



УКРАЇНА

(19) UA (11) 44892 (13) U  
(51) МПК (2009)  
H02P 7/00  
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 ВЕКТОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМУ НА СТОРОНІ ЗМІННОГО СТРУМУ ТРИФАЗНОГО ЧОТИРИКВАДРАНТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА**

1

(21) u200900025

(22) 05.01.2009

(24) 26.10.2009

(46) 26.10.2009, Бюл.№ 20, 2009 р.

(72) ВОЛКОВ ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ, ВОЛКОВ ВОЛОДИМИР ОЛЕКСАНДРОВИЧ, АНТОНОВ МИКОЛА ЛЕОНІДОВИЧ

(73) ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(57) 1. Спосіб векторного регулювання струму на стороні змінного струму трифазного чотириквadrантного перетворювача, який полягає в тому, що контролюють фазні електрорушійні сили (ЕРС) на стороні змінного струму й напругу на стороні постійного струму цього перетворювача, через які визначають на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи відповідно проекції узагальненого вектора ЕРС та прогнозовані значення проекцій узагальненого вектора напруги, створюваного на стороні змінного струму зазначеного перетворювача при всіх можливих комбінаціях його відкритих і закритих силових ключів, у вигляді різниці згаданих прогнозованих проекцій узагальненого вектора напруги й узагальненого вектора ЕРС обчислюють прогнозовані значення проекцій результуючого вектора напруги на відповідні осі даної ортогональної координатної системи при всіх можливих комбінаціях відкритих і закритих силових ключів перетворювача, контролюють відхилення між заданими й фактичними значеннями проекцій на осі зазначеної ортогональної координатної системи узагальненого вектора струму, створюваного на стороні змінного струму перетворювача, розраховують для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача значення першого прогнозуючого функціонала, з розрахованих значень якого знаходять екстремальне значення даного функціонала, задають припустиму область відхилень проекцій узагальненого вектора струму для сталих режимів роботи перетворювача, порівнюють контрольовані відхилення проекцій узагальненого вектора струму із границями допустимої для них області відхилень, причому, якщо контрольовані відхилення проекцій узагальненого вектора струму перебувають усередині припустимої області, то підтриму-

2

ють незмінною комбінацію відкритих і закритих силових ключів перетворювача, а, якщо виходять за межі припустимої області, то задають нову комбінацію відкритих і закритих силових ключів перетворювача такою, яка відповідає знайденому екстремальному значенню першого прогнозуючого функціонала, який **відрізняється** тим, що при умові знаходжень контрольованих відхилень усередині припустимої області, на границях зазначеної припустимої області відхилень для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача розраховують значення другого прогнозуючого функціонала, з розрахованих значень яких знаходять екстремальне значення даного функціонала, при цьому усередині зазначеної припустимої області задають нову комбінацію силових ключів перетворювача такою, яка відповідає екстремальному значенню другого прогнозуючого функціонала.

2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що від джерела постійної напруги подають живлення до сторони постійного струму чотириквadrантного перетворювача, у якому сторону змінного струму навантажують на асинхронний короткозамкнений двигун, причому як ЕРС контролюють наведені до статора фазні ЕРС ротора зазначеного двигуна, які обчислюють у вигляді різниці між відповідною фазною напругою, контрольованою на стороні змінного струму перетворювача, й сумою двох доданків, перший з яких розраховують у вигляді добутку активного опору статора двигуна на значення струму, контрольованого на стороні змінного струму в даній фазі перетворювача, а другий доданок визначають у вигляді добутку похідної за часом від цього струму на значення сумарної індуктивності розсіювання статора й ротора двигуна, при цьому зазначену ортогональну координатну систему "x-y" орієнтують відносно абсцис "x" по узагальненому вектору потокозчеплення ротора двигуна, згадану припустиму область відхилень  $\Delta I_x, \Delta I_y$  проекцій узагальненого вектора струму в сталих режимах задають наступними співвідношеннями:

$$-h \leq \Delta I_x \leq +h \text{ і } -h \leq \Delta I_y \leq +h, (1)$$

формують гістерезисного типу релейні функції  $f_x$  й

(19) UA (11) 44892 (13) U

$f_y$ , знаки яких змінюються при виході відхилень проекцій за межі припустимої області згідно з полярністю відповідного відхилення  $\Delta I_x$  або  $\Delta I_y$  проекції узагальненого вектора струму, задають перший прогнозуючий функціонал співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned} F_1(m) &= K_1 f_y \Delta U_y(m), \\ K_1 &= 1 + \sin g[f_x \Delta U_x(m)] \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

визначають екстремальне значення цього функціонала у вигляді його максимуму

$$F_1^0 = \{F_1(m)\} \text{ при } m = m_1, \quad (3)$$

де  $\Delta U_x(m), \Delta U_y(m)$  - прогнозовані значення проекцій результуючого вектора напруги відповідно на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи;

$m$  й  $m_1$  - відповідно можлива й відповідна екстремальному значенню першого функціонала комбінація відкритих і закритих силових ключів перетворювача, причому задають другий функціонал наступними залежностями:

$$\left. \begin{aligned} F_2(m) &= \min \{F_{2x}(m), F_{2y}(m)\} \\ F_{2x}(m) &= \frac{\Delta I_{x0} + \{\sin g[\Delta U_{x0}(m)]\}h}{\Delta U_{x0}(m)} \\ F_{2y}(m) &= \frac{\Delta I_{y0} + \{\sin g[\Delta U_{y0}(m)]\}h}{\Delta U_{y0}(m)} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

а його екстремальне значення знаходять у вигляді максимуму

$$F_2^0 = \{F_2(m)\} \text{ при } m = m_2, \quad (5)$$

де  $\Delta I_{x0}$  або  $\Delta I_{y0}$  - контрольовані на границях припустимої області значення відхилень проекцій узагальненого вектора струму відповідно на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи;  $\Delta U_{x0}(m)$  і  $\Delta U_{y0}(m)$  - обчислені на границях припустимої області для  $m$ -ої комбінації відкритих і закритих силових ключів перетворювача значення проекцій результуючого вектора напруги відповідно на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи;  $m_2$  - відповідна екстремальному значенню другого функціонала комбінація відкритих та закритих силових ключів перетворювача.

3. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що з боку змінного струму чотириквadrантного перетворювача подають живлення безпосередньо або через реактори від джерела трифазної напруги мережі, а як згадані фазні значення ЕРС контролюють фазні напруги зазначеного джерела трифазної напруги мережі, обчислюють у вигляді кореня

квадратного із суми квадратів згаданих відхилень проекцій струму модуль узагальненого вектора відхилення струму, який порівнюють із установленою величиною, що задає собою границі припустимої області цих відхилень у сталих режимах, при цьому у вигляді відношень відхилень проекцій струму на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи до модуля узагальненого вектора відхилення струму визначають значення відповідно косинуса й синуса від аргумента цього вектора, для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача розраховують у вигляді кореня квадратного із суми квадратів його проекцій значення модуля результуючого вектора напруги, у вигляді відношень проекцій результуючого вектора напруги на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи до його модуля обчислюють для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача значення відповідно косинуса й синуса від аргумента цього вектора, при цьому перший прогнозуючий функціонал розраховують у вигляді суми двох доданків, перший з яких являє собою добуток косинусів від аргументів результуючого вектора напруги й узагальненого вектора відхилення струму, а другий доданок - добуток синусів від аргументів тих же векторів, для яких відлік аргументів виконують від осі абсцис згаданої ортогональної координатної системи, що задають нерухомою з орієнтацією осі абсцис за геометричною віссю обмотки, що створює ЕРС у фазі А на стороні змінного струму перетворювача, причому задають другий прогнозуючий функціонал наступними залежностями:

$$F_2(m) = \frac{\Delta I_{x0} \Delta U_{x0}(m) + \Delta I_{y0} \Delta U_{y0}(m)}{\Delta U_{x0}^2(m) + \Delta U_{y0}^2(m)}, \quad (6)$$

а його екстремальне значення знаходять у вигляді максимуму

$$F_2^0 = \{F_2(m)\} \text{ при } m = m_2, \quad (7)$$

де  $\Delta I_{x0}$  або  $\Delta I_{y0}$  - значення відхилень проекцій узагальненого вектора струму відповідно на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи, контрольовані на границях припустимої області;  $\Delta U_{x0}(m)$  і  $\Delta U_{y0}(m)$  - значення проекцій результуючого вектора напруги на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи, обчислені на границях припустимої області для  $m$ -ої комбінації відкритих і закритих силових ключів перетворювача;  $m_2$  - відповідна екстремальному значенню другого функціонала комбінація відкритих й закритих силових ключів перетворювача.

Корисна модель відноситься до області електротехніки, конкретно - до частотно-регульованих асинхронних електроприводів й активних фільтрів, у яких відповідно в якості автономного інвертора напруги або активного випрямляча використовую-

ється трифазний чотириквadrантний перетворювач із широтно-імпульсною модуляцією.

Векторне регулювання змінного струму чотириквadrантного перетворювача призначено для формування фазних струмів на стороні змінного

струму зазначеного перетворювача як по амплітуді, так і по частоті й фазі, і полягає у відпрацюванні заданих значень проєкцій (на осі нерухомої або обертової ортогональної координатної системи) узагальненого вектора струму, створюваного на стороні змінного струму даного перетворювача. Векторне регулювання струму на стороні змінного струму чотириквadrантного перетворювача служить: в активних фільтрах - для стабілізації на заданому рівні напруги на стороні постійного струму й формування необхідного значення коефіцієнта потужності на стороні змінного струму зазначеного перетворювача, а в частотно-регульованих електроприводах - для стабілізації в динамічних і сталих режимах заданих значень потокозчеплення й електромагнітного моменту асинхронного двигуна.

Відомий з [1] спосіб оптимального по швидкодії векторного регулювання статорного струму асинхронного двигуна, що живиться від автономного інвертора напруги, виконаного у вигляді трифазного чотириквadrантного перетворювача, що полягає в тому, що контролюють напругу на стороні постійного струму й фазні струми на стороні змінного струму зазначеного перетворювача, через які розраховують на осі абсцис й ординат нерухомої ортогональної координатної системи проєкції узагальненого вектора струму, створюваного на стороні змінного струму перетворювача, і обчислюють для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів чотириквadrантного перетворювача прогнозовані значення проєкцій на зазначені осі координатної системи узагальненого вектора напруги, створюваного на стороні змінного струму перетворювача, за допомогою моделі асинхронного двигуна через обчислені значення проєкцій узагальнених векторів напруг і струму на стороні змінного струму перетворювача визначають на осі нерухомої ортогональної координатної системи проєкції зведених до статора узагальнених векторів ЕРС ротора й потокозчеплення ротора двигуна, розраховують для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача прогнозовані значення проєкцій результуючого вектора напруги на осі нерухомої ортогональної координатної системи у вигляді різниці відповідних проєкцій на осі абсцис й ординат цієї координатної системи узагальненого вектора напруги, створюваного на стороні змінного струму перетворювача, і узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна, знаходять у вигляді кореня квадратного із суми квадратів його проєкцій значення модуля узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна, обчислюють у вигляді відношень проєкцій цього вектора на осі абсцис й ординат нерухомої ортогональної координатної системи до його модуля значення відповідно косинуса і синуса від аргументу узагальненого вектора потокозчеплення ротора двигуна, за допомогою останніх значень розраховують проєкції узагальненого вектора струму й результуючого вектора напруги на осі обертової ортогональної координатної системи, зв'язаною віссю абсцис із узагальненим вектором потокозчеплення ротора двигуна, визначають відхилення між модулем, проєкціями

на осі обертової ортогональної координатної системи і їх відповідними заданими значеннями, причому, якщо вказані відхилення для модуля й проєкцій узагальненого вектора струму не перевищують встановленої величини, то зберігають колишню комбінацію відкритих і закритих силових ключів перетворювача, а якщо перевищують встановлену величину, то - задають нову комбінацію відкритих і закритих силових ключів даного перетворювача, що задовольняє таким умовам: по-перше, збігаються знаки відхилень проєкцій узагальненого вектора струму зі знаками проєкцій на відповідні осі обертової координатної системи узагальненого вектора результуючої напруги, і по-друге, при зазначеній новій комбінації відкритих і закритих силових ключів перетворювача дорівнює екстремальному значенню проєкції результуючого вектора напруги на вісь ординат обертової ортогональної координатної системи.

Поряд з досяжною високою швидкістю векторного регулювання струму, недоліком відомого способу є підвищена частота перемикання (до 5-10кГц й вище) силових ключів чотириквadrантного перетворювача (у тому числі, у стаціонарних режимах роботи електропривода), що викликає на практиці збільшення динамічних втрат у силових ключах даного перетворювача. Це, у свою чергу, економічно невиправдано для більшості частотно-регульованих асинхронних електроприводів середньої (понад 100кВт) і великої (понад 1000кВт) потужності, до яких звичайно не пред'являються підвищені вимоги за швидкістю регулювання струму, але дуже важливі й актуальні питання енергозбереження.

Найбільш близьким по технічній сутності до запропонованого способу обрано спосіб векторного регулювання струму на стороні змінного струму трифазного чотириквadrантного перетворювача, що полягає в тому, що контролюють фазну електрорушійну силу (ЕРС) на стороні змінного струму й напругу на стороні постійного струму цього перетворювача, через які визначають на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи відповідно проєкції узагальненого вектора ЕРС і прогнозовані значення проєкцій узагальненого вектора напруги, створюваного на стороні змінного струму зазначеного перетворювача при всіх можливих комбінаціях його відкритих і закритих силових ключів, обчислюють у вигляді різниці проєкцій узагальненого вектора ЕРС й узагальненого вектора напруги на відповідні осі даної ортогональної координатної системи прогнозовані значення проєкцій результуючого вектора напруги при всіх можливих комбінаціях відкритих і закритих силових ключів перетворювача, контролюють відхилення між заданими й фактичними значеннями проєкцій на осі зазначеної ортогональної координатної системи узагальненого вектора струму, створюваного на стороні змінного струму перетворювача, вісь абсцис згаданої ортогональної координатної системи приймають за вісь відліку аргументів узагальнених векторів, розраховують для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача значення прогнозуючого функціонала, при цьому з розрахованих значень прогно-

зуючого функціонала знаходять його екстремальне значення й визначають нову комбінацію відкритих і закритих силових ключів перетворювача, що відповідає зазначеному екстремальному значенню функціонала, обчислюють у вигляді кореня квадратного із суми квадратів згаданих відхилень проєкцій струму модуль узагальненого вектора відхилення струму, що порівнюють із встановленою величиною, причому, якщо обчислене значення зазначеного модуля узагальненого вектора відхилення струму не перевищує встановленої величини, то зберігають колишню комбінацію відкритих і закритих силових ключів перетворювача, а якщо воно перевищує встановлену величину, то задають нову комбінацію відкритих і закритих силових ключів даного перетворювача, причому, у вигляді відношень відхилень проєкцій струму на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи до модуля узагальненого вектора відхилення струму визначають значення відповідно косинуса й синуса від аргументу цього вектора, для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача розраховують у вигляді кореня квадратного із суми квадратів його проєкцій значення модуля результуючого вектора напруги, у вигляді відношень проєкцій результуючого вектора напруги на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи до його модуля обчислюють для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача значення відповідно косинуса й синуса від аргументу цього вектора, при цьому прогнозуючого функціонала розраховують у вигляді двох доданків, перше з яких являє собою добуток косинусів від аргументів результуючого вектора напруги й узагальненого вектора відхилення струму, а другий доданок - добуток синусів від аргументів тих же векторів.

Перевагою даного відомого способу (у порівнянні зі способом векторного регулювання струму з [1]) є зменшена частота переключення силових ключів перетворювача в сталих режимах. Однак, останньому відомому пристрою при цьому властивий такий недолік, як збільшене значення частоти перемикавання силових ключів чотириквadrантного перетворювача в сталих режимах, що, у свою чергу, приводить до завищених електричних втрат у даному перетворювачі в зазначених режимах.

В основі корисної моделі поставлене завдання розробки способу векторного регулювання струму на стороні змінного струму трифазного чотириквadrантного перетворювача, що забезпечує зниження до мінімально можливого значення частоти перемикавання силових ключів чотириквadrантного перетворювача в сталих режимах роботи при заданій амплітуді високочастотних пульсацій струму на стороні змінного струму перетворювача. За рахунок цього, у свою чергу, досягається зменшення електричних втрат у чотириквadrантному перетворювачі (а, отже, і в частотно-регульованому електроприводі або активному фільтрі, побудованих на його основі) у сталих режимах при одночасному збереженні відносно високої швидкодії регулювання струму на стороні змінного струму зазначеного перетворювача в динамічних режимах.

Розв'язання даного завдання досягається тим, що в способі векторного регулювання струму на стороні змінного струму трифазного чотириквadrантного перетворювача, який полягає в тому, що контролюють фазні електрорушійні сили (ЕРС) на стороні змінного струму й напругу на стороні постійного струму цього перетворювача, через які визначають на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи відповідно проєкції узагальненого вектора ЕРС та прогнозовані значення проєкцій узагальненого вектора напруги, створюваного на стороні змінного струму зазначеного перетворювача при всіх можливих комбінаціях його відкритих і закритих силових ключів, в виді різниці згаданих прогнозованих проєкцій узагальненого вектора напруги й узагальненого вектора ЕРС обчислюють прогнозовані значення проєкцій результуючого вектора напруги на відповідні осі даної ортогональної координатної системи при всіх можливих комбінаціях відкритих і закритих силових ключів перетворювача, контролюють відхилення між заданими й фактичними значеннями проєкцій на осі зазначеної ортогональної координатної системи узагальненого вектора струму, створюваного на стороні змінного струму перетворювача, розраховують для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача значення першого прогнозуючого функціонала, з розрахованих значень якого знаходять екстремальне значення даного функціонала, задають припустиму область відхилень проєкцій узагальненого вектора струму для сталих режимів роботи перетворювача, порівнюють контрольовані відхилення проєкцій узагальненого вектора струму із границями припустимої для них області відхилень, причому, якщо контрольовані відхилення проєкцій узагальненого вектора струму перебувають усередині припустимої області, то - підтримують незмінною комбінацію відкритих і закритих силових ключів перетворювача, а якщо виходять за межі припустимої області, то - задають нову комбінацію відкритих і закритих силових ключів перетворювача такою, яка відповідає знайденому екстремальному значенню першого прогнозуючого функціонала, додатково, якщо контрольовані відхилення перебувають усередині припустимої області, то на границях зазначеної припустимої області відхилень для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача розраховують значення другого прогнозуючого функціонала, з розрахованих значень яких знаходять екстремальне значення даного функціонала, при цьому усередині зазначеної припустимої області задають нову комбінацію силових ключів перетворювача такою, яка відповідає екстремальному значенню другого прогнозуючого функціонала.

Для використання запропонованого способу векторного регулювання струму в частотно-регульованих асинхронних електроприводах у способі по п. 1 додатково від джерела постійної напруги подають живлення до сторони постійного струму чотириквadrантного перетворювача, у якому сторону змінного струму навантажують на асинхронний короткозамкнений двигун, причому, у

якості ЕРС контролюють наведені до статора фазні ЕРС ротора зазначеного двигуна, які обчислюють у вигляді різниці між відповідною фазною напругою, контрольованою на стороні змінного струму перетворювача, й сумою двох доданків, перший з яких розраховують у вигляді добутку активного опору статора двигуна на значення струму, контрольованого на стороні змінного струму в даній фазі перетворювача, а другий доданок визначають у вигляді добутку похідної за часом від цього струму на значення сумарної індуктивності розсіювання статора й ротора двигуна, при цьому зазначену ортогональну координатну систему «х-у» орієнтують віссю абсцис «х» по узагальненому вектору потокозчеплення ротора двигуна, згадану припустиму область відхилень  $\Delta I_x, \Delta I_y$  проєкцій узагальненого вектора струму в сталих режимах задають наступними співвідношеннями:

$$-h \leq \Delta I_x \leq +h \text{ і } -h \leq \Delta I_y \leq +h, \quad (1)$$

формують гістерезисного типу релейні функції  $f_x$  й  $f_y$ , знаки яких змінюються при виході відхилень проєкцій за межі припустимої області згідно з полярністю відповідного відхилення  $\Delta I_x$  або  $\Delta I_y$  проєкції узагальненого вектора струму, задають перший прогнозуєний функціонал співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned} F_1(m) &= K_1 f_y \Delta U_y(m), \\ K_1 &= 1 + \text{sign}[f_x \Delta U_x(m)] \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

визначають екстремальне значення цього функціонала у вигляді його максимуму

$$F_1^0 = \{F_1(m)\} \text{ при } m = m_1, \quad (3)$$

де  $\Delta U_x(m), \Delta U_y(m)$  - прогнозовані значення проєкцій результуючого вектора напруги відповідно на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи;  $m$  й  $m_1$  - відповідно можлива й відповідна екстремальному значенню першого функціонала комбінація відкритих і закритих силових ключів перетворювача, причому, задають другий функціонал наступними залежностями:

$$\left. \begin{aligned} F_2(m) &= \min \{F_{2x}(m), F_{2y}(m)\}, \\ F_{2x}(m) &= \frac{\Delta I_{x0} + \{\text{sign}[\Delta U_{x0}(m)]\}h}{\Delta U_{x0}(m)}, \\ F_{2y}(m) &= \frac{\Delta I_{y0} + \{\text{sign}[\Delta U_{y0}(m)]\}h}{\Delta U_{y0}(m)} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

а його екстремальне значення знаходять у вигляді максимуму

$$F_2^0 = \{F_2(m)\} \text{ при } m = m_2, \quad (5)$$

де  $\Delta I_{x0}$  або  $\Delta I_{y0}$  - контрольовані на границях припустимої області значення відхилень проєкцій узагальненого вектора струму відповідно на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи;  $\Delta U_{x0}(m)$  і  $\Delta U_{y0}(m)$  - обчислені на границях припустимої області для  $m$ -ої комбінації відкритих і закритих силових ключів перетворювача значення проєкцій результуючого вектора напруги відповідно на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи;  $m_2$  - відповідна екстремальному

значенню другого функціоналу комбінація відкритих та закритих силових ключів перетворювача.

Для використання запропонованого способу векторного регулювання струму в активних фільтрах у способі по п.1 додатково з боку змінного струму чотириквadrантного перетворювача подають живлення безпосередньо або через реактори від джерела трифазної напруги мережі, а в якості згаданих фазних значень ЕРС контролюють фазні напруги зазначеного джерела трифазної напруги мережі, обчислюють у вигляді кореня квадратного із суми квадратів згаданих відхилень проєкцій струму модуль узагальненого вектора відхилення струму, який порівнюють із установленою величиною, що задає собою границі припустимої області цих відхилень у сталих режимах, при цьому у вигляді відношень відхилень проєкцій струму на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи до модуля узагальненого вектора відхилення струму визначають значення відповідно косинуса й синуса від аргументу цього вектора, для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача розраховують у вигляді кореня квадратного із суми квадратів його проєкцій значення модуля результуючого вектора напруги, у вигляді відношень проєкцій результуючого вектора напруги на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи до його модуля обчислюють для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача значення відповідно косинуса й синуса від аргументу цього вектора, при цьому перший прогнозуєний функціонал розраховують у вигляді суми двох доданків, перший з яких являє собою добуток косинусів від аргументів результуючого вектора напруги й узагальненого вектора відхилення струму, а другий доданок - добуток синусів від аргументів тих же векторів, для яких відлік аргументів роблять від осі абсцис згаданої ортогональної координатної системи, що задають нерухомою з орієнтацією осі абсцис за геометричною віссю обмотки, що створює ЕРС у фазі А на стороні змінного струму перетворювача, причому, задають другий прогнозуєний функціонал наступними залежностями:

$$F_2(m) = \frac{\Delta I_{x0} \Delta U_{x0}(m) + \Delta I_{y0} \Delta U_{y0}(m)}{\Delta U_{x0}^2(m) + \Delta U_{y0}^2(m)}, \quad (6)$$

а його екстремальне значення знаходять у вигляді максимуму

$$F_2^0 = \{F_2(m)\} \text{ при } m = m_2, \quad (7)$$

де  $\Delta I_{x0}$  або  $\Delta I_{y0}$  - значення відхилень проєкцій узагальненого вектора струму відповідно на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи, контрольовані на границях припустимої області;  $\Delta U_{x0}(m)$  і  $\Delta U_{y0}(m)$  - значення проєкцій результуючого вектора напруги на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи, обчислені на границях припустимої області для  $m$ -ої комбінації відкритих і закритих силових ключів перетворювача;  $m_2$  - відповідна екстремальному значенню другого функціоналу комбінація відкритих й закритих силових ключів перетворювача.

Здійснення в запропонованому способі: по-

перше, операції обчислення (на границях припустимої області відхилення ортогональних проекцій узагальненого вектора струму, що відповідає сталому режиму роботи чотириквadrантного перетворювача) другого прогнозуючого функціонала для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача, по-друге, визначення екстремального значення цього функціонала, й, по-третє, знаходження відповідній цьому значенню оптимальної комбінації відкритих і закритих силових ключів даного перетворювача, - дозволяє визначити й автоматично задати мінімально можливу (при заданій припустимій області відхилення проекцій узагальненого вектора струму) частоту перемикавання силових ключів чотириквadrантного перетворювача в сталих режимах. За рахунок цього, у свою чергу, досягається зниження електричних втрат у сталих режимах у чотириквadrантному перетворювачі при одночасному збереженні високої швидкодії регулювання струму на стороні змінного струму зазначеного перетворювача в динамічних режимах.

Таким чином, нові ознаки при взаємодії з відомими ознаками забезпечують появу нових технічних властивостей. Зокрема, шляхом введення нових операцій розроблено новий спосіб векторного регулювання струму на стороні змінного струму трифазного чотириквadrантного перетворювача. Це забезпечує усій заявленій сукупності ознак способу відповідність критерію «новизна».

Аналоги, що містять ознаки, які відрізняються від прототипу, не знайдені; запропоноване рішення явно не випливає з існуючого 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 варіанта пристрою, що реалізує запропонований спосіб; на Фіг.2 - функціональна схема пристрою, що реалізує запропонований спосіб векторного регулювання струму в частотно-регульованому асинхронному електроприводі; на Фіг.3 - функціональна схема пристрою, що реалізує запропонований спосіб векторного регулювання струму в активному фільтрі; на Фіг.4 - діаграма, що ілюструє припустиму область (у вигляді квадрата) відхилення проекцій струму в сталому режимі для пристрою, показано на Фіг.2; на Фіг.5 - векторна діаграма, що ілюструє для динамічних режимів відпрацьовування узагальненого вектора струму, створюваного на стороні змінного струму чотириквadrантного перетворювача, в пристрої, показаному на Фіг.2; на Фіг.6 - діаграма, що ілюструє припустиму область (у вигляді кола) відхилення проекцій струму в сталому режимі для пристрою, показаного на Фіг.3.

Функціональна схема на Фіг.1 містить: трифазний чотириквadrантний перетворювач 1, підключений стороною постійного струму (із клемми «+» й «-») до ланки постійного струму 2, а стороною змінного струму (із клемми «а», «b» й «с») - до зовнішнього трифазного електричного кола 3; блок формувачів імпульсів 4; перетворювач коду 5; мультиплексор 6; перший і другий обчислювачі екстремального значення 7 й 8; перший й другий обчи-

слювачі прогнозуючого функціонала 9 й 10; блок обчислювачів проекцій векторів 11; блок порівняння відхилення проекцій струму 12; датчики напруги 13 і фазних ЕРС 14; блок датчиків відхилення проекцій струму 15. При цьому трифазний чотириквadrантний перетворювач 1 складається із шести керованих силових ключів 16-21 (наприклад, IGBT, MOSFET, GTO або IGCT), що шунтуються зворотними діодами 22 - 27. Зовнішнє трифазне електричне коло 3 показано на Фіг.1 у вигляді її еквівалентної схеми заміщення, що містить у своєму складі джерела ЕРС  $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$  змінного струму, індуктивності  $L$  й активні опори  $R$ .

Блок обчислювачів проекцій векторів 11 складається із задатчика гармонійних функцій 28, обчислювача проекцій вектора ЕРС 29, обчислювача проекцій вектора вихідної напруги 30, обчислювача проекцій результуючої напруги 31, першого 32 і другого 33 регістрів. Задатчик гармонійних функцій 28 приєднаний своїм виходом до першого із входів обчислювача проекцій вектора ЕРС 29 й обчислювача проекцій вихідної напруги 30, виходи яких підключені відповідно до першого й другого входів обчислювача проекцій результуючої напруги 31, у якого вихід є першим входом блоку 11 і з'єднаний із входом регістра 32, а вихід регістра 32 є другим виходом блоку 11. Керуючі входи першого 32 і другого 33 регістрів з'єднані разом і пов'язані з першим входом блоку 11, причому, вихід другого регістра 33 є третім виходом блоку 11, а другий вхід цього регістра 33, другі входи обчислювача проекцій вихідної напруги 30 й обчислювача проекцій вектора ЕРС 29 є відповідно другим, третім і четвертим входами блоку 11.

При цьому блок датчиків відхилення проекцій струму 15 з'єднаний своїм виходом із другим входом регістра 33, першим входом першого обчислювача прогнозуючого функціонала 9 і із входом блоку порівняння відхилення проекцій струму 12, у якого перший з виходів підключений до керуючого входу мультиплексора 6, а другий вихід - до першого входу блоку обчислювачів проекцій векторів 11. У першого обчислювача прогнозуючого функціонала 9 другий вхід приєднаний до першого виходу блоку обчислювачів 11, а вихід підключений через перший обчислювач екстремального значення 7 до першого входу мультиплексора 6, вихід якого пов'язаний через послідовно з'єднані перетворювач коду 5 і блок формувачів імпульсів 4 з керуваними входами чотириквadrантного перетворювача 1. Третій і четвертий входи блоку обчислювачів 11 приєднані відповідно до виходів датчика напруги 13, підключеного до сторони постійного струму перетворювача 1, і датчика фазних ЕРС 14, приєднаного до зовнішнього трифазного електричного кола 3. У другого обчислювача прогнозуючого функціонала 10 перший і другий входи з'єднані відповідно із другим і третім виходами блоку обчислювачів 11, а вихід - пов'язаний через другий обчислювач екстремального значення 8 із другим входом мультиплексора 6.

У функціональній схемі пристрою на Фіг.2 (що реалізує запропонований спосіб регулювання струму в частотно-регульованому асинхронному електроприводі) сторона постійного струму (по-

значена клемми «+» й «-» чотириквadrантного перетворювача 1 підключена до джерела постійної напруги 34, а сторона змінного струму (позначена клемми «а», «b» й «с») - до асинхронного короткозамкненого двигуна 35 (показаному на Фіг.2 у вигляді його еквівалентної схеми заміщення, що містить послідовно з'єднані між собою: активний опір статора  $R_s$ , сумарну індуктивність розсіювання  $L_\sigma$  статора й ротора двигуна й зведену до статора фазну ЕРС ротора  $E_A$  ( $E_B$  або  $E_C$ ) двигуна).

При цьому всі інші елементи і їхні зв'язки в пристрої на Фіг.2 повністю ідентичні раніше показаними в схемі пристрою на Фіг.1.

Причому, у схемі пристрою на Фіг.2 перший обчислювач прогнозного функціонала 9 виконаний у вигляді першого й другого релейних елементів 36 й 37, першого й другого множинних блоків 38 й 39, першого й другого множинних блоків 38 й 39, першого обчислювального пристрою 40, вихід якого є виходом першого обчислювача прогнозного функціонала 9, а перший й другий входи обчислювального пристрою 40 приєднані до виходів відповідно першого й другого множинних блоків 38 й 39, входи релейних елементів 36 й 37 пов'язані з першим входом обчислювача прогнозного функціонала 9, а виходи вказаних релейних елементів 38 й 39, другі входи яких зв'язані із другим входом першого обчислювача прогнозного функціонала 9. Блок порівняння відхилень проекцій струму 12 виконаний у вигляді першого й другого обчислювачів модулів 41 й 42, першого й другого релейних елементів 43 й 44, першого 45 й другого 46 компараторів, першого 47 й другого 48 логічних елементів «АБО», формувача імпульсів 49, при цьому в першого 41 й другого 42 обчислювачів модуля входи є входами блоку 12, а виходи обчислювачів модуля 41 й 42 зв'язані через релейні елементи 43 й 44 з входами першого логічного елемента «АБО» 47 і зв'язані через компаратори 45 й 46 із входами другого логічного елемента «АБО» 48, причому, вихід першого логічного елемента «АБО» 47 є першим виходом блоку порівняння відхилень проекцій струму 12, а вихід другого логічного елемента «АБО» 48 підключений до входу формувача імпульсів 49, вихід якого є другим виходом блоку порівняння відхилень проекцій струму 12. Датчик фазних ЕРС 14 виконаний у вигляді блоків датчиків напруги 50 й струму 51, обчислювача фазних ЕРС ротора 52, причому, входи блоків датчиків напруги 50 й струму 51 підключені до сторони змінного струму перетворювача 1, а виходи цих блоків приєднані до входів обчислювача фазних ЕРС ротора 52, у якого вихід є виходом датчика фазних ЕРС 14.

У функціональній схемі пристрою на Фіг.3 (що реалізує запропонований спосіб векторного регулювання струму стосовно до активного фільтра) сторона змінного струму (позначена клемми «а», «b» й «с») чотириквadrантного перетворювача 1 підключена безпосередньо або через реактори 53 до джерела трифазної напруги мережі 54 (який показаний на Фіг.3, що виконано, як можливий варіант, у вигляді трифазного силового трансформатора Т, у якого виходи вторинних обмоток є виходами зазначеного джерела 54). При цьому сторона

постійного струму (показана клемми «+» й «-» на Фіг.3) підключена до з'єднаних між собою паралельно конденсатора 55 і навантаження постійного струму 56, перший обчислювач прогнозного функціонала 9 додатково має третій вхід, а всі інші елементи та їхні зв'язки в пристрої на Фіг.3 повністю ідентичні показаними раніше в схемі на Фіг.1.

Причому, у схемі пристрою на Фіг.3 перший обчислювач прогнозного функціонала 9 виконаний у вигляді квадратора 57, першого й другого ділильних блоків 58 й 59, другого обчислювального пристрою 60, вихід якого є виходом обчислювача прогнозного функціонала 9, перший вхід ділильного блоку 59 є першим входом обчислювача прогнозного функціонала 9, вхід квадратора 57 є другим входом обчислювача прогнозного функціонала 9 та з'єднаний з першим входом першого ділильного блоку 58, у якого другий вхід підключений до виходу квадратора 57, а вихід - до першого входу обчислювального пристрою 60, з'єднаного своїм другим входом з виходом другого ділильного блоку 59, у якого другий вхід є третім входом обчислювача прогнозного функціонала 9. Блок порівняння відхилень проекцій струму 12 виконаний у вигляді другого квадратора 61, компаратора 62, релейного елемента 63 і формувача імпульсів 64, при цьому вхід квадратора 61 є входом блоку порівняння відхилень проекцій струму 12, а вихід квадратора 61 з'єднаний із входами компаратора 62, релейного елемента 63 й є додатковим третім входом блоку порівняння 12, з'єднаним із третім входом першого прогнозного функціонала 9, причому, виходи релейного елемента 63 і формувача імпульсів 64 є відповідно першим і другим виходами блоку порівняння 12, а вхід формувача імпульсів 64 приєднаний до виходу компаратора 62.

Наведена на Фіг.4 діаграма ілюструє припустиму область (у вигляді квадрата ABCD) відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій статорного струму в сталому режимі для пристрою, показаного на Фіг.2, де значення:  $+h$  й  $-h$  - являють собою границі зазначеної припустимої області.

Показана на Фіг.5 векторна діаграма, що ілюструє для динамічних режимів відпрацювання в пристрої на Фіг.2 узагальненого вектора струму (або вектора статорного струму двигуна) на стороні змінного струму чотири квadrантного перетворювача 1, містить наступні позначення:  $\vec{I}_y$  - задане значення активної проекції (на вісь ординат «у» ортогональної координатної системи «х-у») згаданого вектора статорного струму двигуна;  $\Delta I_x$  і  $\Delta I_y$  - відхилення проекцій даного узагальненого вектора статорного струму на осі ортогональної координатної системи «х-у» (зв'язаною дійсною віссю «х» з узагальненим вектором потокозчеплення ротора двигуна 35).

Представлена на Фіг.6 діаграма ілюструє припустиму область (у вигляді кола із центром 0 й радіусом, рівним  $h$ ) відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій статорного струму в сталому режимі для пристрою, показаного на Фіг.3. Причому, показані пунктиром на Фіг.4 й Фіг.6 відрізки MN являють собою

можливі годографи зміни згаданих відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  у сталому режимі роботи чотири квадрантного перетворювача.

Запропонований спосіб векторного регулювання струму на стороні змінного струму трифазного чотириквadrантного перетворювача 1 функціонує (розглянемо на прикладі пристрою, показано на Фіг.1) у такий спосіб. Заздалегідь домовимося надалі під сталим режимом роботи розглянутого перетворювача розуміти його роботу при малих значеннях відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проєкцій струму на стороні змінного струму перетворювача (які не перевищують допустимої для них області), а під динамічним режимом - роботу зазначеного перетворювача при відхиленнях  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проєкцій струму, що перевищують припустиму область відхилень.

За допомогою датчика фазних ЕРС 14 контролюють фазні електрорушійні сили  $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$  на стороні змінного струму перетворювача 1, що надходять на один із входів обчислювача проєкцій вектора ЕРС 29. На інший вхід цього обчислювача й на один із входів обчислювача проєкцій вихідної напруги 30 надходять вихідні сигнали від задатчика гармонійних функцій 28, що формує гармонійні функції  $\cos \Theta_k$ ,  $\sin \Theta_k$  від аргументу  $\Theta_k$  ортогональної координатної системи «х-у», де  $\Theta_k$  - кут зсуву осі абсцис «х» зазначеної ортогональної координатної системи щодо нерухомої осі «а» відліку (співпадаючої, наприклад, з геометричною віссю статорної обмотки фази «А» асинхронного двигуна - у частотно-регульованому асинхронному електроприводі або геометричній осі фази «А» вторинної обмотки силового трансформатора - для активного фільтра [3]).

Обчислювач проєкцій вектора ЕРС 29 визначає на своїх виходах зі співвідношень [3]:

$$\left. \begin{aligned} E_\alpha &= E_A; E_\beta = (E_B - E_C) / \sqrt{3}; \\ E_x &= E_\alpha \cos \Theta_k + E_\beta \sin \Theta_k, \\ E_y &= E_\beta \cos \Theta_k - E_\alpha \sin \Theta_k \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

проєкції  $E_x$  й  $E_y$  узагальненого вектора ЕРС  $\bar{E} = E_x + jE_y$  на осі абсцис «х» й ординат «у» ортогональної координатної системи «х-у», де  $E_\alpha$ ,  $E_\beta$  - проєкції узагальненого вектора ЕРС ротора  $\bar{E}$  на осі нерухомої ортогональної координатної системи « $\alpha$ - $\beta$ »;  $j$  - мніма одиниця.

За допомогою датчика напруги 13 контролюють напруги  $U_d$  на стороні постійного струму перетворювача 1, що надходить на другий вхід обчислювача проєкцій вихідної напруги 30. За допомогою даного обчислювача 30 для кожної з можливих комбінацій у табл. 1 відкритих і закритих силових ключів 16-21 перетворювача 1 визначають прогнозовані значення проєкцій  $U_x(m)$ ,  $U_y(m)$  узагальненого вектора напруги  $\bar{U}(m) = U_x(m) + jU_y(m)$ , створюваного на стороні змінного струму перетворювача 1 при даних можливих комбінаціях його відкритих і закритих силових ключів. Зазначені проєкції  $U_x(m)$  й  $U_y(m)$  узагальненого вектора  $\bar{U}(m)$  на осі згаданої ортогональної координатної системи «х-у» розраховуються в обчислювачі 30, виходячи з прогнозованих значень (згідно з табл. 1) проєкцій узагальненого вектора вихідної напруги  $U_\alpha(m)$ ,  $U_\beta(m)$  перетворювача 1 на осі нерухомої ортогональної координатної системи « $\alpha$ - $\beta$ », з використанням наступних співвідношень [3]:

$$\left. \begin{aligned} U_x(m) &= U_\alpha(m) \cos \Theta_k + U_\beta(m) \sin \Theta_k, \\ U_y(m) &= U_\beta(m) \cos \Theta_k - U_\alpha(m) \sin \Theta_k, \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

$$m = 1, 2, \dots, 8.$$

Таблиця 1

Умовні номери комбінацій відкритих (показані знаком «+») і закритих силових ключів чотириквadrантного перетворювача

Номер комбінації m	Наявність імпульсів керування, що відкривають силові ключі						$U_\alpha(m)$	$U_\beta(m)$
	16	17	18	19	20	21		
1	+			+		+	$+U_d$	0
2	+		+			+	$+U_d/2$	$+\sqrt{3} + U_d/2$
3		+	+			+	$-U_d/2$	$+\sqrt{3} + U_d/2$
4		+	+		+		$-U_d$	0
5		+		+	+		$-U_d/2$	$-\sqrt{3} + U_d/2$
6	+			+	+		$+U_d/2$	$-\sqrt{3} + U_d/2$
7	+		+		+		0	0
8		+		+		+	0	0



За допомогою обчислювача проекцій результуючої напруги 31 розраховують у вигляді різниці згаданих прогнозованих проекцій  $U_x(m)$ ,  $U_y(m)$  узагальненого вектора напруги  $\bar{U}(m)$  й проекцій  $E_x$ ,  $E_y$  узагальненого вектора ЕРС  $E$  прогнозовані значення проекцій  $\Delta U_x(m)$ ,  $\Delta U_y(m)$  результуючого вектора напруги  $\Delta \bar{U}(m)$  при всіх можливих комбінаціях відкритих і закритих силових ключів перетворювача 1:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_x(m) &= U_x(m) - E_x, \\ \Delta U_y(m) &= U_y(m) - E_y. \end{aligned} \right\} (10)$$

За допомогою блоку датчиків відхилення проекцій струму 15 контролюють відхилення  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  між заданими  $I_x^*$ ,  $I_y^*$  й фактичними  $I_x$ ,  $I_y$  значеннями проекцій (на осі зазначеної ортогональної координатної системи «х-у») узагальненого вектора струму  $\bar{I}$ , створюваного на стороні змінного струму перетворювача 1:

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_x &= I_x^* - I_x, \\ \Delta I_y &= I_y^* - I_y. \end{aligned} \right\} (11)$$

За допомогою першого обчислювача прогнозуючого функціонала 9 через обчислені проекції  $\Delta U_x(m)$ ,  $\Delta U_y(m)$  прогнозуючого вектора результуючої напруги й через контрольовані відхилення  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій струму розраховують для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача значення  $F_1(m)$  першого прогнозуючого функціонала. За допомогою першого обчислювача екстремального значення 7 з розрахованих значень  $F_1(m)$  першого прогнозуючого функціонала знаходять екстремальне значення  $F_1^0$  даного функціонала, яке відповідає швидкодіючому регулюванню струму на стороні змінного струму перетворювача 1 у динамічних режимах його роботи.

У блоці порівняння відхилення проекцій блоку 12 задають припустиму (яка характеризується границею  $h$ ) область відхилення проекцій узагальненого вектора струму на стороні змінного струму перетворювача 1, що відповідає сталим режимам роботи цього перетворювача, з якої порівнюють контрольовані відхилення  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій узагальненого вектора струму  $I$ . Причому, якщо контрольовані відхилення  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій узагальненого вектора струму виходять за межі припустимої області, то на першому виході блоку порівняння 12 формують сигнал лог. «0», що надходить на керуючий вхід мультиплексора 6 і задає стан останнього таким, котре показано на Фіг.1. При даному стані мультиплексора 6 задають із виходу першого обчислювача екстремального значення 7 (через мультиплексор 6, перетворювач коду 5 і блок формування імпульсів 4) нове значення  $m^* = m_1$  комбінації відкритих і закритих силових ключів 16-21 перетворювача 1 таке, яке відповідає знайденому екстремальному значенню  $F_1^0$  першого прогнозуючого функціонала й забезпечує, очевидно, швидкодіюче регулювання струму на стороні змінного струму перетворювача 1 у динамічних режимах його роботи.

Якщо по закінченні динамічного режиму регулювання струму на стороні змінного струму перетворювача 1 хоча б одне з контрольованих відхи-

лень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій струму досягає границі припустимої області відхилення, то на другому виході блоку порівняння 12 формується вузький (тривалістю кілька мікросекунд) сигнал лог. «1». По цьому сигналу, що надходить на керуючий вхід першого 32 й другого 33 регістрів, дозволяється зміна вихідних сигналів цих регістрів на значення, що є присутні у цей момент часу на входах цих регістрів. У результаті цього на виході першого регістра 32 установлюються значення  $\Delta U_{x0}(m)$ ,  $\Delta U_{y0}(m)$ , що відповідають значенням проекцій  $\Delta U_x(m)$ ,  $\Delta U_y(m)$  прогнозованих результуючих векторів напруги на границі припустимої області відхилення, а на виході другого регістра 33 - установлюються значення  $\Delta I_{x0}$ ,  $\Delta I_{y0}$  відхилення  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій струму, які також відповідають (належать) границям припустимої області відхилення. По закінченні вузького одиничного імпульсу на другому виході блоку порівняння 12 забороняється зміна вихідних сигналів регістрів 32 й 33, внаслідок чого на їхніх виходах зберігаються сигнали, рівні відповідно  $\Delta U_{x0}(m)$ ,  $\Delta U_{y0}(m)$  і  $\Delta I_{x0}$ ,  $\Delta I_{y0}$ .

Через дані сигнали, що надходять на перший й другий входи другого обчислювача прогнозуючого функціонала 10, у цьому обчислювачі розраховують для всіх можливих комбінацій ( $m = 1, 2, \dots, 8$ ) відкритих і закритих силових ключів перетворювача 1 значення  $F_2(m)$  другого прогнозуючого функціонала, з яких за допомогою другого обчислювача екстремального значення 8 знаходять екстремальне значення  $F_2^0$  даного функціонала, що відповідає мінімально можливій частоті перемикачів силових ключів перетворювача 1 для сталих режимів його роботи й досягає при комбінації  $m_2$  відкритих і закритих силових ключів перетворювача 1.

Після входження відхилення  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій струму усередину припустимої області відхилення (яка відповідає сталому режиму роботи перетворювача 1) у блоці порівняння 12 на першому виході формують сигнал лог. «1», що надходить на керуючий вхід регістра 6, а на другому виході - сигнал лог. «0», що надходить на керуючий вхід першого 32 й другого 33 регістрів. Зазначені вихідні сигнали блоку порівняння відхилення проекцій струму 12 відповідно: по-перше, змінюють на протилежне (показаному на Фіг.1) стан мультиплексора 6 й, по-друге, забороняють зміну вихідних сигналів регістрів 32 й 33. У результаті цього задають (через перетворювач коду 5 і блок формування імпульсів 4) комбінацію  $m^*$  відкритих і закритих силових ключів 16-21 перетворювача 1 рівної згаданому значенню  $m_2$ , яка відповідає екстремальному значенню  $F_2^0$  другого прогнозуючого функціонала й забезпечує мінімально можливу частоту перемикачів силових ключів цього перетворювача в сталих режимах його роботи. Причому, беручи до уваги відзначену заборону на зміну вихідних сигналів регістрів 32 й 33, коли контрольовані відхилення  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  перебувають усередині припустимої для них області відхилення, примусово підтримують незмінною зазначену комбінацію  $m^* = m_2 = \text{const}$  відкритих і закритих силових ключів перетворювача 1.

Пристрій на Фіг.2, у якому реалізується запропонований спосіб векторного регулювання струму в частотно-регульованому асинхронному електро-

приводі, функціонує в такий спосіб. Від джерела постійної напруги 34 подають живлення до сторони постійного струму (показаної клемми «+» й «-») чотириквadrантного перетворювача 1, у якого сторону змінного струму (позначену клемми «а», «b» й «с») навантажують на асинхронний короткозамкнений двигун 35. Зазначене взаємне з'єднання джерела постійної напруги 34, трифазного чотириквadrантного перетворювача 1 й асинхронного двигуна 35 відповідає, як відомо, частотно-регульованому асинхронним електроприводам, створюваним на основі автономного інвертора напруги (виконаного на Фіг.2 у вигляді перетворювача 1) із широтно-імпульсною модуляцією [3].

У пристрої на Фіг.2 за допомогою блоку датчиків напруги 50 і блоку датчиків струму 51 контролюють відповідно фазні напруги  $U_A$ ,  $U_B$  й фазні струми  $I_A$ ,  $I_B$  на короні змінного струму чотириквadrантного перетворювача 1 (виконуючого, як було зазначено вище, роль трифазного автономного інвертора напруги). Через згадані фазні напруги  $U_A$ ,  $U_B$  й струми  $I_A$ ,  $I_B$ , які надходять на входи обчислювача фазних ЕРС ротора 52, в останньому розраховують зведені до статора фазні ЕРС ротора  $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$  асинхронного двигуна 35 зі співвідношень [3]:

$$\left. \begin{aligned} E_A &= U_A - \left[ R_s I_A + L_\sigma \frac{dI_A}{dt} \right], \\ E_B &= U_B - \left[ R_s I_B + L_\sigma \frac{dI_B}{dt} \right], \\ E_C &= -(E_A + E_B). \end{aligned} \right\} (12)$$

У даних співвідношеннях фазні ЕРС ротора  $E_A$ ,  $E_B$  двигуна 35 обчислюють у вигляді різниці між відповідною фазною напругою  $U_A$  (або  $U_B$ ), контрольованою на стороні змінного струму перетворювача 1, і сумою двох доданків, перший з яких розраховують у вигляді добутку активного опору  $R_s$  статора двигуна на значення струму  $I_A$  (або  $I_B$ ), контрольованого на стороні змінного струму в даній фазі перетворювача 1, а другий доданок визначають у вигляді добутку похідної за часом від цього струму на значення сумарної індуктивності розсіювання  $L_\sigma$  статора і ротора двигуна. Беручи до уваги, що в асинхронному короткозамкненому двигуні сума фазних ЕРС ротора в будь-який момент часу дорівнює нулю: ( $E_A + E_B + E_C = 0$ ), третю фазну ЕРС ротора  $E_C$  двигуна знаходять із більше простого третього співвідношення в (12) - у вигляді суми двох інших фазних ЕРС ротора ( $E_A$  і  $E_B$ ), узятих зі зворотним знаком.

Через те, що в схемі на Фіг.2 від задатчика гармонійних функцій 28 (який входить до складу блоку обчислювачів проекцій векторів 11) задають гармонійні функції  $\cos\Theta_k$ ,  $\sin\Theta_k$  (від аргументу  $\Theta_k$  осі абсцис «х» координатної системи «х-у») рівними відповідно гармонійним функціям  $\cos\Theta_\psi$ ,  $\sin\Theta_\psi$  від аргументу  $\Theta_\psi$  узагальненого вектора потокозчеплення ротора  $\bar{\Psi}_r$  асинхронного двигуна 35, зазначену ортогональну координатну систему «х-у» орієнтують відносно осі абсцис «х» по узагальненому

вектору потокозчеплення ротора  $\bar{\Psi}_r$  двигуна 35.

При цьому припустимо область відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій узагальненого вектора струму  $I$ , створеного на стороні змінного струму перетворювача 1, задають у сталих режимах співвідношенням (1). Зазначеному співвідношенню відповідає на діаграмі Фіг.4 припустима область ABCD, що має вид квадрата й характеризується границями, рівними:  $+h$  й  $-h$ .

З виходу блоку датчиків відхилень проекцій струму 15 на входи релейних елементів 36 й 37 (які входять до складу першого обчислювача прогнозування функціонала 9) надходять відхилення  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій узагальненого вектора статорного струму  $I$ , створеного на стороні змінного струму перетворювача 1. За допомогою релейних елементів 36 й 37 формують гістерезисного типу релейні функції  $f_x$  й  $f_y$  (форма яких показана усередині цих елементів на Фіг.2), знаки яких змінюються при виході відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій струму за межі припустимої області (заданої квадратом ABCD на Фіг.4) згідно з полярністю відповідного відхилення  $\Delta I_x$  або  $\Delta I_y$  проекції узагальненого вектора струму  $I$ . За допомогою зазначених релейних елементів 36, 37, множних блоків 38 й 39 та першого обчислювального пристрою 40 розраховують із співвідношень (2) перший прогнозувальний функціонал  $F_1(m)$  та задають його розраховане значення з виходу обчислювача 9 (який є виходом обчислювального пристрою 40) на вхід першого обчислювача екстремального значення 7. Причому в співвідношеннях (2) наявність позитивної полярності співмножника:  $[f_x \Delta U_x(m)]$  - відповідає однаковим між собою знакам функцій  $f_x$  та проекції  $\Delta U_x(m)$ , що забезпечує гарантоване відпрацьовування відхилення  $\Delta I_x$  проекції струму, що намагнічує [34]. А наявність позитивної полярності співмножника:  $[f_x \Delta U_x(m)]$  - відповідає однаковим між собою знакам функції  $f_y$  та проекції  $\Delta U_y(m)$ , що забезпечує, в свою чергу, гарантоване відпрацьовування відхилення  $\Delta I_y$  активної проекції струму згідно [3].

За допомогою першого обчислювача екстремального значення 7 визначають екстремальне значення  $F_1^0(m)$  першого прогнозуального функціонала  $F_1(m)$  у вигляді його максимуму відповідно до співвідношення (3), а також відповідне йому оптимальне значення  $m_1$  комбінації відкритих і закритих силових ключів перетворювача 1 для динамічних режимів його роботи. Дане значення  $m_1$  комбінації силових ключів перетворювача 1 досягається, згідно (2), при одночасному виконанні двох умов: по-перше, - при максимальному (і позитивному) значенні добутку:  $[f_x \Delta U_y(m)]$ . І, по-друге, - при позитивному значенні добутку  $[f_x \Delta U_x(m)]$ , - оскільки тільки при такому значенні даного добутку коефіцієнт  $K_1$  у прогнозуальному функціоналі  $F_1(m)$  не дорівнює нулю (і позитивний). Причому, символ «sign» в співвідношенні (2) й при наступному його використанні позначає математичну функцію визначення алгебраїчного знаку числа (й дорівнює для додаткового й від'ємного числа відповідно +1 або -1).

При відхиленнях  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій статорного струму, що виходять за межі їхньої припустимої

області (заданої квадратом ABCD на Фіг.4), вихідні сигнали  $|\Delta I_x|, |\Delta I_y|$  першого 41 та другого 42 обчислювачів модуля перевищують уставку  $h$ , внаслідок чого на виходах релейних елементів 43, 44 та компараторів 45, 46 присутні сигнали лог. «1». При цьому вихідні сигнали логічних елементів «АБО» 47 та 48 дорівнюють лог. «1», при яких на першому (вихід логічного елемента 47) та другому (вихід формувача імпульсів 49) виходах блока 12 присутні сигнали, які дорівнюють відповідно лог. «1» та лог. «0». Це забезпечує в пристрої на Фіг.2 (аналогічно розглянутому при описі функціонування пристрою на Фіг.1) стан мультимплексора 6 відповідає показаному на цьому малюнку. При даному стані мультимплексора 6 від першого обчислювача екстремального значення 7 задають (через мультимплексор 6, перетворювач коду 5 і блок формувачів імпульсів 4) нову комбінацію  $m^* = m_1$  відкритих і закритих силових ключів 16-21 перетворювача 1 відповідному екстремальному значенню  $F_1^0$  першого прогнозуючого функціонала  $F_1(m)$ .

У свою чергу, завдання такої комбінації  $m_1$  силових ключів перетворювача 1 забезпечує в динамічних режимах граничне (оптимальне) за швидкістю регулювання відхилення  $\Delta I_y$  активної проекції статорного струму й стійкий процес регулювання відхилення  $\Delta I_x$  проекції, що намагнічує, статорного струму в заданому «коридорі» для двигуна 35 відповідно до діаграми на Фіг.5 [1]. На цьому рисунку показаний (годографом  $Q_1Q_2Q_3Q_4M$ ) процес регулювання відхилення  $\Delta I_x, \Delta I_y$  проекцій статорного струму двигуна 35, що відповідає динамічному режиму відпрацювання в пристрої на Фіг.2 східчає задані значення  $I_y^*$  активної проекції статорного струму двигуна при законі частотного керування двигуном зі сталістю складової, що намагнічує, статорного струму (або, те ж саме, - зі сталістю модуля потокозчеплення ротора двигуна) [3].

По закінченні відзначеного вище процесу відпрацювання активної проекції  $I_y^*$  статорного струму двигуна значення  $\Delta I_x, \Delta I_y$  відхилення намагнічуючої й активної проекцій досягають границь припустимої області (нехай, наприклад, це відбулося в крапці M на діаграмі припустимої області ABCD на Фіг.4). При цьому в блоці порівняння 12 в цей момент часу на виході компараторів 45 та 46 встановлюються сигнали, рівні лог. «0», внаслідок чого на виході логічного елемента «АБО» 48 виконується зміна сигналу з лог. «1» в лог. «0». При зазначеній зміні фронту вихідного сигналу логічного елемента 48, який надходить на вхід формувача імпульсів 49, на виході останнього формується вузький (довжиною декілька мікросекунд) імпульс, рівний лог. «1». Коли контрольовані відхилення  $\Delta I_x, \Delta I_y$  перебувають в області припустимих відхилень, заданої співвідношенням (1), вихідні сигнали релейних елементів 43, 44 і логічного елемента «АБО» 47 стають рівними лог. «0». При даних вихідних сигналах блоку порівняння 12 (на першому його виході сигнал дорівнює лог. «0», а на другому - короткочасно лог. «1»). Як було докладно розглянуто при описі пристрою на Фіг.1, при цьому за допомогою блоку обчислювачів проекцій векторів

11 визначають відповідні цьому моменту часу: прогнозовані значення  $\Delta U_{x0}(m)$ ,  $\Delta U_{y0}(m)$  проекцій результуючого вектора напруги й значення відхилень  $\Delta I_{x0}, \Delta I_{y0}$  проекцій статорного струму, - які надходять на входи другого обчислювача прогнозуючого функціонала 10. За допомогою даного обчислювача 10 задають другий функціонал  $F_2(m)$  залежностями з (4).

Пояснимо фізичний зміст функціонала  $F_2(m)$  на прикладі траєкторії MN зміни відхилення  $\Delta I_x, \Delta I_y$  проекцій статорного струму в сталому режимі усеїдині припустимої області ABCD на Фіг.4, що відповідає  $m$ -ої комбінації силових ключів перетворювача 1. Згідно [3] для довільної  $m$ -ої комбінації відкритих і закритих силових ключів перетворювача 1 траєкторії MN являє собою відрізок прямої, а похідні в часі від проекцій статорного струму приблизно рівні [3]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI_x}{dt} &\approx \frac{\Delta U_x(m)}{L_\sigma} \\ \frac{dI_y}{dt} &\approx \frac{\Delta U_y(m)}{L_\sigma} \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

Виходячи із цього, поточні значення відхилення  $\Delta I_x, \Delta I_y$  проекцій струму на стороні змінного струму чотириквadrантного перетворювача, що відповідають  $m$ -ої комбінації його силових ключів й характерним рухом по згаданому відрітку прямої MN (або його продовженню) на Фіг.4, описуються наступними співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_x &= \Delta I_{x0} - \frac{\Delta U_{x0}(m)}{L_\sigma} t \\ \Delta I_y &= \Delta I_{y0} - \frac{\Delta U_{y0}(m)}{L_\sigma} t \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

де  $t$  - час, що відраховується від моменту часу, що відповідає знаходженню відхилення  $\Delta I_x, \Delta I_y$  проекцій статорного струму в початковій точці M на границі припустимої області.

За допомогою останніх співвідношень запишемо умови перетинання годографом відхилення  $\Delta I_x, \Delta I_y$  проекцій статорного струму вертикальних і горизонтальних прямих, що характеризуються значеннями, рівними:  $\pm h$  по осях абсцис й ординат відповідно (тобто - такими ж значеннями, як у границь припустимої області відхилення ABCD на Фіг.4):

$$\left. \begin{aligned} \pm h &= \Delta I_{x0} - \frac{\Delta U_{x0}(m)}{L_\sigma} t_x(m) \\ \pm h &= \Delta I_{y0} - \frac{\Delta U_{y0}(m)}{L_\sigma} t_y(m) \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

де  $t_x(m)$  й  $t_y(m)$  - часи досягнення зазначеними відхиленнями  $\Delta I_x, \Delta I_y$  проекцій статорного струму згаданих значень абсцис й ординат, рівних:  $\pm h$ .

Беручи до уваги, що при позитивних значеннях проекцій  $\Delta U_{x0}(m)$ ,  $\Delta U_{y0}(m)$  результуючого вектора напруги відбувається зменшення значень відхилення  $\Delta I_x, \Delta I_y$  проекцій статорного струму (що приводить до наступного досягнення ними негативних значень по осі абсцис й ординат, рівних:  $-h$ ), а при від'ємних значеннях проекцій  $\Delta U_{x0}(m)$ ,  $\Delta U_{y0}(m)$  зазначеного вектора - навпаки, відбувається збільшення відхилення  $\Delta I_x, \Delta I_y$  проекцій статорного

струму (що приводить до досягнення ними позитивних значень по осі абсцис й ординат, рівних:  $+h$ ), перетворимо умови (15) до наступного виду:

$$\left. \begin{aligned} -h \operatorname{sign}[\Delta U_{x0}(m)] &= \Delta I_{x0} - \frac{\Delta U_{x0}(m)}{L_{\sigma}} t_x(m), \\ -h \operatorname{sign}[\Delta U_{y0}(m)] &= \Delta I_{y0} - \frac{\Delta U_{y0}(m)}{L_{\sigma}} t_y(m). \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

Зі співвідношень (16) визначимо часи  $t_x(m)$  й  $t_y(m)$  досягнення відхиленнями  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій статорного струму згаданих значень абсцис й ординат, рівних:  $\pm h$ , які перебувають у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} t_x(m) &= \frac{L_{\sigma}}{\Delta U_{x0}(m)} \{ \Delta I_{x0} + h [\operatorname{sign}(\Delta U_{x0}(m))] \}, \\ t_y(m) &= \frac{L_{\sigma}}{\Delta U_{y0}(m)} \{ \Delta I_{y0} + h [\operatorname{sign}(\Delta U_{y0}(m))] \} \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

З (17) визначимо для  $m$ -ої комбінації силових ключів перетворювача 1 час  $t(m)$  присутності відхилень проекцій струму  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  в межах припустимої області ABCD на Фіг.4, що, очевидно, дорівнює мінімальному значенню з розрахованих часів  $t_x(m)$  й  $t_y(m)$ :

$$t(m) = \min\{t_x(m), t_y(m)\}, \quad (18)$$

Беручи до уваги співвідношення (18), значення з (4) другого прогнозного функціонала  $F_2(m)$  є прямо пропорційним прогнозованому часу  $t(m)$  присутності відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій статорного струму усередині припустимої області відхилень у сталому режимі роботи для  $m$ -ої комбінації силових ключів перетворювача 1. За допомогою другого обчислювача екстремального значення 8 знаходять екстремальне значення  $F_2^0$  другого прогнозного функціонала  $F_2(m)$  у вигляді його максимуму зі співвідношення (5) і відповідне йому оптимальне значення  $m_2$  комбінації силових ключів перетворювача 1. З урахуванням вищевикладеного, екстремальне значення  $F_2^0$  другого прогнозного функціонала  $F_2(m)$  прямо пропорційно найбільшому можливому значенню тривалості часу  $t(m_1)$  знаходження відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій статорного струму усередині припустимої області відхилень у сталому режимі роботи, а, отже, - відповідає мінімально можливій частоті перемикання силових ключів перетворювача 1 у сталому режимі роботи (яка досягається при завданні  $m_1$ -ої комбінації його силових ключів).

У блоці порівняння відхилення проекцій струму 12 з виходів обчислювачів модуля 41 й 42 на входи релейних елементів 43, 44 і компараторів 45, 46 надходять сигнали абсолютних значень  $|\Delta I_x|$  і  $|\Delta I_y|$  відхилень проекцій статорного струму двигуна. На виході зазначених релейних елементів 43 й 44 формуються гістерезисного типу релейні функції (з формою, показаною усередині цих елементів Фіг.2), що характеризуються можливими значеннями, рівними лог. «0» або лог. «1» й свої значення, що змінюються, при вхідних сигналах, рівних:  $h$  або  $(h+\Delta h)$ , де  $\Delta h=(0,1-1)h$ . При цьому на виході логічного елемента «АБО» 47 формується сигнал лог. «0», якщо вихідні сигнали релейних елементів 43 й 44 одночасно рівні лог. «0» (відповідає сталому режиму роботи), або - сигнал лог. «1», якщо хоча б один з вихідних сигналів релей-

них елементів 43 й 44 дорівнює лог. «1» (відповідає динамічному режиму роботи).

Розглянемо роботу пристрою на Фіг.2 у сталому режимі роботи, коли відхилення  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій струму перебували в попередній інтервал часу усередині припустимої області (ABCD на Фіг.4) і в наступний момент часу досягли границі (точка N на Фіг.4) цієї області. При цьому на границі припустимої області вихідний сигнал хоча б в одного з компараторів 45 або 46 змінюється з лог. «0» на лог. «1», внаслідок цього, аналогічно змінюється з лог. «0» на лог. «1» вихідний сигнал логічного елемента «АБО» 48, що надходить на вхід формувача імпульсів 49. Останній при зміні фронту (з лог. «0» у лог. «1») вхідного сигналу формує на своєму вході вузький (тривалістю кілька мікросекунд) сигнал лог. «1». При впливі цього сигналу на керуючі входи регістрів 32 й 33 (що містяться в складі блоку 11, показаного на Фіг.1) на виходах цих регістрів устанавлюються значення  $\Delta U'_{x0}(m)$ ,  $\Delta U'_{y0}(m)$ , що відповідають значенням проекцій  $\Delta U_{x0}(m)$ ,  $\Delta U_{y0}(m)$  прогнозованих результуючих векторів напруги  $\Delta \bar{U}(m)$  в точці N на границі припустимої області відхилень на Фіг.4, а також значення  $\Delta I'_{x0}$ ,  $\Delta I'_{y0}$  відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій струму, які теж відповідають (належать) границям припустимої області відхилень у крапці N на Фіг.4. По закінченні вузького одиничного імпульсу на виході формувача імпульсів 49 (що є другим виходом блоку порівняння 12) забороняється зміна вихідних сигналів  $\Delta U'_{x0}(m)$ ,  $\Delta U'_{y0}(m)$  і  $\Delta I'_{x0}$ ,  $\Delta I'_{y0}$  згаданих регістрів 32 й 33. Через дані сигнали, що надходять на перший і другий входи другого обчислювача прогнозного функціонала 10, розраховують у цьому обчислювачі для всіх можливих комбінацій ( $m = 1, 2, \dots, 8$ ) відкритих і закритих силових ключах перетворювача 1 значення  $F_2(m)$  другого прогнозного функціонала, з яких за допомогою другого обчислювача екстремального значення 8 знаходять екстремальне значення  $F_2^0$  даного функціонала й відповідне йому нове значення  $m'_2$  оптимальної комбінації силових ключів перетворювача 1.

Якщо за час обчислення зазначеної нової комбінації  $m'_2$  силових ключів перетворювача 1 абсолютні  $|\Delta I_x|$ ,  $|\Delta I_y|$  відхилень проекцій струму не

перевищили уставки  $(h+\Delta h)$ , то на виходах релейних елементів 43, 44 і логічного елемента «АБО» 47 присутні сигнали, рівні лог. «0», які забезпечують стан мультиплексора 6, який протилежний показаному на Фіг.2. При цьому зазначена обчислена комбінація  $m'_2$  задає (від другого обчислювача екстремального значення 8 через мультиплексор 6, перетворювач коду 5 і блок формувачів імпульсів 4) відповідну їй (з табл. 1) комбінацію відкритих і закритих силових ключів 16-21 перетворювача 1. Дана комбінація  $m'_2$  силових ключів 16-21 перетворювача 1 забезпечує повернення (по траєкторії NS на Фіг.4) відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій струму в межі припустимої для них області й задає мінімально можливе значення частоти перемикання силових ключів перетворювача 1 у сталих режимах. Далі для пристрою на Фіг.2 робота повторюється й відповідає розглянутому сталому

режиму.

Розглянемо роботу пристрою на Фіг.2, коли при виході відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проєкцій струму із припустимої області хоча б одне з їхніх абсолютних значень  $|\Delta I_x|$ ,  $|\Delta I_y|$  перевищує уставку, рівну ( $h + \Delta h$ ). У цьому випадку на виході хоча б одного з релейних елементів 43 або 44 відповідно встановлюється сигнал лог. «1», внаслідок чого змінюється на лог. «1» вихідний сигнал логічного елемента «АБО» 47, що приводить до зміни стану (на відповідно показаному на Фіг.2) мультиплексора 6. При цьому з виходу першого обчислювача екстремального значення 7 задають (через мультиплексор 6, перетворювач коду 5 і блок формувачів імпульсів 4) комбінацію  $m_1$  відкритих і закритих силових ключів 16-21 перетворювача 1 такою, яка забезпечує оптимальне за швидкодією регулювання статормого струму двигуна 35 у динамічних режимах роботи. Далі робота пристрою на Фіг.2 повторюється й відповідає раніше розглянутій роботі цього пристрою для динамічних режимів роботи.

Пристрій на Фіг.3 (у якому реалізується запропонований спосіб векторного регулювання струму в активному фільтрі) функціонує в такий спосіб. Від джерела трифазної напруги мережі 54 подають живлення безпосередньо або через реактори 53 до сторони змінного струму (позначеної клемми «а», «b» й «с») трифазного чотириквadrантного перетворювача 1. За допомогою датчика фазних ЕРС 14 контролюють у якості цих ЕРС фазні напруги  $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$  зазначеного джерела трифазної напруги мережі 54 (зокрема, фазні напруги на вторинних обмотках трансформатора Т цього джерела). За допомогою квадратора 61 (що міститься в блоці порівняння відхилень проєкцій струму 12) обчислюють у вигляді кореня квадратного із суми квадратів згаданих відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проєкцій струму модуль  $\Delta I$  узагальненого вектора відхилення струму  $\Delta \vec{I}$ :

$$\Delta I = \sqrt{\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2}. \quad (19)$$

Отримане значення модуля  $\Delta I$  порівнюють із установленою величиною  $h$ , що задає на Фіг.6 припустиму область (у вигляді кола із центром у точці 0) відхилень проєкцій струму в сталому режимі роботи. Причому, це порівняння відбувається на входах компаратора 62 і релейного елемента 63, що входять до складу блоку порівняння відхилень проєкцій струму 12 у пристрої на Фіг.3. При цьому релейний елемент 63 характеризується релейною передаточною функцією гістерезисного типу й формує на своєму виході сигнал, рівний лог. «0», при  $\Delta I < h$ , або сигнал, рівний лог. «1», - при  $\Delta I > h$  або при  $\Delta I > h + \Delta h$  (відповідно до наведеного позначення елемента 63 на Фіг.3) На виході компаратора 62 на границі припустимої області відхилень (при  $\Delta I = h$  на Фіг.6) відбувається зміна вихідного сигналу даного компаратора: з лог. «0» у лог. «1» або з лог. «1» у лог. «0» (залежно від того, контрольовані відхилення  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проєкцій струму виходять за межі або входять усередину припустимої для них області відхилень відповідно). При зазначеній зміні фронтів вихідного сигналу компа-

ратора 62 за допомогою формувача імпульсів 64 на виході останнього формується вузький (тривалістю кілька мікросекунд) імпульс, рівний лог. «1», що дозволяє змінити вихідних сигналів регістрів 32 й 33, що містяться в блоці обчислювачів проєкцій векторів 11 (показаному на Фіг.1).

За допомогою задатчика гармонійних функцій 28 (що входить згідно Фіг.1 до складу блоку обчислювачів проєкцій векторів 11) задають ортогональну координатну систему «х-у» нерухомою з орієнтацією осі абсцис «х» по геометричній осі обмотки трансформатора Т, що створює ЕРС  $E_A$  у фазі А на стороні змінного струму перетворювача 1. Це досягається в згаданому задатчику 28 шляхом завдання аргументу  $\Theta_k$  осі абсцис «х» цієї координатної системи рівним нулю:  $\Theta_k = 0$ . З урахуванням останнього, функціонування блоку обчислювачів проєкцій векторів 11 у пристрої на Фіг.3 відбувається ідентично раніше розглянутому функціонуванню цього блоку в пристрої на Фіг.1 - тільки лише з тією відмінністю, що обчислюють блоком 11 проєкції всіх векторів:  $\Delta U_{x0}(m)$ ,  $\Delta U_{y0}(m)$  і  $\Delta I_{x0}$ ,  $\Delta I_{y0}$  - у пристрої на Фіг.3 знаходять на осі згаданої нерухомої ортогональної координатної системи (для якої, очевидно, властиві незмінні значення гармонійних функцій:  $\cos \Theta_k = 1$  і  $\sin \Theta_k = 1$ ).

За допомогою ділильного блоку 59 (що міститься в першому обчислювачі прогнозування функціонала 9) у вигляді відносин відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проєкцій струму на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи до модуля  $\Delta I$  узагальненого вектора відхилення  $\Delta \vec{I}$  визначають значення відповідно косинуса й синуса від аргументу  $\Theta_{\Delta I}$  цього вектора:

$$\left. \begin{aligned} \cos \Theta_{\Delta I} &= \Delta I_x / I \\ \sin \Theta_{\Delta I} &= \Delta I_y / I \end{aligned} \right\}. \quad (20)$$

За допомогою квадратора 57 для всіх можливих комбінацій ( $m = 1, 2, \dots, 6$ ) відкритих і закритих силових ключів перетворювача 1 (з табл. 1) розраховують у вигляді кореня квадратного із суми квадратів його проєкцій значення модуля  $\Delta U(m)$  результуючого вектора напруги  $\Delta \vec{U}(m)$ :

$$\Delta U(m) = \sqrt{\Delta U_x^2(m) + \Delta U_y^2(m)}. \quad (21)$$

За допомогою ділильного блоку 58 у вигляді відношень проєкцій результуючого вектора напруги на осі абсцис «х» й ординат «у» ортогональної координатної системи «х» до його модуля  $\Delta U(m)$  для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача 1 обчислюють значення відповідно косинуса й синуса від аргументу  $\Theta_{\Delta U}(m)$  цього вектора:

$$\left. \begin{aligned} \cos \Theta_{\Delta U}(m) &= \Delta U_x(m) / U(m) \\ \sin \Theta_{\Delta U}(m) &= \Delta U_y(m) / U(m) \end{aligned} \right\}. \quad (22)$$

При цьому за допомогою обчислювального пристрою 60 розраховують перший прогнозувальний функціонал  $F_1(m)$  у вигляді суми двох доданків, перший з яких являє собою добуток косинусів від аргументів  $\Theta_{\Delta U}$  і  $\Theta_{\Delta I}$  результуючого вектора напруги  $\Delta \vec{U}$  й узагальненого вектора відхилення струму

$\Delta \bar{I}$ , а другий доданок - добуток синусів від аргументів  $\Theta_{\Delta U}$  і  $\Theta_{\Delta I}$  цих векторів:

$$F_1(m) = \cos \Theta_{\Delta U}(m) \cdot \cos \Theta_{\Delta I}(m) + \sin \Theta_{\Delta U}(m) \cdot \sin \Theta_{\Delta I}(m). \quad (23)$$

За допомогою другого обчислювача прогнозного функціонала 10 задають другий прогнозуєчий функціонал  $F_2(m)$  залежностями з (6). Пояснимо фізичний зміст даного прогнозуєчого функціонала  $F_2(m)$ , виходячи з аналізу зміни, що відбувається, відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проєкцій струму усередині припустимої області відхилень (у вигляді кола на Фіг.6) у сталому режимі роботи для довільної  $m$ -ої комбінації силових ключів перетворювача 1. Як відомо з [3], зміна відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проєкцій струму на стороні змінного струму чотириквadrантного перетворювача характеризується: по-перше, траєкторією руху MN у вигляді відрізка прямої на Фіг.6, і, по-друге, похідними за часом від проєкцій  $I_x$ ,  $I_y$  узагальненого вектора струму (створюваного на стороні змінного струму перетворювача 1), що розраховують зі співвідношень (13).

З урахуванням цього й беручи до уваги зміну, що відбувається, з (14) відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проєкцій струму в чотириквadrантному перетворювачі 1, тривалість часу  $t(m)$  знаходження зазначених відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  (при прямованні від точки M до точки N) усередині припустимої для них області відхилень, заданої у вигляді кола (з радіусом  $h$ ) на Фіг.6, визначається з рішення системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_{xN}(m) &= \Delta I_{x0} - \frac{\Delta U_x(m)}{L_\sigma} \cdot t(m), \\ \Delta I_{yN}(m) &= \Delta I_{y0} - \frac{\Delta U_y(m)}{L_\sigma} \cdot t(m), \\ \Delta I_{xN}^2(m) + \Delta I_{yN}^2(m) &= h^2, \\ \Delta I_{x0}^2 + \Delta I_{y0}^2 &= h^2. \end{aligned} \right\}, \quad (24)$$

де  $\Delta I_{x0}$  й  $\Delta I_{y0}$  - контрольовані в точці M на границі припустимої області значення відхилень проєкцій узагальненого вектора струму  $\bar{I}$  (створюваного на стороні змінного струму перетворювача 1);  $\Delta I_{xN}$  і  $\Delta I_{yN}$  - значення відхилень проєкцій узагальненого вектора струму  $\bar{I}$ , що відповідають у точці N на Фіг.6 границі припустимої області;  $\Delta I_{x0}(m)$ ,  $\Delta I_{y0}(m)$  - значення проєкцій прогнозованого результуючого вектора напруги  $\Delta \bar{U}(m)$  відповідно на осі абсцис й ординат ортогональної координатної системи «х», обчислені на границях припустимої області (у точці M на Фіг.6) для  $m$ -ої комбінації відкритих і закритих силових ключів перетворювача 1;  $L_\sigma$  - сумарна індуктивність фази ланцюга змінного струму чотириквadrантного перетворювача 1 у пристрої на Фіг.3 (що являє собою для однієї з фаз на стороні змінного струму цього перетворювача суму: індуктивності короткого замикання силового трансформатора Т, індуктивності реактора 53 й індуктивності кабелів, що підводять).

Рішенням системи рівнянь (21) щодо часу  $t(m)$  є вираз:

$$t(m) = 2L_\sigma = \left[ \frac{\Delta I_{x0} \Delta U_{x0}(m) + \Delta I_{y0} \Delta U_{y0}(m)}{\Delta U_{x0}^2(m) + \Delta U_{y0}^2(m)} \right]. \quad (25)$$

З урахуванням вищевикладеного, значення другого прогнозуєчого функціонала  $F_2(m)$ , що розраховується з (6), прямо пропорційні часу  $t(m)$  знаходження відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проєкцій струму в припустимій для них області, заданої навкруги (із центром у точці 0 і радіусом, рівним  $h$ ) на Фіг.6, при  $m$ -ої комбінації силових ключів перетворювача 1.

Розглянемо роботу пристрою на Фіг.3 у динамічному режимі роботи (коли відхилення  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проєкцій струму перебувають за межами припустимої області, показаної колом на Фіг.6). У цьому випадку на виході релейного елемента 63 присутній сигнал лог. «1», якому відповідає стан мультиплексора 6, показаний в схемі на Фіг.3. При цьому за допомогою першого обчислювача екстремального значення 7 знаходять екстремальне (найбільше) значення  $F_1^0$  першого прогнозуєчого функціонала  $F_1(m)$  й відповідне йому оптимальне значення  $m_1$  комбінації відкритих і закритих силових ключів перетворювача 1. Зазначене значення  $m_1$  комбінації задають (від обчислювача 7 через мультиплексор 6, перетворювач коду 5 і блок формування імпульсів 4) силовим ключам 16-21 перетворювача 1, внаслідок чого в пристрої на Фіг.3 забезпечується швидкодіюче векторне регулювання струму на стороні змінного струму зазначеного перетворювача в динамічних режимах [2].

Розглянемо роботу пристрою на Фіг.3 у сталому режимі роботи, коли по закінченні динамічного режиму відхилення  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проєкцій струму досягли (у точці M на Фіг.6) границі припустимої області відхилень. При цьому на виході формувача імпульсів 64 формується вузький (тривалістю кілька мікросекунд) імпульс, рівний лог. «1», що надходить на один із входів блоку обчислювачів проєкцій струму 11 і забезпечує (аналогічно розглянутому при описі пристрою на Фіг.1) обчислення на виході цього блоку: прогнозованих проєкцій  $\Delta U_{x0}(m)$ ,  $\Delta U_{y0}(m)$  результуючого вектора напру-

ги  $\Delta \bar{U}(m)$  й відхилень  $\Delta I_{x0}$ ,  $\Delta I_{y0}$  проєкцій струму, - відповідній границі (у точці M на Фіг.6) припустимої області відхилень у розглянутому сталому режимі. Через зазначені проєкції  $\Delta U_{x0}(m)$ ,  $\Delta U_{y0}(m)$  й  $\Delta I_{x0}$ ,

$\Delta I_{y0}$ , що надходять на входи другого обчислювача прогнозуєчого функціонала 10, в останньому розраховують із залежностей (6) для всіх можливих комбінацій силових ключів перетворювача 1 значення  $F_2(m)$  другого прогнозуєчого функціонала. За допомогою другого обчислювача екстремального значення 8 із зазначених значень  $F_2(m)$  другого прогнозуєчого функціонала знаходять його екстремальне (найбільше) значення  $F_2^0$  й відповідне йому оптимальне значення  $m_2$  комбінації силових ключів перетворювача 1 (яке, у свою чергу, відповідає максимально можливому часу:  $1(m)=1(m_2)=\max$  знаходження відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проєкцій струму в припустимій для сталих режимів області відхилень, заданої колом на Фіг.6). При

знаходженні відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій струму усередині припустимої області відхилень змінює на лог. «0» свій вихідний сигнал релейний елемент 63, внаслідок чого змінює на протилежний (показаному в схемі на Фіг.3) стан мультиплексора 6. При цьому задають (з виходу другого обчислювача екстремального значення 8 через мультиплексор 6, перетворювач коду 5 і блок формувачів імпульсів 4) зазначену комбінацію  $m_2$  для силових ключів 16-21 перетворювача 1, що забезпечує мінімально можливу частоту перемикання силових ключів даного перетворювача в сталих режимах роботи (а, отже, зменшує в ньому електричні втрати в цих режимах роботи).

Розглянемо роботу пристрою на Фіг.3 у сталому режимі роботи, коли відхилення  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій струму знаходилися усередині припустимої області відхилень (у вигляді кола на Фіг.6) і досягли границі (у точці N на Фіг.6) цієї області. При цьому змінюється з лог. «0» на лог. «1» вихідний сигнал компаратора 62, що надходить на вхід формувача імпульсів 64, внаслідок чого (у момент зміни фронту вхідного сигналу з лог. «0» на лог. «1») на виході формувача 64 формується вузький імпульс (тривалістю кілька мікросекунд). При впливі цього сигналу на керуючі входи регістрів 32 й 33 (що містяться в складі блоку 11, показаного на Фіг.1) на виході цих регістрів встановлюються значення  $\Delta U'_{x0}(m)$ ,  $\Delta U'_{y0}(m)$ , що відповідають значенням проекцій  $\Delta U_x(m)$ ,  $\Delta U_y(m)$  прогнозова-

них результуючих векторів напруги  $\bar{\Delta U}(m)$  на границі (у точці N) їхньої припустимої області, і значення  $\Delta I'_{x0}$ ,  $\Delta I'_{y0}$  відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій струму, які також відповідають (у точці N) границям припустимої області відхилень на Фіг.6. По закінченні вузького одиночного імпульсу на виході формувача імпульсів 64 (що є другим виходом блоку порівняння 12) забороняється зміна вихідних сигналів  $\Delta U'_{x0}(m)$ ,  $\Delta U'_{y0}(m)$  й  $\Delta I'_{x0}$ ,  $\Delta I'_{y0}$  згаданих регістрів 32 й 33. Через дані сигнали, що надходять на перший і другий входи другого обчислювача прогнозного функціонала 10, розраховують у цьому обчислювачі для всіх можливих комбінацій ( $m = 1, 2, \dots, 6$ ) відкритих і закритих силових ключів перетворювача 1 значення  $F_2(m)$  другого прогнозного функціонала, з яких за допомогою другого обчислювача екстремального значення 8 знаходять екстремальне значення  $F_2^0$  даного функціонала й відповідне йому нове значення  $m'_2$  комбінації силових ключів перетворювача 1. Дана комбінація  $m'_2$  силових ключів 16-21 перетворювача 1 забезпечує повернення (по траєкторії NS на Фіг.6) відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій струму в межі припустимої для них області й задає мінімально можливе значення частоти перемикання силових ключів перетворювача 1 у сталих режимах роботи. Якщо за час обчислення зазначеної нової комбінації  $m'_2$  силових ключів перетворювача 1 модуль  $\Delta I$  узагальненого вектора відхилень струму  $\bar{\Delta I}$  (обчислює на виході квадратора 61) не перевищує уставки, рівної  $(h + \Delta h)$ , то на виході релейного елемента 63 є присутнім сигнал, рівний лог. «1»,

що забезпечує стан мультиплексора 6, протилежний показаному на Фіг.3. При цьому відповідно до зазначеної обчисленої комбінації  $m'_2$  задають (з виходу другого обчислювача екстремального значення 8 через мультиплексор 6, перетворювач коду 5 і блок формувачів імпульсів 4) з табл. 1 таку комбінацію відкритих і закритих силових ключів 16-21 перетворювача 1, що забезпечує мінімально можливу частоту перемикання силових ключів перетворювача 1 у сталих режимах. Далі для пристрою на Фіг.3 робота повторюється й відповідає розглянутому сталому режиму.

Розглянемо роботу пристрою на Фіг.3, коли при виході відхилень  $\Delta I_x$ ,  $\Delta I_y$  проекцій струму із припустимої області модуль  $\Delta I$  узагальненого вектора відхилень струму перевищив уставку, рівну  $(h + \Delta h)$ . У цьому випадку на виході релейного елемента 63 встановлюється сигнал лог. «1», що приводить до зміни стану (на відповідне показаному на Фіг.3) мультиплексора 6. При цьому з виходу першого обчислювача екстремального значення 7 задають (через мультиплексор 6, перетворювач коду 5 і блок формувачів імпульсів 4) комбінацію  $m_1$  відкритих і закритих силових ключів 16-21 перетворювача 1 такою, яка забезпечує швидкодіюче векторне регулювання струму на стороні змінного струму перетворювача 1 (що виконує в пристрої на Фіг.3 роль активного фільтра) у динамічних режимах роботи. Далі робота пристрою на Фіг.3 повторюється й відповідає раніше розглянутій роботі цього пристрою для динамічних режимів роботи.

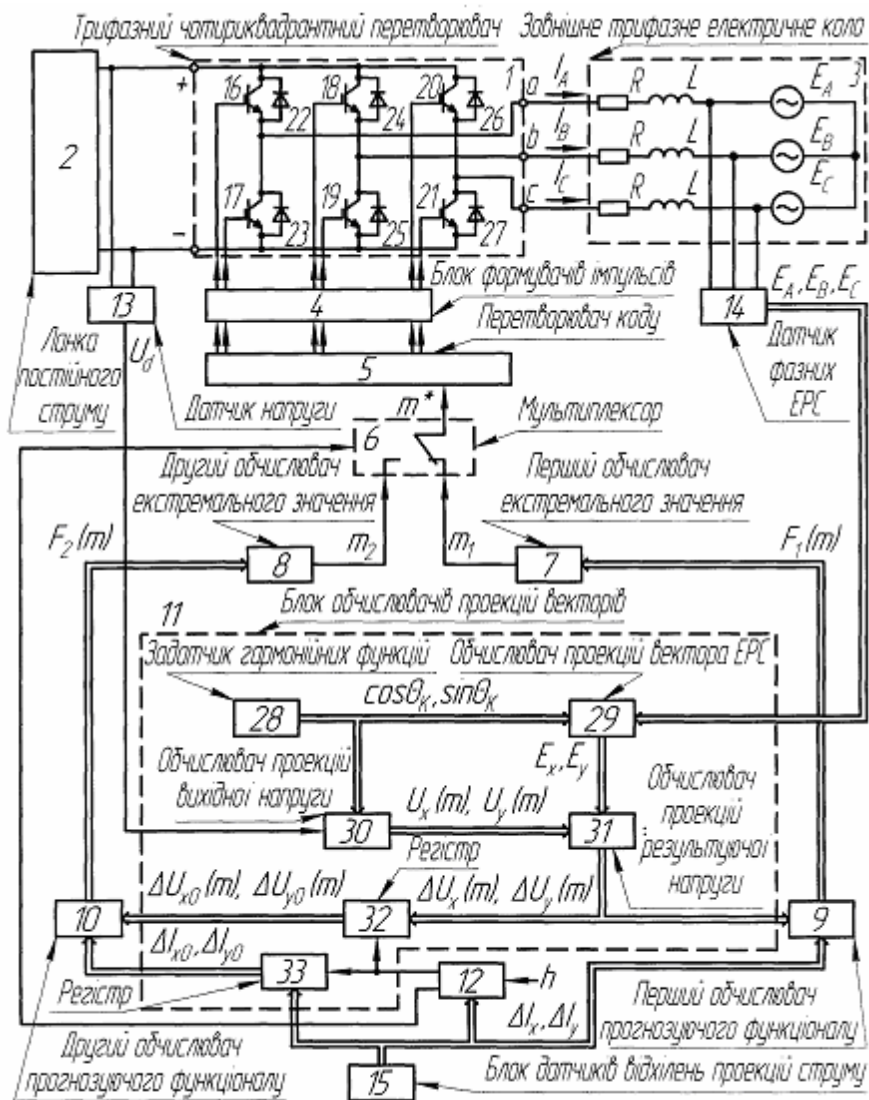
Таким чином, запропонованим способом векторного регулювання струму (реалізованим у пристроях, показаних на Фіг.1, Фіг.2 і Фіг.3) забезпечується: по-перше, швидкодіюче регулювання струму на стороні змінного струму трифазного чотириквadrантного перетворювача 1 - у динамічних режимах роботи, і, по-друге, мінімально можлива (при заданих границях припустимої області відхилень проекцій струму) частота перемикання силових ключів даного перетворювача - у сталих режимах роботи. Останнє дозволяє зменшити електричні втрати в цьому перетворювачі в сталих режимах роботи, а, отже, - досягти додаткового енергозбереження в частотно-регульованих асинхронних електроприводах й активних фільтрах, створюваних на основі згаданого трифазного чотириквadrантного перетворювача.

Джерела інформації:

1. Волков А.В. Оптимальное по быстродействию векторное регулирование статорного тока в частотно-управляемых асинхронных электроприводах с широтно-импульсной модуляцией // Электротехника. - 2003. - №12. - С.34-43.

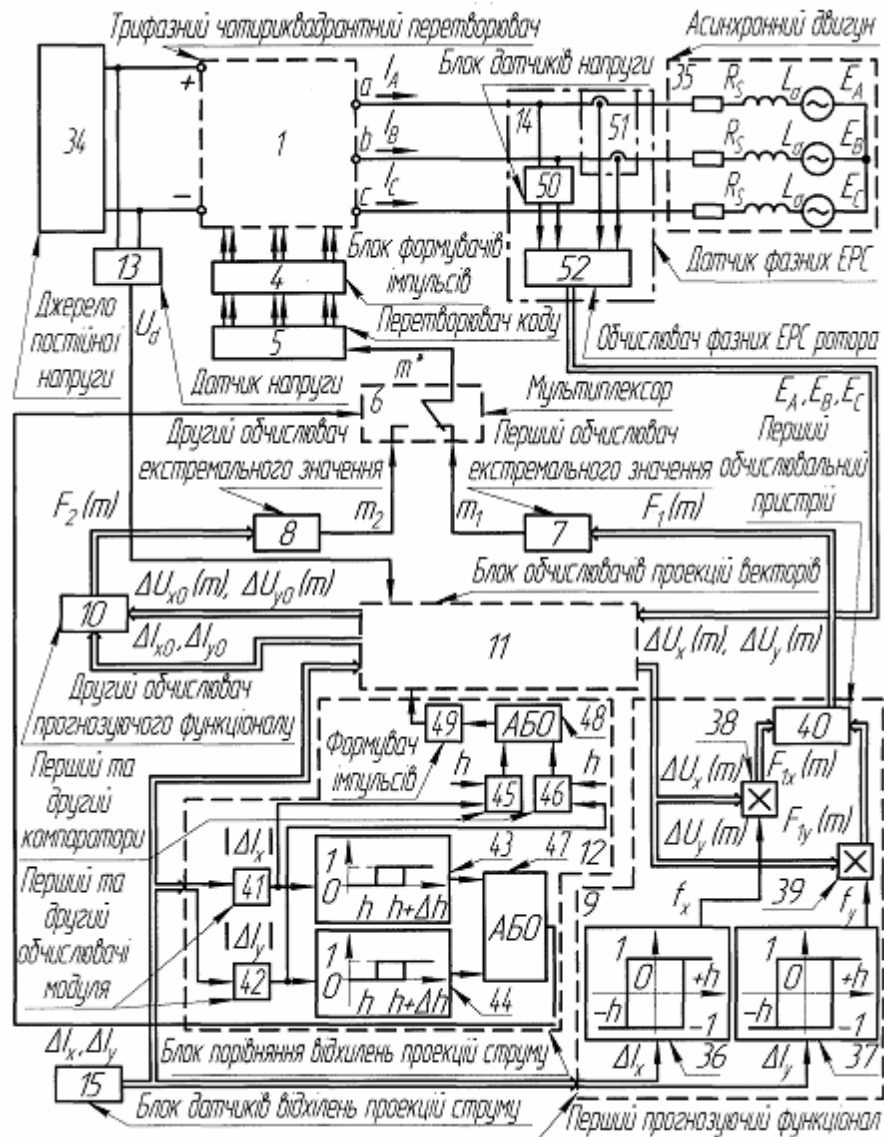
2. Патент на корисну модель №UA 30472U. Спосіб векторного регулювання струму на стороні змінного струму трифазного чотириквadrантного перетворювача / О.В. Волков, В.О. Волков - МПК (2006) H02P 7/00, H02P 21/00. Бюл.№4, 25.02.2008

3. Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. - Дніпропетровськ: НГУ, 2006. - 470с.



Фиг. 1





Фиг. 2

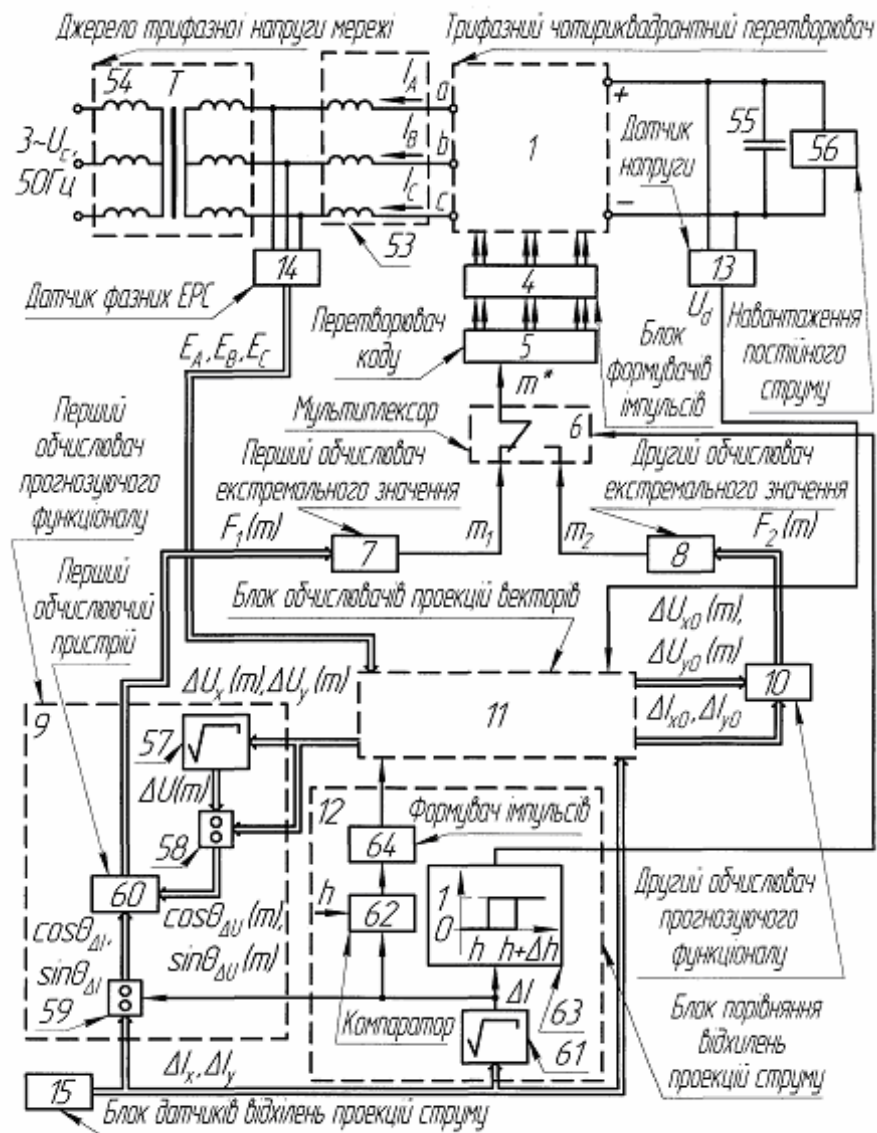


Fig. 3

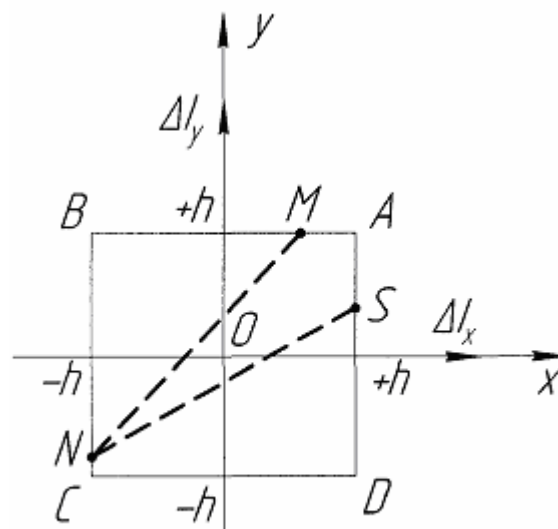


Fig. 4

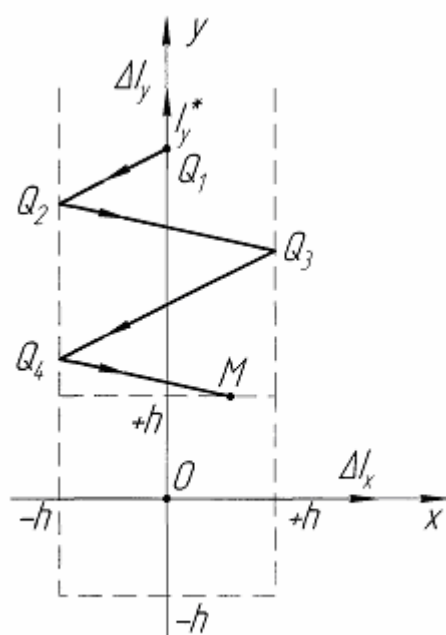


Fig. 5

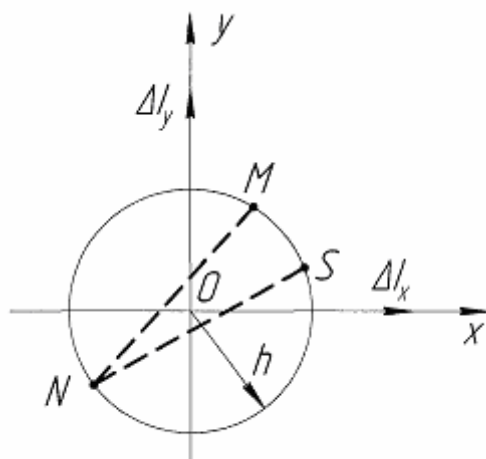


Fig. 6