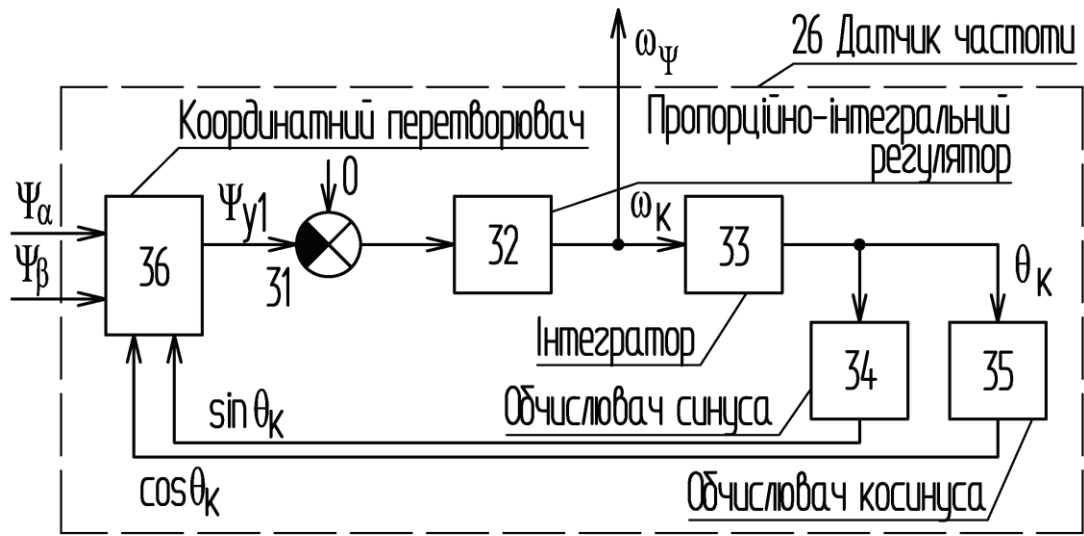
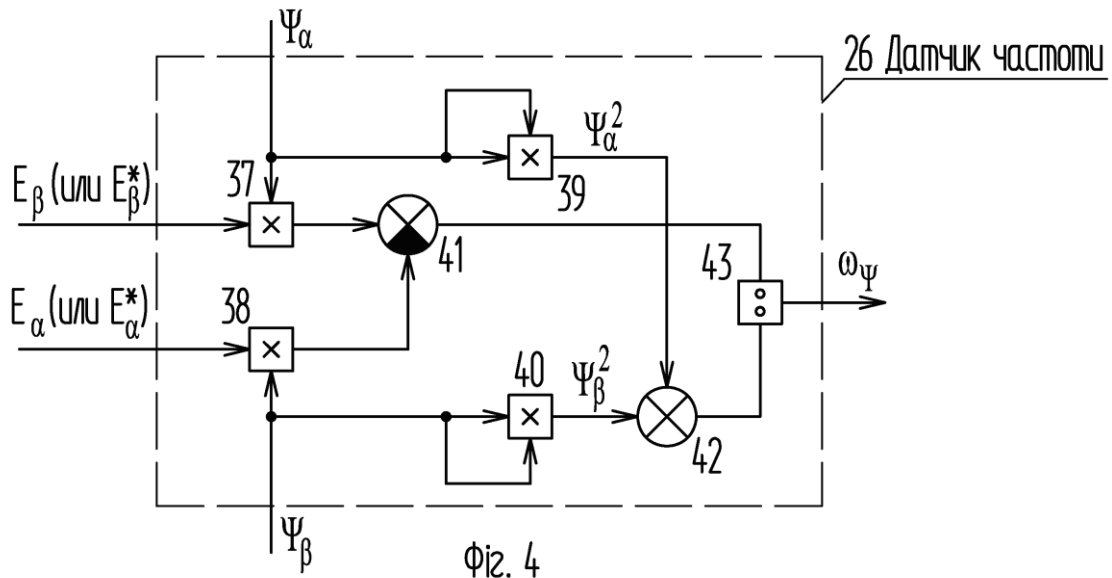


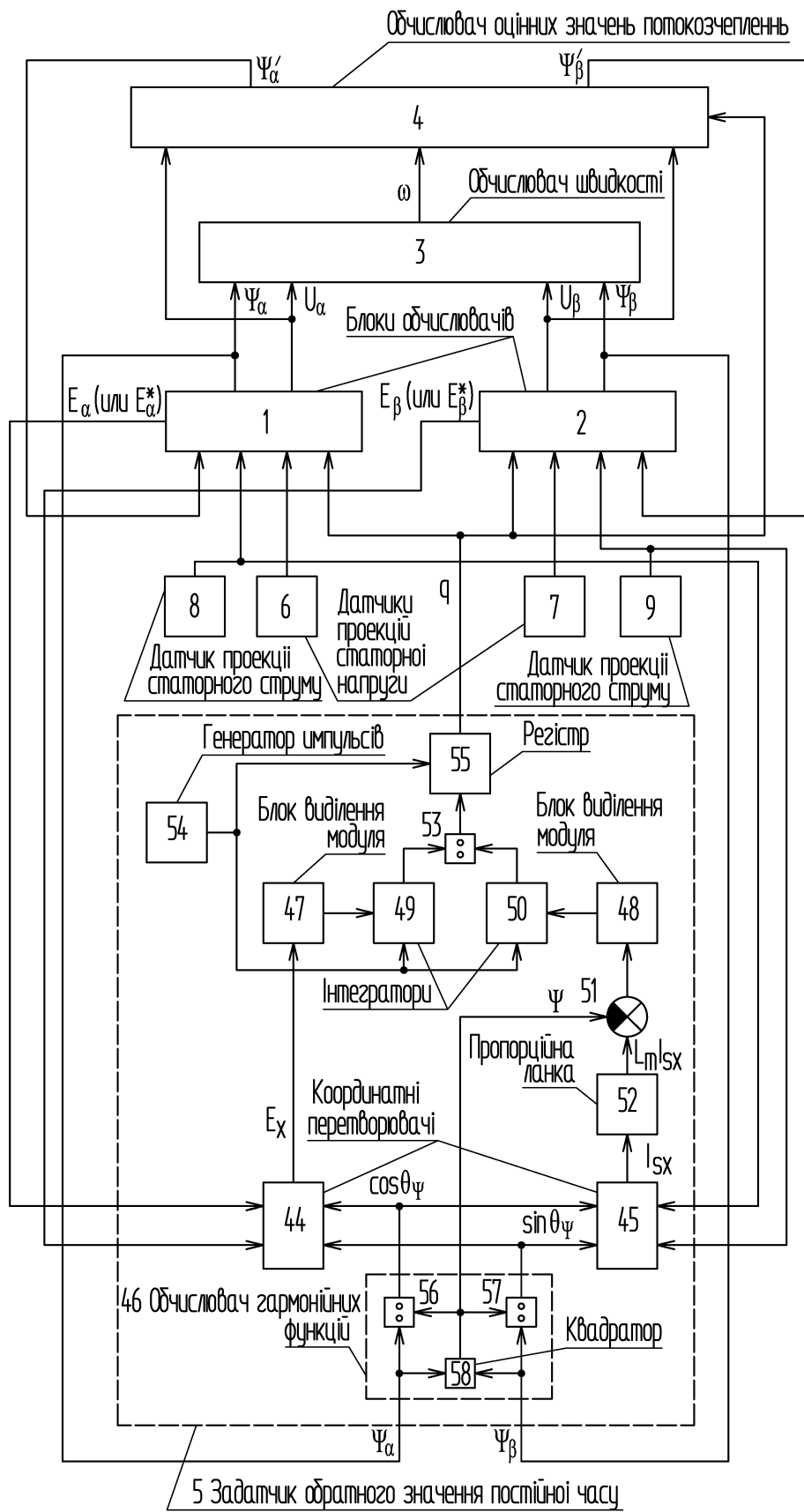
Fig. 2



Фіз. 3



Фіз. 4



Фіз. 5

