



УКРАЇНА

(19) UA (11) 45720 (13) U
(51) МПК (2009)
H02P 7/00
H02P 21/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ КЕРУВАННЯ ТРИФАЗНИМ АКТИВНИМ ВИПРЯМЛЯЧЕМ СТРУМУ

1

(21) u200905117

(22) 25.05.2009

(24) 25.11.2009

(46) 25.11.2009, Бюл.№ 22, 2009 р.

(72) ВОЛКОВ ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ, КОСЕНКО ІГОР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

(73) ЗАПОРІЗЬКА ДЕРЖАВНА ІНЖЕНЕРНА АКАДЕМІЯ

(57) 1. Спосіб керування трифазним активним випрямлячем струму, який полягає в тому, що задають необхідне значення вихідного струму активного випрямляча, обчислюють необхідне значення активної проєкції і задають необхідне значення реактивної проєкції узагальненого вектора мережного струму відповідно на осі абсцис і ординат обертової ортогональної координатної системи, орієнтованої віссю абсцис за узагальненим вектором мережної напруги, контролюють фазні мережні напруги і струми, через які розраховують відповідні поточні узагальнені вектори мережних напруги і струму в їх проєкціях на осі абсцис і ординат нерухомої ортогональної координатної системи, орієнтованої віссю абсцис за геометричною віссю обмотки фази "а" силового трансформатора, від якої здійснюють відлік аргументів всіх узагальнених векторів, контролюють вихідний струм активного випрямляча, через який для всіх можливих комбінацій відкритих силових ключів активного випрямляча розраховують прогнозовані значення узагальненого вектора вхідного струму активного випрямляча в його проєкціях на осі нерухомої ортогональної координатної системи, контролюють поточні значення косинуса і синуса від аргументу узагальненого вектора мережної напруги, за допомогою яких зі зворотних координатних перетворень необхідних значень активної і реактивної проєкцій мережного струму визначають задане значення узагальненого вектора мережного струму в його проєкціях на осі абсцис і ординат нерухомої ортогональної координатної системи, обчислюють відхилення між необхідним і контрольованим значеннями вихідного струму активного випрямляча, а необхідне значення активної проєкції узагальненого вектора мережного струму обчислюють у вигляді суми першої складової, прямо пропорційної цьому відхиленню, і другої складової, прямо пропорційної інтегралу від дано-

2

го відхилення, який **відрізняється** тим, що обчислюють відхилення між проєкціями заданого і поточного узагальнених векторів мережного струму на відповідні осі абсцис і ординат нерухомої ортогональної координатної системи, розраховують у вигляді кореня квадратного із суми квадратів цих відхилень модуль узагальненого вектора відхилення мережного струму, обчислюють значення косинуса і синуса від аргументу узагальненого вектора відхилення мережного струму у вигляді відповідно відношень проєкцій цього вектора на осі абсцис і ординат нерухомої ортогональної координатної системи до модуля цього вектора, для всіх можливих комбінацій відкритих силових ключів активного випрямляча розраховують значення косинуса і синуса від аргументу прогнозованих узагальнених векторів вхідного струму активного випрямляча у вигляді відношень прогнозованих значень проєкцій цих векторів відповідно на осі абсцис і ординат нерухомої ортогональної координатної системи до кореня квадратного із суми квадратів цих проєкцій, обчислюють для всіх можливих комбінацій силових ключів активного випрямляча прогнозуючий функціонал у вигляді двох доданків, перший з яких дорівнює добутку косинусів від аргументів узагальненого вектора відхилення мережного струму та прогнозованого узагальненого вектора вхідного струму активного випрямляча, а інший доданок дорівнює добутку синусів від аргументів цих векторів, визначають найбільше значення зазначеного функціонала, причому нову комбінацію силових ключів активного випрямляча задають відповідною згаданому найбільшому значенню прогнозуючого функціонала.

2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що додатково контролюють електрорушійну силу (ЕРС) навантаження, підключеного на стороні постійного струму активного випрямляча, а необхідне значення активної проєкції узагальненого вектора мережного струму обчислюють у вигляді суми трьох складових, причому третя складова прямо пропорційна добутку контрольованих ЕРС і струму навантаження.

3. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що додатково порівнюють розраховане значення модуля узагальненого вектора відхилення мережного

(19) UA (11) 45720 (13) U

струму з припустимою уставкою, при цьому, якщо значення модуля узагальненого вектора відхилення мережного струму не перевищує зазначеної уставки, то примусово зберігають незмінною і відповідною попередньому моменту часу комбінацію відкритих силових ключів активного випрямляча.

4. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що додатково розраховують абсолютне значення від обчисленого відхилення між необхідним і контро-

льованим значеннями вихідного струму активного випрямляча та порівнюють його з припустимою уставкою, при цьому, якщо розраховане абсолютне значення цього відхилення не перевищує зазначеної уставки, то примусово зберігають незмінною і відповідною попередньому моменту часу комбінацію відкритих силових ключів активного випрямляча.

Корисна модель відноситься до галузі електротехніки і може бути використана для живлення навантажень постійного струму або автономних інверторів струму в частотно-регульованих електроприводах змінного струму.

Відомий спосіб керування трифазним активним випрямлячем струму [Шрейнер Р. Т. Релейное управление активными токовыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер, А. А. Ефимов, И. А. Мухаматшин // Электротехника. - 2005. - №9. - С.50-51], заснований на релейному пофазному керуванні мережними струмами активного випрямляча, у якому реалізуються ковзні режими регулювання мережних струмів (які задаються за допомогою поверхонь розриву через похідні завдання на фазні мережні струми для кожної фази).

При цьому відомому способу властива відносна складність технічної реалізації, обумовлена збільшеним числом контролюваних операцій (зокрема: контролю мережних фазних напруг та струмів, вхідних фазних напруг та вихідного струму активного випрямляча). Це вимагає, у свою чергу, встановлення збільшеної кількості давачів при технічній реалізації даного способу і призводить до здороження цієї реалізації. Іншим недоліком відомого способу є необхідність у ньому точного визначення параметрів мережного фільтра (індуктивності, активного опору). З врахуванням же того, що ряд параметрів мережного фільтра (наприклад, активний опір) у процесі роботи варіюється (від впливу струмового навантаження фільтра і температури навколишнього середовища), то невраховуване у відомому способі зазначене варіювання активного опору фільтра на практиці призводить до зниження якості (точності, швидкодії) керування трифазним активним випрямлячем струму.

Найбільш близьким за сукупністю ознак до способу, який заявляється, є спосіб керування трифазним активним випрямлячем струму [Шрейнер Р. Т. Прогнозирующее релейно-векторное управление активными токовыми преобразователями частоты в системах электроснабжения и электропривода/ Р. Т. Шрейнер, А. А. Ефимов, И. А. Мухаматшин // Труды международной тринадцатой научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока". - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. - С.138-139], який полягає в тому, що задають необхідне значення вихідного струму активного випрямляча, обчислюють необхідне значення активної проекції і задають необхідне

значення реактивної проекції узагальненого вектора мережного струму відповідно на осі абсцис і ординат обертової ортогональної координатної системи, орієнтованої віссю абсцис за узагальненим вектором мережної напруги, контролюють мережні фазні напруги і струми, вхідні фазні напруги активного випрямляча, через які розраховують відповідні поточні узагальнені вектори мережних напруг і струму, вхідної напруги активного випрямляча в їх проекціях на осі абсцис і ординат нерухої ортогональної координатної системи, орієнтованої віссю абсцис за геометричною віссю обмотки фази "а" силового трансформатора, від якої здійснюють відлік аргументів всіх узагальнених векторів, контролюють вихідний струм активного випрямляча, через який для всіх можливих комбінацій відкритих силових ключів активного випрямляча розраховують прогнозовані значення узагальненого вектора вхідного струму активного випрямляча в його проекціях на осі нерухої ортогональної координатної системи, контролюють поточні значення косинуса і синуса від аргументу узагальненого вектора мережної напруги, за допомогою яких зі зворотних координатних перетворень необхідних значень активної і реактивної проекцій мережного струму визначають задане значення узагальненого вектора мережного струму в його проекціях на осі абсцис і ординат нерухої ортогональної координатної системи, обчислюють для всіх можливих комбінацій силових ключів активного випрямляча прогнозовані значення узагальненого вектора мережного струму у вигляді суми чотирьох доданків, перший з яких дорівнює добутку першого розрахункового коефіцієнта на поточне значення узагальненого вектора мережної напруги, другий - добутку другого розрахункового коефіцієнта на поточне значення узагальненого вектора мережного струму, третій - добутку третього розрахункового коефіцієнта на поточне значення узагальненого вектора вхідної напруги активного випрямляча, четвертий - добутку четвертого розрахункового коефіцієнта на поточне значення вхідного струму активного випрямляча, обчислюють відхилення між необхідним і контрольованим значеннями вихідного струму активного випрямляча, а необхідне значення активної проекції узагальненого вектора мережного струму обчислюють у вигляді суми першої складової, прямо пропорційної цьому відхиленню, і другої складової, прямо пропорційної інтегралу від даного відхилення, при цьому знаходять відхилення між заданим і прогнозованими значеннями уза-

гальненого вектора мережного струму, порівнюють ці відхилення між собою і визначають найменше з зазначених відхилень, причому нову комбінацію силових ключів активного випрямляча задають відповідною згаданому найменшому з відхилень.

Недоліком відомого способу є відносна технічна складність, яка обумовлена збільшеним числом контрольованих у ньому параметрів: фазних мережних напруг і струмів, вхідних фазних напруг і вихідного струму активного випрямляча (що вимагає при його реалізації встановлення збільшеного числа давачів). Інший недолік відомого способу полягає у відносній складності здійснюваного обчислення чотирьох розрахункових коефіцієнтів, тому що їх значення варіюються не тільки від тривалості поточного інтервалу часу їх розрахунку, але і - від значень параметрів (індуктивності, ємності й активного опору) мережного фільтра. При цьому, у свою чергу, ряд значень параметрів мережного фільтра (наприклад, активний опір) не залишається незмінним, а варіюється в процесі роботи (через зміну струмового навантаження або температури навколишнього середовища), що знижує якість керування у відомому способі (який дані можливі зміни параметрів не враховує).

В основу корисної моделі поставлено завдання розробки способу керування трифазним активним випрямлячем струму, у якому за рахунок зменшення числа контрольованих операцій і застосування простих нових обчислювальних операцій (для знаходження поточного значення комбінації відкритих силових ключів активного випрямляча) виключається при технічній реалізації цього способу необхідність встановлення давачів вхідної фазної напруги активного випрямляча і забезпечується спрощення і здешевлення технічної реалізації способу при збереженні високої якості керування активним випрямлячем струму.

Для вирішення поставленого завдання в способі керування трифазним активним випрямлячем струму, який полягає в тім, що задають необхідне значення вихідного струму активного випрямляча, обчислюють необхідне значення активної проекції і задають необхідне значення реактивної проекції узагальненого вектора мережного струму відповідно на осі абсцис і ординат обертової ортогональної координатної системи, орієнтованої відносно абсцис за узагальненим вектором мережної напруги, контролюють фазні мережні напруги і струми, через які розраховують відповідні поточні узагальнені вектори мережних напруги і струму в їх проекціях на осі абсцис і ординат нерухомої ортогональної координатної системи, орієнтованої відносно абсцис за геометричною віссю обмотки фази "а" силового трансформатора, від якої здійснюють відлік аргументів всіх узагальнених векторів, контролюють вихідний струм активного випрямляча, через який для всіх можливих комбінацій відкритих силових ключів активного випрямляча розраховують прогнозовані значення узагальненого вектора вхідного струму активного випрямляча в його проекціях на осі нерухомої ортогональної координатної системи, контролюють поточні значення косинуса і синуса від аргументу узагальненого вектора мережної напруги, за допомогою яких зі зворотних

координатних перетворень необхідних значень активної і реактивної проекції мережного струму визначають задане значення узагальненого вектора мережного струму в його проекціях на осі абсцис і ординат нерухомої ортогональної координатної системи, обчислюють відхилення між необхідним і контрольованим значеннями вихідного струму активного випрямляча, а необхідне значення активної проекції узагальненого вектора мережного струму обчислюють у вигляді суми першої складової, прямо пропорційної цьому відхиленню, і другої складової, прямо пропорційної інтегралу від даного відхилення, у відповідності з корисною моделлю обчислюють відхилення між проекціями заданого і поточного узагальнених векторів мережного струму на відповідні осі абсцис і ординат нерухомої ортогональної координатної системи, розраховують у вигляді кореня квадратного із суми квадратів цих відхилень модуль узагальненого вектора відхилення мережного струму, обчислюють значення косинуса і синуса від аргументу узагальненого вектора відхилення мережного струму у вигляді відповідно відношень проекцій цього вектора на осі абсцис і ординат нерухомої ортогональної координатної системи до модуля цього вектора, для всіх можливих комбінацій відкритих силових ключів активного випрямляча розраховують значення косинуса і синуса від аргументу прогнозованих узагальнених векторів вхідного струму активного випрямляча у вигляді відношень прогнозованих значень проекцій цих векторів відповідно на осі абсцис і ординат нерухомої ортогональної координатної системи до кореня квадратного із суми квадратів цих проекцій, обчислюють для всіх можливих комбінацій силових ключів активного випрямляча прогнозує функціонал у вигляді двох доданків, перший з яких дорівнює добутку косинусів від аргументів узагальненого вектора відхилення мережного струму та прогнозованого узагальненого вектора вхідного струму активного випрямляча, а інший доданок дорівнює добутку синусів від аргументів цих векторів, визначають найбільше значення зазначеного функціонала, причому нову комбінацію силових ключів активного випрямляча задають відповідною згаданому найбільшому значенню прогнозує функціонала.

Для підвищення швидкодії і точності регулювання вихідного струму активного випрямляча додатково контролюють електрорушійну силу (ЕРС) навантаження, підключеного на стороні постійного струму активного випрямляча, а необхідне значення активної проекції узагальненого вектора мережного струму обчислюють у вигляді суми трьох складових, причому третя складова прямо пропорційна добутку контрольованих ЕРС і струму навантаження.

Для зменшення частоти перемикання силових ключів активного випрямляча в сталих режимах додатково порівнюють розраховане значення модуля узагальненого вектора відхилення мережного струму з припустимою уставкою, при цьому, якщо значення модуля узагальненого вектора відхилення мережного струму не перевищує зазначеної уставки, то примусово зберігають незмінною і від-

повідною попередньому моменту часу комбінацію відкритих силових ключів активного випрямляча.

Також для зниження частоти перемикачів силових ключів активного випрямляча в сталих режимах додатково розраховують абсолютне значення від обчисленого відхилення між необхідним і контрольованим значеннями вихідного струму активного випрямляча та порівнюють його з припустимою уставкою, при цьому, якщо розраховане абсолютне значення цього відхилення не перевищує зазначеної уставки, то примусово зберігають незмінною і відповідною попередньому моменту часу комбінацію відкритих силових ключів активного випрямляча.

За рахунок зменшення в запропонованому способі числа контрольованих операцій (що досягається застосуванням в ньому нових обчислювальних операцій для знаходження поточного значення комбінації відкритих силових ключів активного випрямляча) виключається необхідність встановлення давачів вхідної фазної напруги активного випрямляча. Це спрощує й здешевлює технічну реалізацію запропонованого способу. Крім цього, у запропонованому способі здійснюються більш прості (у порівнянні із здійснюваними в прототипі при знаходженні чотирьох розрахункових коефіцієнтів, що залежать від часу розрахунку і параметрів мережного фільтра) обчислення, які не вимагають, у свою чергу, розрахунків у функції часу чи параметрів мережного фільтра, які змінюються в експлуатації. При цьому забезпечуванні спрощення і здешевлення технічної реалізації запропонованого способу досягаються без зниження якості керування активним випрямлячем.

Суть корисної моделі пояснюється кресленнями: на фіг. 1 - функціональна схема варіанта пристрою, яка реалізує запропонований спосіб; на фіг. 2 - функціональна схема варіанта пристрою, яка реалізує запропонований спосіб при підвищенні швидкодії та точності регулювання вихідного струму активного випрямляча; на фіг. 3 й фіг. 4 - можливі варіанти пристроїв, які реалізують запропонований спосіб при зменшенні частоти перемикачів силових ключів активного випрямляча в сталих режимах.

Функціональна схема пристрою на фіг. 1 містить: трифазний активний випрямляч 1, виконаний на шести силових ключах 2-7 (показаних на фіг. 1 у вигляді тиристорів, що замикаються) і приєднаний своїм трифазним входом через послідовно підключені мережний трифазний LC-фільтр 8 і блок давачів струму 9 до трифазної мережі живлення 10 змінної напруги, а виходом активний випрямляч 1 пов'язаний через згладжуючий реактор 11 і давач струму 12 з навантаженням 13 (показаним в загальному випадку у вигляді послідовно з'єднаних ЕРС 14, резистора 15 та індуктивності 16).

Перший вхід пропорційно-інтегрального регулятора 17 з'єднаний з виходом задавача вихідного струму 18, а другий вхід - з виходом давача струму 12. Регулятор 17 містить перший 19 і другий 20 суматори, пропорційну 21 і інтегральну 22 ланки, входи яких з'єднані разом і підключені до виходу першого суматора 19, виходи пропорційної 21 і

інтегральної 22 ланок під'єднані відповідно до першого і другого входів суматора 20, вихід якого є виходом регулятора 17, а першим і другим входами регулятора 17 є відповідно перший і другий входи суматора 19.

Перший і другий входи координатного перетворювача 23 під'єднані відповідно до виходу пропорційно-інтегрального регулятора 17 і виходу задавача реактивної проекції мережного струму 24, а його третій і четвертий входи - пов'язані через послідовно підключені перший обчислювач гармонійних функцій 25, перший перетворювач фаз 26 і блок давачів напруги 27 із трифазною мережею живлення 10. Перший і другий виходи координатного перетворювача 23 під'єднані відповідно до першого і другого входів обчислювача відхилень 28, у якого третій і четвертий входи пов'язані через другий перетворювач фаз 29 з виходами блоку давачів струму 9, а перший і другий виходи обчислювача відхилень 28 пов'язані через другий обчислювач гармонійних функцій 30 з першим і другим входами обчислювача прогнозного функціонала 31.

Обчислювач проекцій вхідного струму 32 підключений входом до виходу датчика струму 12 і пов'язаний своїми першим і другим виходами через третій обчислювач гармонійних функцій 33 з третім і четвертим входами обчислювача прогнозного функціонала 31, вихід якого пов'язаний через послідовно підключені блок визначення комбінації 34 та систему керування випрямлячем 35 з керуючими входами силових ключів 2-7 активного випрямляча 1.

При цьому перший 25, другий 30 та третій 33 обчислювачі гармонійних функцій виконані між собою ідентично і складаються (як показано на прикладі обчислювача 30) з ділильних блоків 36, 37 й квадратора 38, причому перший вхід ділильного блоку 36 з'єднаний з першим входом квадратора 38 і є першим входом обчислювача 30, перший вхід ділильного блоку 37 з'єднаний із другим входом квадратора 38 і є другим входом обчислювача 30, а виходи ділильних блоків 36 і 37 є відповідно першим і другим виходами обчислювачів 25, 30 і 33, при цьому вихід квадратора 38 приєднаний до других входів ділильних блоків 36, 37 і є третім входом обчислювачів 25, 30 і 33.

Обчислювач прогнозного функціонала 31 містить множинні блоки 39 і 40, підключені своїми виходами до першого і другого входів суматора 41, вихід якого є виходом обчислювача 31, перший та другий входи множного блоку 39 є відповідно першим і третім входами обчислювача 31, а перший і другий входи множного блоку 40 є відповідно другим і четвертим входами обчислювача прогнозного функціонала 31.

Функціональна схема пристрою на фіг. 2, яка реалізує запропонований спосіб керування при підвищенні швидкодії та точності регулювання вихідного струму активного випрямляча, містить додатково (у порівнянні з пристроєм, представленим на фіг. 1) давач ЕРС 42, множинний блок 43 та суматор 44, причому давач ЕРС 42 підключений своїми входами до ЕРС 14 навантаження 13, а виходом - до першого входу множного блоку 43, у

якого другий вхід підключений до виходу давача струму 12, а вихід - до першого входу суматора 44, під'єднаного своїм другим входом до виходу пропорційно-інтегрального регулятора 17, а виходом - до першого входу координатного перетворювача 23. При цьому на фіг. 2 показаний можливий варіант виконання силових ключів 2-7 активного випрямляча 1 на IGBT-транзисторах (зустрічно паралельно яким і послідовно з кожним із транзисторів 45 підключені діоди 46 і 47).

Функціональна схема пристрою на фіг. 3, яка реалізує запропонований спосіб при зменшенні частоти перемикання силових ключів активного випрямляча в сталих режимах, містить додатково (у порівнянні з пристроєм, представленим на фіг. 1) регістр 48 та компаратор 49, причому регістр 48 приєднаний між виходом блоку визначення комбінації 34 й входом системи керування випрямлячем 35, а керуючий вхід регістра 48 пов'язаний через компаратор 49 із третім виходом другого обчислювача гармонійних функцій 30.

Функціональна схема пристрою на фіг. 4, що реалізує запропонований спосіб при другому можливому варіанті зменшення частоти перемикання силових ключів активного випрямляча в сталих режимах, містить додатково (у порівнянні з пристроєм, представленим на фіг. 1) регістр 48, компаратор 49 і обчислювач модуля 50, причому регістр 48 під'єднаний між виходом блоку визначення комбінації 34 і входом системи керування випрямлячем 35, а керуючий вхід регістра 48 пов'язаний через послідовно з'єднані компаратор 49 та обчислювач модуля 50 з виходом суматора 19 у регуляторі 17.

Запропонований спосіб керування трифазним активним випрямлячем струму здійснюється (розглянемо на прикладі пристрою, показаного на фіг. 1) наступним чином. За допомогою задавача вихідного струму 18 та задавача реактивної проекції 24 задають для активного випрямляча 1 необхідні значення відповідно вихідного струму I_d^* і реактивної проекції $I_{\Sigma y}^*$ (на вісь ординат "y" обертової ортогональної координатної системи "x - y", орієнтованої віссю абсцис "x" за узагальненим вектором мережної напруги \bar{U}) узагальненого вектора мережного струму \bar{I}_{Σ} .

Контролюють давачем струму 12 вихідний струм активного випрямляча 1 і обчислюють за допомогою суматора 19 відхилення ΔI_d між необхідним I_d^* та контрольованим I_d значеннями вихідного струму активного випрямляча 1 у вигляді:

$$\Delta I_d = I_d^* - I_d. \quad (1)$$

Необхідне значення активної проекції $I_{\Sigma x}^*$ уза-

гальненого вектора мережного струму \bar{I}_{Σ} обчислюють на виході суматора 20 (що входить до складу регулятора 17) у вигляді суми першої складової $I_{\Sigma x1}^*$ (яка надходить з виходу пропорційної ланки 21 і прямо пропорційної відхиленню ΔI_d вихідного струму випрямляча) та другої складової $I_{\Sigma x2}^*$ (яка надходить з виходу інтегральної ланки 22 і прямо пропорційної інтегралу від даного відхилення струму ΔI_d).

$$\left. \begin{aligned} I_{\Sigma x}^* &= I_{\Sigma x1}^* + I_{\Sigma x2}^*, \\ I_{\Sigma x1}^* &= K \cdot \Delta I_d, \\ I_{\Sigma x2}^* &= \frac{1}{T} \int_0^t \Delta I_d dt \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де K і $1/T$ - відповідні коефіцієнти пропорційності; T - стала часу інтегральної ланки 22. За рахунок підбору певних значень коефіцієнта K та сталої часу T пропорційно-інтегрального регулятора 17 здійснюється настроювання значень перерегулювання й часу регулювання для вихідного струму I_d активного випрямляча при збереженні (за рахунок наявності інтегральної складової у вихідному сигналі регулятора 17) астатичного (без помилки) регулювання зазначеного струму ($I_d = I_d^*$) у сталих режимах.

За допомогою блоку давачів напруги 27 та блоку давачів струму 9 контролюють відповідно фазні мережні напруги U_A, U_B, U_C і струми $I_{\Sigma A}, I_{\Sigma B}, I_{\Sigma C}$. Через них розраховують за допомогою перетворювачів фаз 26 і 29 відповідно поточні узагаль-

нені вектори мережної напруги \bar{U} і струму \bar{I}_{Σ} в їх проекціях U_{α}, U_{β} та $I_{\Sigma \alpha}, I_{\Sigma \beta}$ на осі абсцис "α" і ординат "β" нерухомої ортогональної координатної системи "α - β" (орієнтованої віссю абсцис "α" за геометричною віссю обмотки фази "а" силового трансформатора трифазної мережі живлення 10):

$$\left. \begin{aligned} \bar{U} &= U_{\alpha} + jU_{\beta} \\ U_{\alpha} &= U_A, U_{\beta} = (U_B - U_C)/\sqrt{3}; \\ \bar{I}_{\Sigma} &= I_{\Sigma \alpha} + jI_{\Sigma \beta}, \\ I_{\Sigma \alpha} &= I_{\Sigma A}, I_{\Sigma \beta} = (I_{\Sigma B} - I_{\Sigma C})/\sqrt{3}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

При цьому від зазначеної осі "α" здійснюють відлік аргументів всіх узагальнених векторів. За допомогою блоків давачів напруги 27 та струму 9 достатньо контролювати лише по два фазних значення мережних напруг (наприклад, U_A та U_B) і мережних струмів (наприклад, $I_{\Sigma A}$ та $I_{\Sigma B}$), розраховуючи при цьому проекції U_{α}, U_{β} й $I_{\Sigma \alpha}, I_{\Sigma \beta}$ узагальнених векторів мережних напруги і струму з наступних співвідношень [Пивняк Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г. Г. Пивняк, А. В. Волков / - Днепропетровск: НГУ, 2006. - С. 161:

$$\left. \begin{aligned} U_{\alpha} &= U_A, U_{\beta} = (U_A + 2U_B)/\sqrt{3}; \\ I_{\Sigma \alpha} &= I_{\Sigma A}, I_{\Sigma \beta} = (I_{\Sigma A} + 2I_{\Sigma B})/\sqrt{3}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

За допомогою першого обчислювача гармонійних функцій 25 (виконаного аналогічно обчислювачу 30 у вигляді двох ділильних блоків 36, 37 та квадратора 38) контролюють поточні значення косинуса і синуса від аргументу θ_U узагальненого

вектора мережної напруги \bar{U} , обчислюючи їх через проекції U_{α}, U_{β} зазначеного вектора зі співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_U &= U_\alpha / U, \\ \sin \theta_U &= U_\beta / U, \\ U &= \sqrt{U_\alpha^2 + U_\beta^2} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

$U =$

де U - модуль узагальненого вектора мережної напруги.

Через зазначені значення гармонійних функцій $\cos \theta_U$, $\sin \theta_U$ зі зворотних координатних перетворень [Пивняк Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г. Г. Пивняк, А. В. Волков / . - Днепропетровск: НГУ, 2006. - С.71] необхідних значень активної $I_{\Sigma x}^*$ та реактивної $I_{\Sigma y}^*$ проєкцій мережного струму визначають задане значення узагальненого вектора мережного стру-

му \bar{I}_Σ^* в його проєкціях $I_{\Sigma \alpha}^*$, $I_{\Sigma \beta}^*$ на осі абсцис "α" і ординат "β" нерухомої ортогональної координатної системи "α-β":

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_\Sigma^* &= I_{\Sigma \alpha}^* + j I_{\Sigma \beta}^*, \\ I_{\Sigma \alpha}^* &= I_{\Sigma x}^* \cos \theta_U - I_{\Sigma y}^* \sin \theta_U, \\ I_{\Sigma \beta}^* &= I_{\Sigma x}^* \sin \theta_U + I_{\Sigma y}^* \cos \theta_U. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

За допомогою обчислювача відхилень 28 визначають відхилення $\Delta I_{\Sigma \alpha}$, $\Delta I_{\Sigma \beta}$ між відповідними проєкціями $I_{\Sigma \alpha}^*$, $I_{\Sigma \beta}^*$ та $I_{\Sigma \alpha}$, $I_{\Sigma \beta}$ заданого \bar{I}_Σ^* і поточного \bar{I}_Σ узагальнених векторів мережного струму:

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_{\Sigma \alpha} &= I_{\Sigma \alpha}^* - I_{\Sigma \alpha}, \\ \Delta I_{\Sigma \beta} &= I_{\Sigma \beta}^* - I_{\Sigma \beta} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

на осі абсцис "α" і ординат "β" нерухомої ортогональної координатної системи "α-β".

В обчислювачі 30 за допомогою квадратора 38 розраховують у вигляді кореня квадратного із суми квадратів від відхилень $\Delta I_{\Sigma \alpha}$, $\Delta I_{\Sigma \beta}$, модуль ΔI_Σ уза-

гальненого вектора відхилення мережного струму \bar{I}_Σ :

$$\Delta I_\Sigma = \sqrt{\Delta I_{\Sigma \alpha}^2 + \Delta I_{\Sigma \beta}^2}. \quad (8)$$

За допомогою ділильних блоків 36 та 37 обчислювача 30 розраховують значення косинуса й синуса від аргументу $\theta_{\Delta I}$ узагальненого вектора

відхилення мережного струму ΔI_Σ у вигляді відповідно відношень проєкцій $\Delta I_{\Sigma \alpha}$, $\Delta I_{\Sigma \beta}$ цього вектора на осі абсцис "α" і ординат "β" нерухомої ортогональної координатної системи "α-β" до модуля ΔI_Σ цього вектора:

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_{\Delta I} &= \Delta I_{\Sigma \alpha} / \Delta I_\Sigma, \\ \sin \theta_{\Delta I} &= \Delta I_{\Sigma \beta} / \Delta I_\Sigma. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Через контрольоване значення вихідного струму I_d активного випрямляча 1 розраховують за допомогою обчислювача проєкцій вхідного струму 32 для всіх можливих комбінацій $m=1,2,\dots,6$ відкритих силових ключів активного випрямляча 1 (показаних знаком "+" в табл.1) прогнозовані значення

узагальненого вектора вхідного струму $\bar{I}(m)$ активного випрямляча в його проєкціях $I_\alpha(m)$, $I_\beta(m)$ на осі нерухомої ортогональної координатної системи "α-β".

$$\left. \begin{aligned} I_\alpha(m) &= \frac{2}{\sqrt{3}} I_d \cdot \cos \theta_1(m), \\ I_\beta(m) &= \frac{2}{\sqrt{3}} I_d \cdot \sin \theta_1(m), \\ \theta_1(m) &= \frac{\pi}{6} + (m-1) \frac{\pi}{3} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

де $\theta_1(m)$ - значення аргументу прогнозованого

узагальненого вектора вхідного струму $\bar{I}(m)$, $\bar{I}(t)$ активного випрямляча.

Таблиця 1

Комбінації відкритих (показані знаком "+") силових ключів активного випрямляча 1

Номер комбінації m	Відкриті силові ключі випрямляча					
	2	3	4	5	6	7
1			+	+		
2			+		+	
3	+				+	
4	+					+
5		+				+
6		+		+		

За допомогою обчислювача гармонійних функцій 33 для всіх можливих комбінацій ($m=1,2,\dots,6$ з табл. 1) відкритих силових ключів активного випрямляча 1 розраховують значення косинуса і синуса від аргументу $\theta_1(m)$ прогнозованих узагальнених векторів вхідного струму $\bar{I}(m)$ активного

випрямляча у вигляді відношень прогнозованих значень проєкцій $I_\alpha(m)$, $I_\beta(m)$ цих векторів відповідно на осі абсцис "α" і ординат "β" нерухомої ортогональної координатної системи "α-β" до кореня квадратного із суми квадратів цих проєкцій:

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_I(m) &= I_\alpha(m) / \sqrt{I_\alpha^2(m) + I_\beta^2(m)}, \\ \sin \theta_I(m) &= I_\beta(m) / \sqrt{I_\alpha^2(m) + I_\beta^2(m)}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

За допомогою обчислювача 31 обчислюють для всіх можливих комбінацій ($m=1,2,\dots,6$ з табл. 1) відкритих силових ключів активного випрямляча 1 прогнозуючий функціонал $F(m)$ у вигляді двох доданків, перший з яких дорівнює добутку косинусів від аргументів $\theta_{\Delta I}$ та $\theta_I(m)$ відповідно узагальнено-

го вектора відхилення мережного струму ΔI_Σ і прогнозованого узагальненого вектора вхідного струму $\dot{I}(m)$ активного випрямляча, а другий доданок дорівнює добутку синусів від аргументів цих векторів:

$$F(m) = \cos \theta_{\Delta I} \cdot \cos \theta_I(m) + \sin \theta_{\Delta I} \cdot \sin \theta_I(m). \quad (12)$$

За допомогою блоку визначення комбінації 34 знаходять найбільше значення $F^\circ(m^*)$ згаданого функціонала:

$$F^\circ(m^*) = \max\{F(m), \text{при } m = 1, 2, \dots, 6\} \quad (13)$$

і значення комбінації m^* , при якому воно досягається. За допомогою системи керування випрямлячем 35 (яка забезпечує відповідно до визначеного значення комбінації m^* та згідно табл. 1 формування відпиряючих імпульсів для відповідних силових ключів 2-7 активного випрямляча) задають в якості нової згадану комбінацію m^* відкритих силових ключів активного випрямляча 1.

Попередньо проведеними дослідженнями встановлено, що при довільній m -ій комбінації відкритих силових ключів активного випрямляча про-

гнозоване змінювання ΔI_Σ узагальненого вектора мережного струму

$$\Delta I_\Sigma(m) = \bar{I}_\Sigma(m) - \bar{I}_\Sigma(0) \quad (14)$$

на будь-якому міжкомутаційному інтервалі силових ключів активного випрямляча колінеарно (паралельно та співпадає за напрямком) із прогнозованим (при відповідній m -ій комбінації силових ключів активного випрямляча) значенням узагаль-

неного вектора вхідного струму $\dot{I}(m)$ активного випрямляча:

$$\Delta I_\Sigma(m) \parallel \dot{I}(m) \quad (15)$$

де $\bar{I}_\Sigma(0)$ і $\bar{I}_\Sigma(m)$ - відповідно початкове та прогнозоване поточне (при m -ій комбінації силових ключів активного випрямляча) значення узагаль-

неного вектора мережного струму \bar{I}_Σ на розглянутому міжкомутаційному інтервалі силових ключів активного випрямляча.

З врахуванням цього найбільш швидкодіюче і точне відпрацювання виниклих згідно (7) відхилень проєкцій $\Delta I_{\Sigma\alpha}$, $\Delta I_{\Sigma\beta}$ мережного струму (які характеризуються узагальненим вектором відхилення ме-

режного струму ΔI_Σ) відбувається за умови найкращого збігу між собою за напрямком згаданого

узагальненого вектора відхилення мережного

струму ΔI_Σ та прогнозованого узагальненого век-

тора змінювання $\Delta I_\Sigma(m)$ узагальненого вектора мережного струму. Або, з врахуванням (15), - при найкращому збігу між собою за напрямком узагальненого вектора відхилення мережного струму

ΔI_Σ та прогнозованого значення (при m -ій комбінації силових ключів активного випрямляча) уза-

гальненого вектора вхідного струму $\dot{I}(m)$ цього випрямляча.

Оскільки співвідношення (12) для обчислення прогнозуючого функціонала $F(m)$ представляє собою косинус різниці аргументів $\theta_{\Delta I}$ і $\theta_I(m)$ узагаль-

нених векторів відхилення мережного струму ΔI_Σ та прогнозованого значення узагальненого векто-

ра вхідного струму $\dot{I}(m)$ активного випрямляча 1:

$$F(m) = \cos[\theta_{\Delta I} - \theta_I(m)] \quad (16)$$

то визначене блоком 34 значення нової комбінації m^* відкритих силових ключів активного випрямляча відповідає з врахуванням (13) найменший (за абсолютною величиною) різниці аргументів зазначених узагальнених векторів:

$$|\theta_{\Delta I} - \theta_I(m^*)| = \min. \quad (17)$$

Таким чином, через систему керування випрямлячем 35 задають нову комбінацію m^* зазначених силових ключів активного випрямляча 1 такою, яка забезпечує найкращий (з найменшим можливим відхиленням) збіг за напрямком для узагаль-

нених векторів відхилення мережного струму ΔI_Σ

та змінювання $\Delta I_\Sigma(m^*)$ узагальненого вектора мережного струму.

При функціонуванні запропонованого способу в динамічних режимах (які характеризуються збі-

льшеними відхиленнями ΔI_d , $\Delta I_{\Sigma\alpha}$, $\Delta I_{\Sigma\beta}$ між необхідним I_d^* та контрольованим I_d значеннями вихідного струму активного випрямляча або між заданими $I_{\Sigma\alpha}$, $I_{\Sigma\beta}$ та поточними $I_{\Sigma\alpha}$, $I_{\Sigma\beta}$ проєкціями узагальненого вектора мережного струму) - забезпечується швидкодіюче відпрацювання зазначених відхилень струму, що приводить по закінченні їх відпрацювання до наближення даних відхилень до нуля: ΔI_d , $\Delta I_{\Sigma\alpha}$, $\Delta I_{\Sigma\beta} \approx 0$. У сталих же режимах роботи (які наступили по закінченні відпрацювання згаданих вище відхилень) підтримуються на необхідних для них рівнях (відповідно I_d^* та $I_{\Sigma y}^*$) вихідний струм I_d активного випрямляча та поточне значення реактивної проєкції $I_{\Sigma y}$ (на вісь ординат "y" обертаної ортогональної координатної системи "x - y")

узагальненого вектора мережного струму ΔI_Σ :

$$\left. \begin{aligned} I_d &\approx I_d^*, \\ I_{\Sigma y} &\approx I_{\Sigma y}^* \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Таким чином, при розглянутому керуванні в сталих режимах роботи в навантаження 13 задається необхідне значення I_d^* , струму й одночасно з цим підтримується необхідне значення $I_{\Sigma y}^*$, реактивної проекції мережного струму (за рахунок останнього здійснюється можливість компенсації за допомогою активного випрямляча 1 реактивної потужності сусідніх електроспоживачів, підключених до тієї ж трифазної мережі 10). Очевидно, при заданні необхідного значення реактивної проекції $I_{\Sigma y}^*$ узагальненого вектора мережного струму рівним нулю, запропонованим способом підтримується чисто активний характер мережного струму активного випрямляча 1 (з мережним коефіцієнтом потужності близьким до одиниці).

При функціонуванні розглянутого способу (реалізованого в пристрої на фіг. 1) немає необхідності в встановленні блоку давачів фазних напруг активного випрямляча й у визначенні параметрів (індуктивності, ємності, активного опору) фільтра (як це необхідно в прототипі), що спрощує й здешевлює технічну реалізацію запропонованого способу при збереженні високої якості керування активним випрямлячем.

Спосіб керування трифазним активним випрямлячем струму, який дозволяє підвищити швидкість та точність регулювання вихідного струму активного випрямляча і реалізований в пристрої на фіг. 2, здійснюється аналогічно описаному раніше (на прикладі пристрою на фіг. 1) з наступними відмінностями. А саме, за допомогою давача ЕРС 42 контролюють електрорушійну силу E_n навантаження 13, підключеного на стороні постійного струму активного випрямляча 1.

За допомогою суматора 44 необхідне значення $I_{\Sigma x}^{**}$ активної проекції узагальненого вектора мережного струму обчислюють у вигляді суми трьох складових:

$$I_{\Sigma x}^{**} = I_{\Sigma x1}^* + I_{\Sigma x2}^* + I_{\Sigma x3}^*, \quad (19)$$

де дві перші ($I_{\Sigma x1}^*$ та $I_{\Sigma x2}^*$) з них визначаються з раніше розглянутого співвідношення (2), а третя складова $I_{\Sigma x3}^*$ прямо пропорційна (з коефіцієнтом С) добутку контрольованих ЕРС E_n та струму I_d навантаження 13:

$$I_{\Sigma x3}^* = C \cdot E_n \cdot I_d. \quad (20)$$

Запишемо (з врахуванням нехтування активними втратами потужності в мережному фільтрі 8 та активному випрямлячі 1, які на практиці достатньо малі) спрощене співвідношення для балансу активних потужностей на вході і виході активного випрямляча:

$$\frac{3}{2} U_{\Sigma} \cdot I_{\Sigma x} \approx E_n \cdot I_d + R_n \cdot I_d^2, \quad (21)$$

де U_{Σ} - модуль узагальненого вектора мережної напруги; $I_{\Sigma x}$ - активна проекція узагальненого вектора мережного струму (на вісь абсцис "x" обертаної ортогональної координатної системи "x - y", зв'язаної віссю абсцис з узагальненим вектором

мережної напруги $\overline{U_{\Sigma}}$); R_n - активний опір резистора 15 навантаження 13.

З останнього співвідношення визначають складову $I_{\Sigma x3}$ активної проекції $I_{\Sigma x}$ мережного струму, яка викликана безпосередньо впливом тільки ЕРС E_n навантаження:

$$I_{\Sigma x3} \approx \frac{2}{3U_{\Sigma}} \cdot E_n \cdot I_d. \quad (22)$$

Вибравши в (20) значення сталої С рівної:

$$C = \frac{2}{3U_{\Sigma}}, \quad (23)$$

одержимо, що обчислена на виході множного

блоку 43 третя складова $I_{\Sigma x3}^*$ заданого значення

активної проекції $I_{\Sigma x}^{**}$ мережного струму дорівнює

складовій $I_{\Sigma x3}^*$ активної проекції мережного струму із (22), викликаний безпосередньо впливом тільки ЕРС E_n навантаження:

$$I_{\Sigma x3}^* = I_{\Sigma x3}. \quad (24)$$

З врахуванням останнього, при можливих змінах значень ЕРС E_n , що відбуваються, в навантаженні 13 автоматично (від впливу вихідного сигналу

$I_{\Sigma x3}^*$, множного блоку 43 через суматор 44 на перший з входів координатного перетворювача 23) здійснюється одночасне з цим і відповідне даній зміні ЕРС E_n навантаження змінювання на величину $I_{\Sigma x3}$ із (22) задання активної проекції мереж-

ного струму $I_{\Sigma x3}^*$. За рахунок цього не потрібне додавання зазначеної складової $I_{\Sigma x3}$ активної проекції мережного струму (обумовленої безпосередньо впливом зміни ЕРС E_n навантаження) з виходу пропорційно-інтегрального регулятора 17. У результаті зазначеного функціонування запропонованого способу при розглянутій зміні ЕРС E_n навантаження 13 на виході суматора 19 пропорційно-інтегрального регулятора 17 практично не виникає відхилення ΔI_d (викликаного впливом зміни зазначеної ЕРС E_n навантаження) між заданим I_d^* і фактичним I_d значеннями вихідного струму активного випрямляча, чим і забезпечується підвищення швидкодії і точності регулювання вихідного струму активного випрямляча в запропонованому способі, який ілюструється пристроєм на фіг. 2.

У відомих способах або способі, що заявляється і який ілюструється пристроєм на фіг. 1, при зміні значення ЕРС E_n навантаження згадана зміна на величину $I_{\Sigma x3}$ із (22) поточної активної проекції мережного струму $I_{\Sigma x}$ відбувається в результаті відповідної зміни на цю величину вихідного сигналу пропорційно-інтегрального регулятора 17, що неминуче супроводжується виникненням відхилення (помилки) ΔI_d на виході суматора 19 цього регулятора 17. Причому, приймаючи до уваги наявність інтегральної складової у вихідному сигналі цього регулятора, зміна вихідного сигналу регулятора 17 на згадану величину $I_{\Sigma x3}$ відбувається не миттєво, а з деякою тимчасовою затримкою (обумовленою сталою часу інтегрування Т інтеграль-

ної ланки 22, яка входить до складу регулятора 17). Зазначена часова затримка, у свою чергу, приводить на практиці до зменшення точності (зокрема, збільшенню динамічної помилки ΔI_d) та зниженню швидкодії регулювання вихідного струму I_d активного випрямляча при розглянутій зміні ЕРС E_n навантаження 13.

Способи керування трифазним активним випрямлячем струму, які дозволяють зменшити частоту перемикання силових ключів активного випрямляча в сталих режимах і реалізовані в пристроях показаних на фіг. 3 та фіг. 4, функціонують аналогічно описаному раніше (на прикладі пристрою на фіг. 1) з наступними відмінностями. Зокрема, у пристрої на фіг. 3 порівнюють за допомогою компаратора 49 розраховане на третьому виході обчислювача гармонійних функцій 30 значення модуля ΔI_Σ узагальненого вектора відхилення

мережного струму ΔI_Σ (або на фіг. 4 - обчислене на виході обчислювача модуля 50 абсолютне значення $|\Delta I_d|$ відхилення ΔI_d між необхідним I_d^* і контрольованим I_d значеннями вихідного струму активного випрямляча) з припустимою уставкою ΔI^* цього компаратора 49. Якщо значення модуля ΔI_Σ узагальненого вектора відхилення струму (в пристрої на фіг. 3) або абсолютне значення відхилення $|\Delta I_d|$ між необхідним I_d^* і контрольованим I_d значеннями вихідного струму активного випрямляча (в пристрої на фіг. 4) не перевищують зазначеної уставки:

$$\Delta I_\Sigma < \Delta I^* \text{ або } |\Delta I_d| < \Delta I^*, \quad (25)$$

то в пристроях на фіг. 3 та фіг. 4 з виходу компаратора 49 надходить на керуючий вхід регістра 48 сигнал лог. "0", який забороняє зміну вихідного сигналу m^{**} регістра 48 (підтримуючи його рівним своєму попередньому значенню m^{**}). Таким чином, при виконанні умов з (25) у способах, реалі-

зованих в пристроях на фіг. 3 та фіг. 4, примусово зберігають незміною і відповідною попередньому моменту часу комбінацію m^{**} відкритих силових ключів 2-7 активного випрямляча 1.

При невиконанні в пристроях на фіг. 3 та фіг. 4 умов з (25) з виходу компаратора 49 надходить сигнал лог. "1" на керуючий вхід регістра 48 (який дозволяє змінюватись вихідному сигналу регістра 48 на те значення m^* , яке присутнє у даний момент часу на виході блоку визначення комбінації 34). При цьому (аналогічно раніше розглянутому при описі способу, реалізованого в пристрої на фіг. 1) у способі ілюстрованому пристроями на фіг. 3 та фіг. 4, задають (через систему керування випрямлячем 35) нову комбінацію

$$m^* = m^* \quad (26)$$

силових ключів 2-7 активного випрямляча 1, яка відповідає найбільшому значенню $F^*(m^*)$ розрахованого прогнозуючого функціонала $F(m)$ з (13).

При цьому зі збільшенням значення уставки ΔI^* компаратора 49 відбувається більш тривала за часом заборона змінювання на нові значення комбінацій силових ключів 2-7 активного випрямляча 1, що приводить, у свою чергу, в запропонованому способі (ілюстрованому пристроями на фіг. 3 та фіг. 4) до зменшення частоти перемикання силових ключів та зниження втрат потужності у активному випрямлячі при сталих режимах. Крім цього, зменшення частота перемикання силових ключів активного випрямляча розширює область застосування запропонованого способу (ілюстрованого пристроями, приведеними на фіг. 3 та фіг. 4) на високовольтні активні випрямлячі струму великої потужності, оскільки в існуючих високовольтних і потужних силових ключах (наприклад, типу GTO, IGCT, IGBT) частота перемикання помітно обмежена (складає менше 500-1000 Гц).

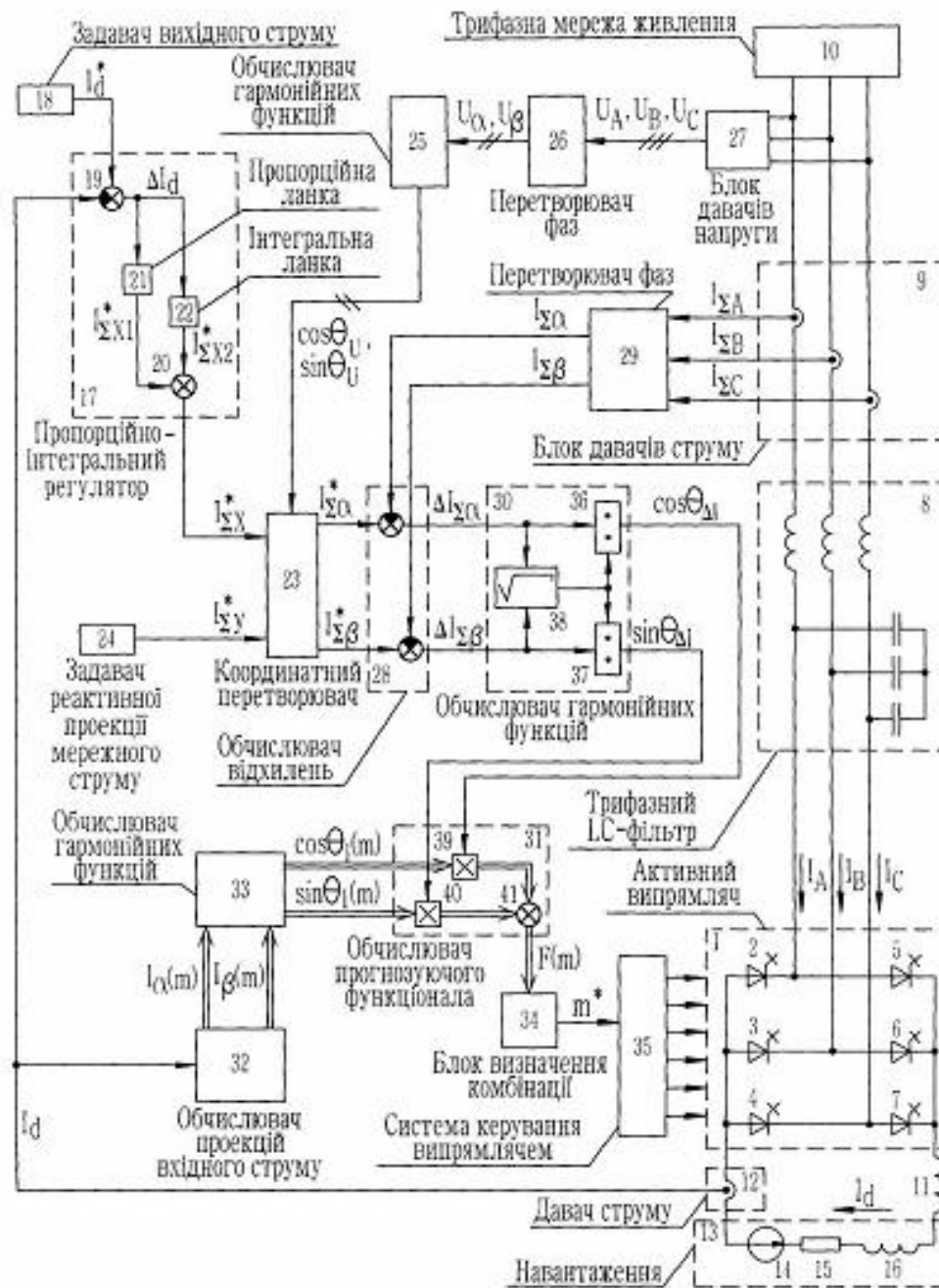


Fig. 1

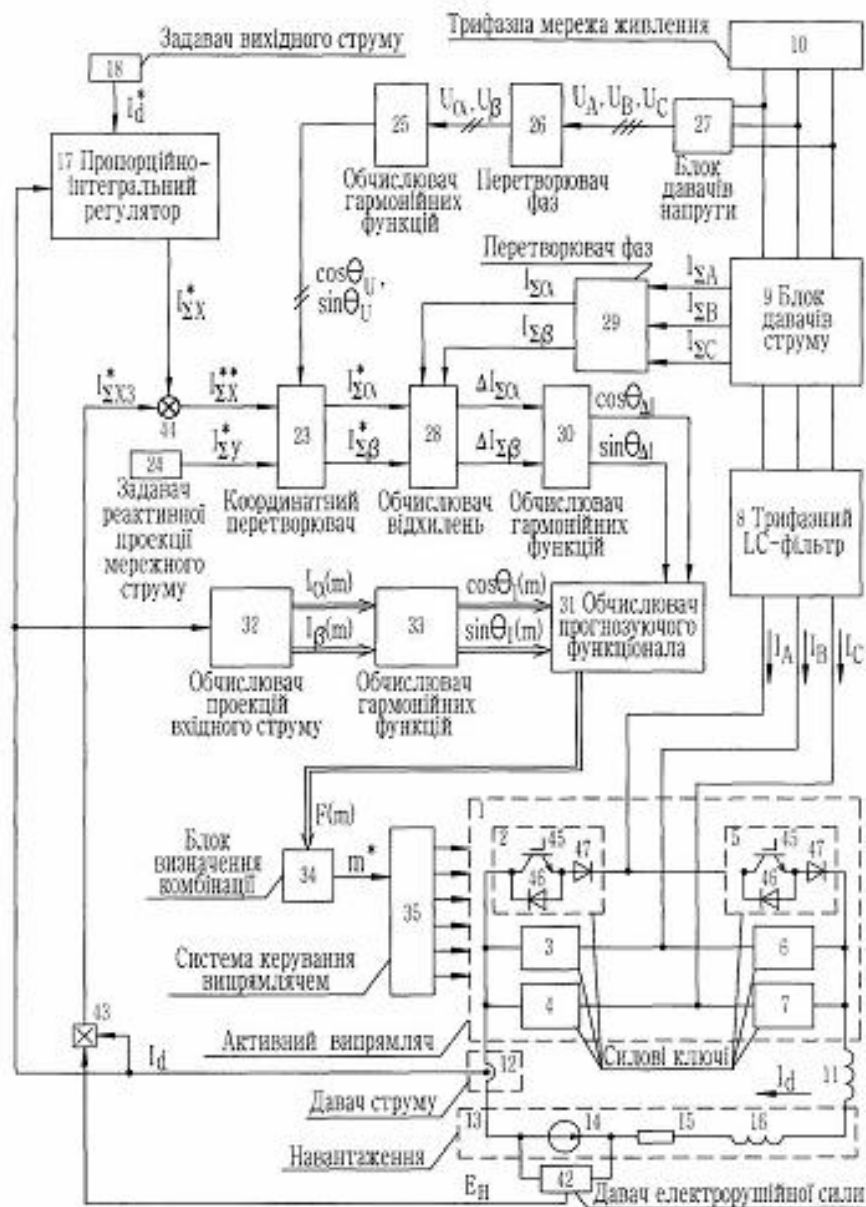


Fig. 2

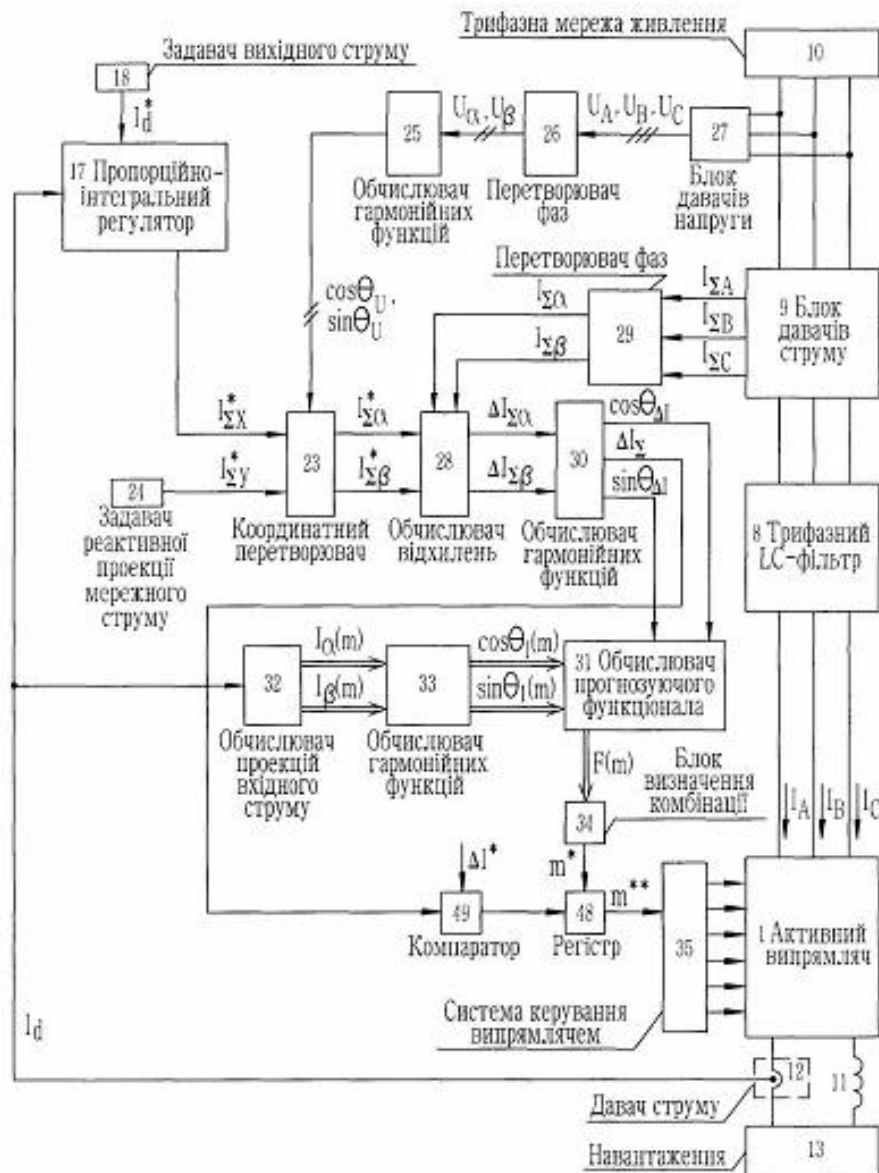
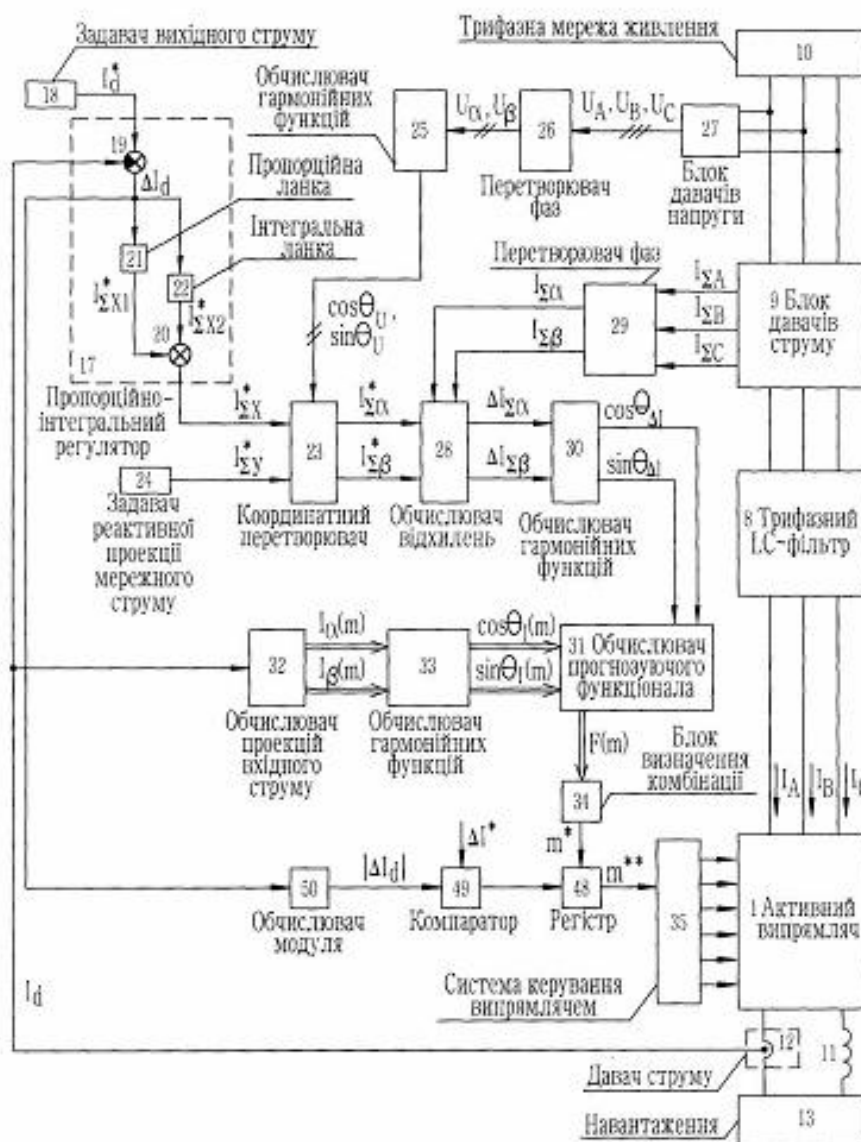


Fig. 3



Фиг. 4