



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **125773** (13) **C2**
(51) МПК
H02M 7/162 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

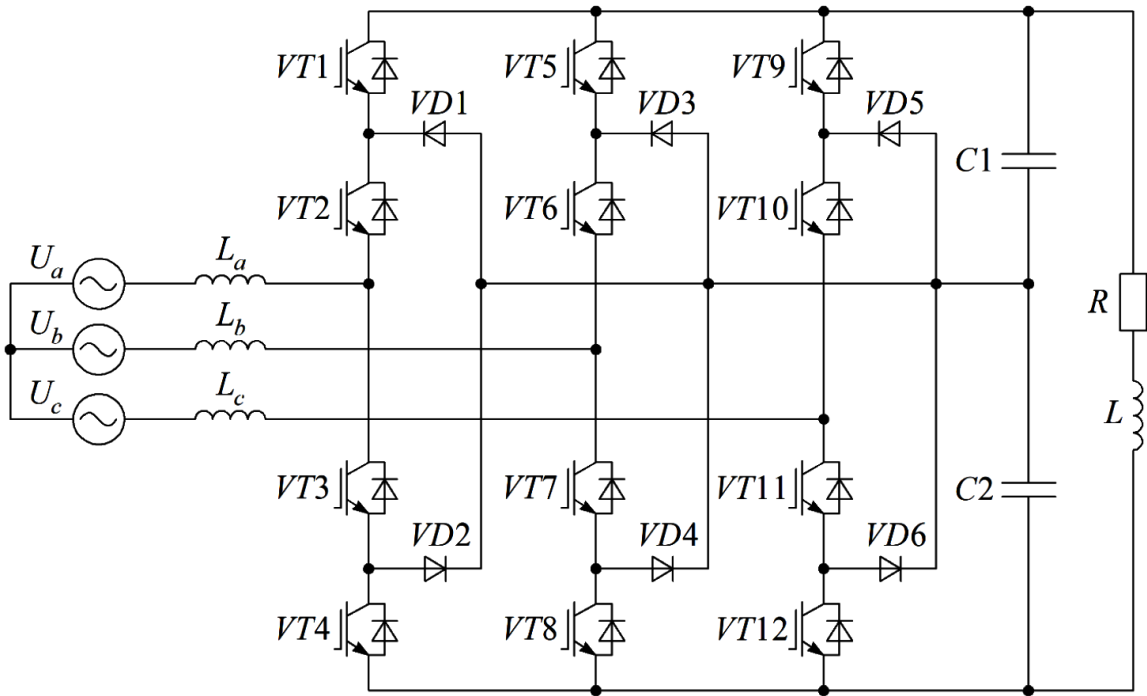
<p>(21) Номер заявки: a 2020 05027</p> <p>(22) Дата подання заявки: 04.08.2020</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 02.06.2022</p> <p>(41) Публікація відомостей про заяву: 10.12.2020, Бюл.№ 23</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 01.06.2022, Бюл.№ 22</p>	<p>(72) Винахідник(и): Плахтій Олександр Андрійович (UA), Нерубацький Володимир Павлович (UA), Гордієнко Денис Анатолійович (UA), Хоружевський Григорій Анатолійович (UA), Зінченко Олена Євгенівна (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ, УкрДУЗТ, НДЧ, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків-50, 61050 (UA)</p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: RU 2246169 C1, 10.02.2005 RU 2279178 C1, 27.06.2006 UA 109226 C2, 27.07.2015 UA 117645 C2, 27.08.2018 US 2013193813 A1, 01.08.2013 WO 2018/231810 A1, 20.12.2018 EP 2419988 A2, 22.02.2012 WO 2019/106744 A1, 06.06.2019</p>
--	--

(54) ТРИФАЗНИЙ ТРИРІВНЕВИЙ ЧОТИРИКВАДРАНТНИЙ ВИПРЯМЛЯЧ

(57) Реферат:

Винахід належить до силової перетворювальної техніки і може бути використаний для живлення електроприводів постійного струму, у складі перетворювачів частоти для живлення електроприводів змінного струму, в системах електроживлення постійним струмом, в силових випрямних установках, які живляться від джерел електричної енергії обмеженої потужності. Трифазний трирівневий чотириквadrантний випрямляч, який складається з блока датчиків вхідних фазних напруг, блока датчиків вхідних фазних струмів, вхідного фільтра, блока повністю керованих силових ключів, вихідного фільтра, датчика вихідної напруги та системи керування, та для стабілізації процесу рекуперації та підвищення коефіцієнта корисної дії він додатково містить датчик вихідної напруги, блок повністю керованих силових ключів побудовано за трифазною трирівневою мостовою схемою з фіксуючими діодами, вихідний фільтр зібрано з двох конденсаторів з середньою точкою, а до складу системи керування додатково входить блок задання частоти комутації. Технічним результатом, що досягається даним винаходом, є реалізація покращеного значення ККД і стабільності режиму рекуперації при динамічних змінах потужності.

UA 125773 C2



Фиг. 1

Винахід належить до силової перетворювальної техніки і може бути використаний в системах, де живлення електричних споживачів відбувається постійним струмом, наприклад у силових випрямних установках, для живлення електроприводів постійного струму, у складі перетворювачів частоти.

5 Відомий діодний випрямляч "Диодный выпрямитель (его варианты)" патент RU 2246169, МПК H02M07/10, опублікований 10.02.2005. Основними складовими елементами випрямляча є діодний трифазний міст, фільтрові конденсатори та обмежувач пускового струму між середньою точкою фільтрових конденсаторів та нейтраллю мережі. Недоліками такого випрямляча є великі масогабаритні показники реактивних елементів фільтра, низька якість випрямленої напруги (високий рівень пульсації), відсутність можливості регулювання, стабілізації та рекуперації, а також низький коефіцієнт потужності, зумовлений високим рівнем вищих гармонік струму, що споживається з живильної мережі. Останні недоліки зумовлюють низький рівень електромагнітної сумісності зазначеного випрямляча з живильною мережею та навантаженням.

10 Відомий трифазний керований випрямляч "Трёхфазный управляемый выпрямитель", патент RU 2279178, МПК H02M07/162, опублікований 27.06.2006, прийнятий за прототип. Він складається з блока повністю керованих силових ключів, зібраних за трифазною мостовою схемою, вхідного та вихідного фільтрів, трьох датчиків вхідної напруги, датчика вихідної напруги і системи керування. У блоці силових ключів як ключі використовуються повністю керовані напівпровідникові прилади. До системи керування входять генератор пилкоподібної напруги, формувач імпульсів керування, циклічний реєстр зсуву, пристрій порівняння фазних напруг і схема вибору увімкнення силових ключів. Причому вихід генератора пилкоподібної напруги підключений до першого вхідного виводу формувача імпульсів керування, до другого вхідного виводу якого підключений вихід датчика випрямленої напруги, а вихідний вивід формувача імпульсів керування підключений до вхідного виводу циклічного реєстра зсуву, що має три вихідних виводи, якими він підключений до трьох з шести вхідних виводів схеми вибору включення вентилів, до інших трьох вхідних виводів схеми вибору включення вентилів підключені вихідні виводи пристрою порівняння фазних напруг, який трьома своїми вхідними виводами підключено до фазних провідників живильної мережі, а шість вихідних виводів схеми вибору включення вентилів через пристрій узгодження з'єднані з керуючими виводами силових вентилів блока силових вентилів. Пристрій споживає струм синусоїдальної форми та має високий коефіцієнт потужності. Однак недоліками трифазного керованого випрямляча є відсутність можливості реалізації рекуперації (перетікання енергії від споживача, навантаження, до живильної мережі) та відносно ненадійна система керування випрямляча при умові роботи з мережею з високим вмістом вищих гармонік.

15 20 25 30 35 40 45 50 55 Найбільш близьким до пристрою, що заявляється, вибраним як прототип, є "Активний трифазний чотириквADRантний випрямляч", патент України номер 109226. Опубліковано: 27.07.2015. [<https://uapatents.com/11-109226-aktivnijj-trifaznijj-chotirikvADRantnijj-vipryamlyach.html>]. Активний трифазний чотириквADRантний випрямляч, який складається з блока повністю керованих силових ключів, зібраних за трифазною мостовою схемою, вхідного фільтра, вихідного фільтра, датчика вихідної напруги, блока датчиків вхідних фазних напруг та системи керування, що містить блок виділення перших гармонік, блок завдання вихідної напруги, блок завдання рівня напруги, при якій перетворювач починає рекуперацію, регулятор режиму рекуперації, регулятор вихідної напруги, контролер керування ключами, три суматори, три помножувачі, причому вихідний сигнал датчика вихідної напруги подається на перший вхід регулятора режиму рекуперації та на перший вхід регулятора вихідної напруги і вхідного струму, на другий вхід регулятора вихідної напруги подається вихідний сигнал блока завдання рівня вихідної напруги, вихідний сигнал якого подається на перші входи трьох помножувачів, на другі входи трьох помножувачів подаються вихідні сигнали блока датчиків фазних струмів, на другий вхід регулятора режиму рекуперації подається вихідний сигнал блока завдання кількості енергії рекуперації, у той час вихідні сигнали блока датчиків вхідних фазних напруг подаються на вхід блока виділення перших гармонік, вихідні сигнали блока виділення перших гармонік подаються на третій, четвертий та п'ятий вхід регулятора режиму рекуперації, вихідні сигнали помножувачів подаються на перші входи суматорів, а на другі входи суматорів подаються вихідні сигнали регулятора режиму рекуперації, вихідні сигнали суматорів подаються на контролер керування ключами, вихідні сигнали якого подаються на шість повністю керованих силових ключів.

Недоліками цього перетворювача є:

60 – нестабільність процесу рекуперації при динамічних змінах потужності, яку потрібно рекуперувати. Це зумовлено тим, що в прототипі режим рекуперації вмикається за умовою

перевищення вихідної напруги вище зазначеного значення. Крім того, відсутність в системі керування (СК) датчика вихідного струму випрямляча зумовлює відсутність в СК даних щодо значення миттєвої потужності, яку необхідно рекуперувати, що призводить до нестабільності процесу рекуперації;

- 5 – низький ККД, що зумовлено високими динамічними втратами потужності в силових ключах, які зумовлені наявністю гістерезисної модуляції в системі керування. При гістерезисній модуляції частота комутації силових ключів є нестабільною і залежить від багатьох факторів: величини струму навантаження, параметрів живильної мережі, параметрів навантаження, величини уставки гістерезису та ін. Крім того, високовольтні силові транзистори мають досить

10 обмежені частотні властивості і можуть не відпрацьовувати високочастотні сигнали керування. Задачею винаходу є підвищення ККД випрямляча і стабілізація режиму рекуперації активного чотириквадрантного випрямляча при реалізації корекції коефіцієнта потужності.

Трифазний трирівневий чотириквадрантний випрямляч для стабілізації процесу рекуперації та підвищення коефіцієнта корисної дії додатково містить датчик вихідної напруги, блок повністю керованих силових ключів побудовано за трифазною трирівневою мостовою схемою з фіксуючими діодами, вихідний фільтр зібрано з двох конденсаторів з середньою точкою, а до складу системи керування додатково входить блок задання частоти комутації, причому вихідні сигнали блока датчиків трифазного вхідного струму подаються на перші входи трьох помножувачів, а на їх другі входи подається вихідний сигнал регулятора вихідної напруги і

20 вхідного струму, при цьому вихідні сигнали блока датчиків трифазної вхідної напруги подаються до блока виділення перших гармонік, вихідні сигнали якого подаються на перші входи трьох суматорів, а на другі входи суматорів подаються вихідні сигнали трьох помножувачів, вихідні сигнали помножувачів подаються на входи контролера керування ключами, вихідні сигнали якого подаються на силові транзистори, при цьому вихідний сигнал блока задання рівня

25 вихідної напруги подає свій вихідний сигнал до першого входу регулятора вихідної напруги і вхідного струму, на його другий вхід подається вихідний сигнал датчика вихідної напруги, а на його третій вхід подається вихідний сигнал датчика вихідного струму.

Винахід пояснюється такими кресленнями:

- 30 Фіг. 1 – Схема силовій частини трифазного трирівневого чотириквадрантного випрямляча;
 Фіг. 2 – Структурна схема трифазного трирівневого чотириквадрантного випрямляча;
 Фіг. 3 – Принципова схема трифазного трирівневого чотириквадрантного випрямляча;
 Фіг. 4 – Сигнали в системі керування трифазного трирівневого чотириквадрантного випрямляча;

35 Фіг. 5 – Імітаційна модель трифазного трирівневого чотириквадрантного випрямляча;
 Фіг. 6 – Процеси модуляції в контролері керування силовими ключами з формуванням сигналів керування транзисторами одного плеча фази А (транзистори VT1–VT4 згідно з позначення ключів на фіг. 1).

Підвищення ККД досягається тим, що блок повністю керованих ключів виконано за трирівневою трифазною мостовою схемою (фіг. 1), що зумовлює можливість використання силових транзисторів менших класів з меншими статичними втратами, а також блок ШІМ-модуляції з можливістю задання частоти комутації, що зумовлює зменшення динамічних втрат потужності на силових ключах. Стабілізація режиму рекуперації досягається тим, що в систему керування додається зворотний зв'язок за вихідним струмом, що дозволяє визначити величину миттєвої потужності, яку треба рекуперувати.

45 Поставлена задача вирішується за рахунок того, що трифазний трирівневий чотириквадрантний випрямляч (див. фіг. 2) живиться від трифазного джерела живлення 40 та складається з таких елементів: трифазного датчика вхідних фазних струмів 1, датчика трифазної вхідної напруги 2, вхідних дроселів 3, трифазної трирівневої мостової схеми з фіксованими діодами, зібраних на IGBT або MOSFET транзисторах 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 та фіксуючих діодах 17, 18, 19, 20, 21, 22, вихідного ємнісного фільтра 23, який складається з конденсаторів 24 та 25, датчика вихідного струму 26, датчика вихідної напруги 27, системи керування 39. Трифазний трирівневий чотириквадрантний випрямляч живиться від трифазної електричної мережі 40. До випрямляча підключено навантаження 28. До складу системи керування 29 входять: блок виділення перших гармонік вхідної напруги 30 (може бути реалізований як смуговий фільтр або фільтр низьких частот), регулятор вихідної напруги та

50 вхідного струму 39, контролер керування ключами 38, блок задання рівня вихідної напруги 41, три суматори 31, 32, 33 та три помножувачі 34, 35, 36.

60 Вихідні сигнали датчика трифазного вхідного струму 1 подаються на перші входи помножувачів 34, 35, 36, а на їх другі входи подається вихідний сигнал регулятора вихідної напруги 39. Вихідні сигнали датчика трифазної вхідної напруги 2 подаються до блока виділення

перших гармонік 30. Вихідні сигнали блока виділення перших гармонік подаються на перші входи суматорів 31, 32, 33, а на їх другі входи подаються вихідні сигнали помножувачів 34, 35, 36. Вихідні сигнали суматорів 31, 32, 33 подаються на входи контролера керування ключами 38, вихідні сигнали якого подаються на блок силових ключів 4, а саме на силові транзистори 5–16.

5 Вихідний сигнал блока задання рівня вихідної напруги 41 подає свій вихідний сигнал до першого входу регулятора вихідної напруги і вхідного струму 39. До другого входу блока 39 подається вихідний сигнал датчика вихідної напруги 27, а до третього входу блока 39 подається вихідний сигнал датчика вхідного струму 26.

На фіг. 4 наведено сигнали в системі керування активним трифазним чотириквadrантним випрямлячем. Полозиції на фіг. 4 такі:

U_{out} - сигнал вихідної напруги випрямляча з датчика вихідної напруги 27 (див. фіг. 3);

I_{out} - сигнал вхідного струму випрямляча з датчика вхідного струму 26 (див. фіг. 3);

U_a, U_b, U_c - сигнали миттєвих значень фазних напруг з блока датчиків фазних напруг 2 (див. фіг. 3);

15 U_{a1}, U_{b1}, U_{c1} - сигнали миттєвих значень перших гармонік фазних напруг U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} ;

i_a, i_b, i_c - сигнали миттєвих значень фазних струмів випрямляча з блоку датчиків фазних струмів 1 (див. фіг. 3);

$i_{a_am}, i_{b_am}, i_{c_am}$ - сигнал масштабованих регулятором 39 миттєвих значень фазних струмів;

$\Delta i_a, \Delta i_b, \Delta i_c$ - сигнали неузгодженості фазних струмів та фазних напруг;

20 U_{out}^* - сигнал задання рівня вихідної напруги випрямляча з блока 41.

Активний трифазний чотириквadrантний випрямляч працює наступним чином. Суматори 31, 32 та 33 розраховують різницю сигналів миттєвих значень перших гармонік фазних напруг U_a, U_b, U_c , які по суті є сигналами задання форми вхідних фазних струмів, та сигналів масштабованих регулятором фазний струмів $i_{a_am}, i_{b_am}, i_{c_am}$. Вихідні сигнали суматорів 31, 32, 22 $\Delta i_a, \Delta i_b, \Delta i_c$ представляють миттєву різницю (відхилення) миттєвих значень фазних струмів від їх сигналів задання та подаються на контролер керування ключами 38.

Контролер керування ключами виконує функцію модуляції та подає сигнали керування до блока силових ключів 4. Контролер керування ключами може працювати за принципом аналогової рівнозсунутої широтно-імпульсної модуляції, як це показано на фіг. 4, або за принципом векторної широтно-імпульсної модуляції. Задання частоти комутації силових ключів виконується за допомогою блока задання частоти комутації 37.

Регулювання вихідної напруги та вхідного реалізується за допомогою регулятора 39, блока задання рівня вихідної напруги 41, суматорів 31, 32, 33 та помножувачів 34, 35, 36. Сигнал з датчика вихідної напруги 27 U_c та сигнал з блока задання рівня вихідної напруги 41 U_{out}^* подаються на регулятор вихідної напруги 37. Вихідний сигнал регулятора 39 reg та сигнали фазних струмів i_a, i_b, i_c подаються на помножувачі 31, 32, 33. Вихідні сигнали блока помножувачів $i_{a_am}, i_{b_am}, i_{c_am}$ повторюють форму фазних струмів, проте з амплітудою необхідною для забезпечення необхідного рівня вихідної напруги U_{out}^* . При незмінному значенні струму навантаження, збільшення амплітуди фазних струмів призводить до збільшення вихідної напруги, і відповідно зменшення величини вхідних фазних струмів веде до зменшення вихідної напруги.

Перехід із режиму випрямлення в режим рекуперації виконується за динамікою зміни вихідної напруги та/або зміною полярності струму навантаження. До регулятора 41 надходять сигнали вхідного струму та вихідної напруги, що дозволяє регулятору 41 оцінити величину потужності, яку треба рекуперувати до трифазної живильної мережі.

У пакеті Matlab було розроблено імітаційну модель активного трифазного трирівневого чотириквadrантного випрямляча (фіг. 5). Модель підтверджує працездатність запропонованої системи. Осцилограми фазних струмів, фазних напруг та вихідної напруги, отримані при моделюванні системи у пакеті Matlab у режимі пуску, приведено на фіг. 6.

50 Технічним результатом винаходу є реалізація режиму активного випрямлення з синусоїдальною формою фазних струмів та коефіцієнтом потужності, близьким до одиниці, реалізація режиму рекуперації з синусоїдальною формою фазних струмів та високим коефіцієнтом потужності з реалізацією покращеного значення ККД і стабільним режимом рекуперації при динамічних змінах потужності, яку потрібно рекуперувати.

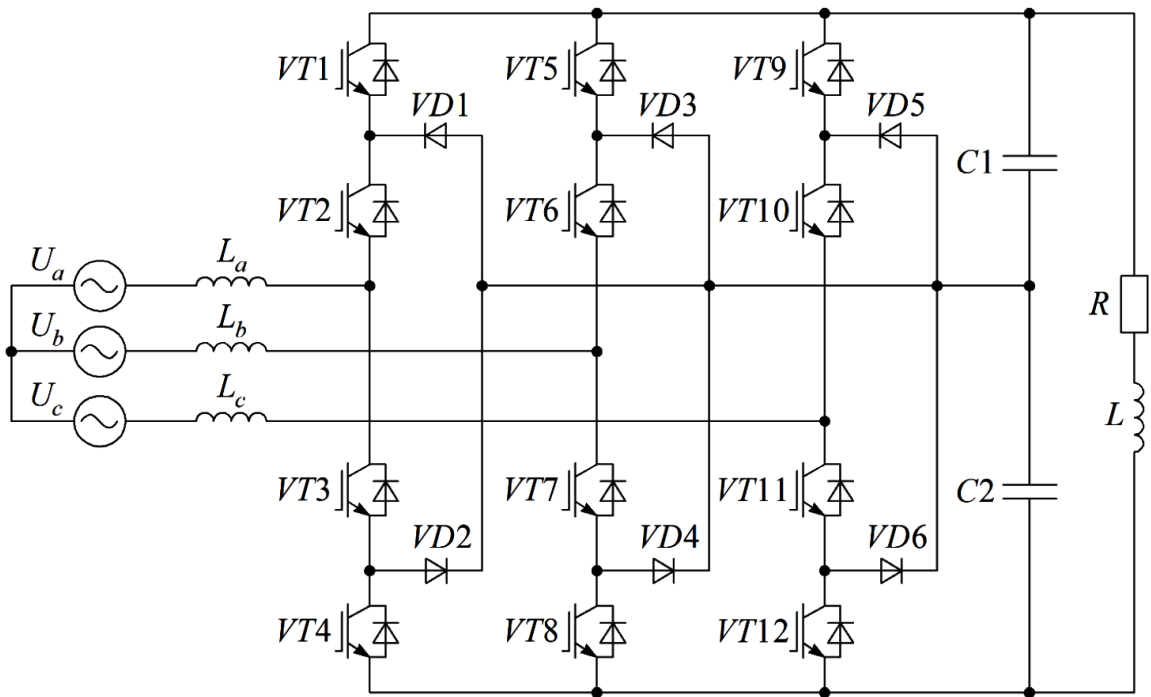
ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Трифазний трирівневий чотириквadrантний випрямляч, який складається з блока датчиків вхідних фазних напруг, блока датчиків вхідних фазних струмів, вхідного фільтра, блока повністю керованих силових ключів, вихідного фільтра, датчика вихідної напруги та системи керування,

який **відрізняється** тим, що додатково містить датчик вихідного струму, блок повністю керованих силових ключів побудовано за трифазною трирівневою мостовою схемою з фіксуєчими діодами, вихідний фільтр зібрано з двох конденсаторів з середньою точкою, а до складу системи керування додатково входить блок задання частоти комутації, причому виходи

5 блока датчиків трифазного вхідного струму з'єднані з першими входами трьох помножувачів, а їх другі входи з'єднані з виходами регулятора вихідної напруги і вхідного струму, при цьому виходи блока датчиків трифазної вхідної напруги приєднано до блока виділення перших гармонік, виходи якого з'єднані з першими входами трьох суматорів, а другі входи суматорів поєднані з відповідними виходами трьох помножувачів, а другі виходи помножувачів підключені

10 до входів контролера керування ключами, виходи якого з'єднані з силовими транзисторами, при цьому вихід блока задання рівня вихідної напруги своїм виходом приєднаний до першого входу регулятора вихідної напруги і вхідного струму, його другий вхід з'єднаний з датчиком вихідної напруги, а його третій вхід з'єднаний з датчиком вихідного струму.



Фіг. 1

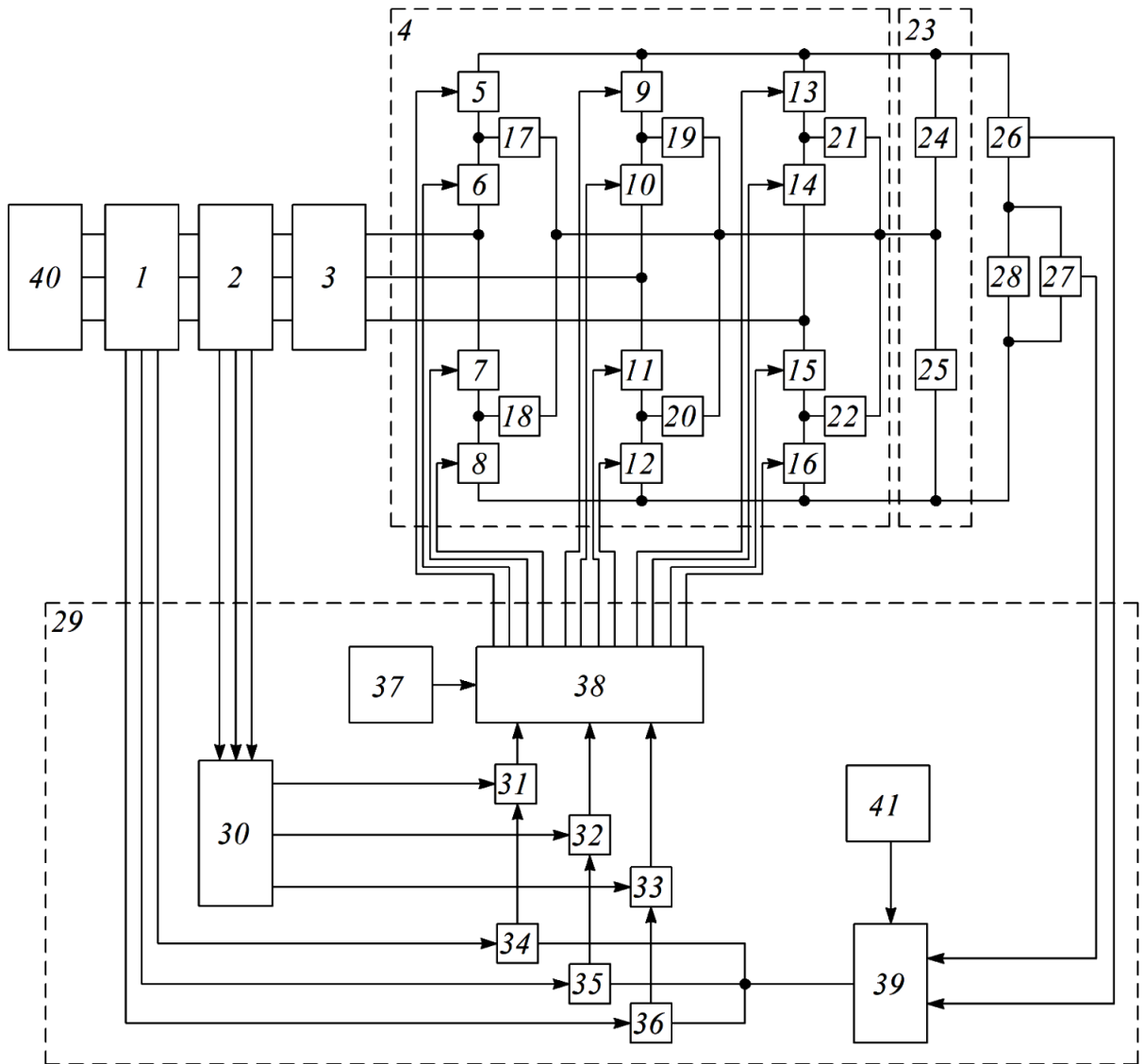
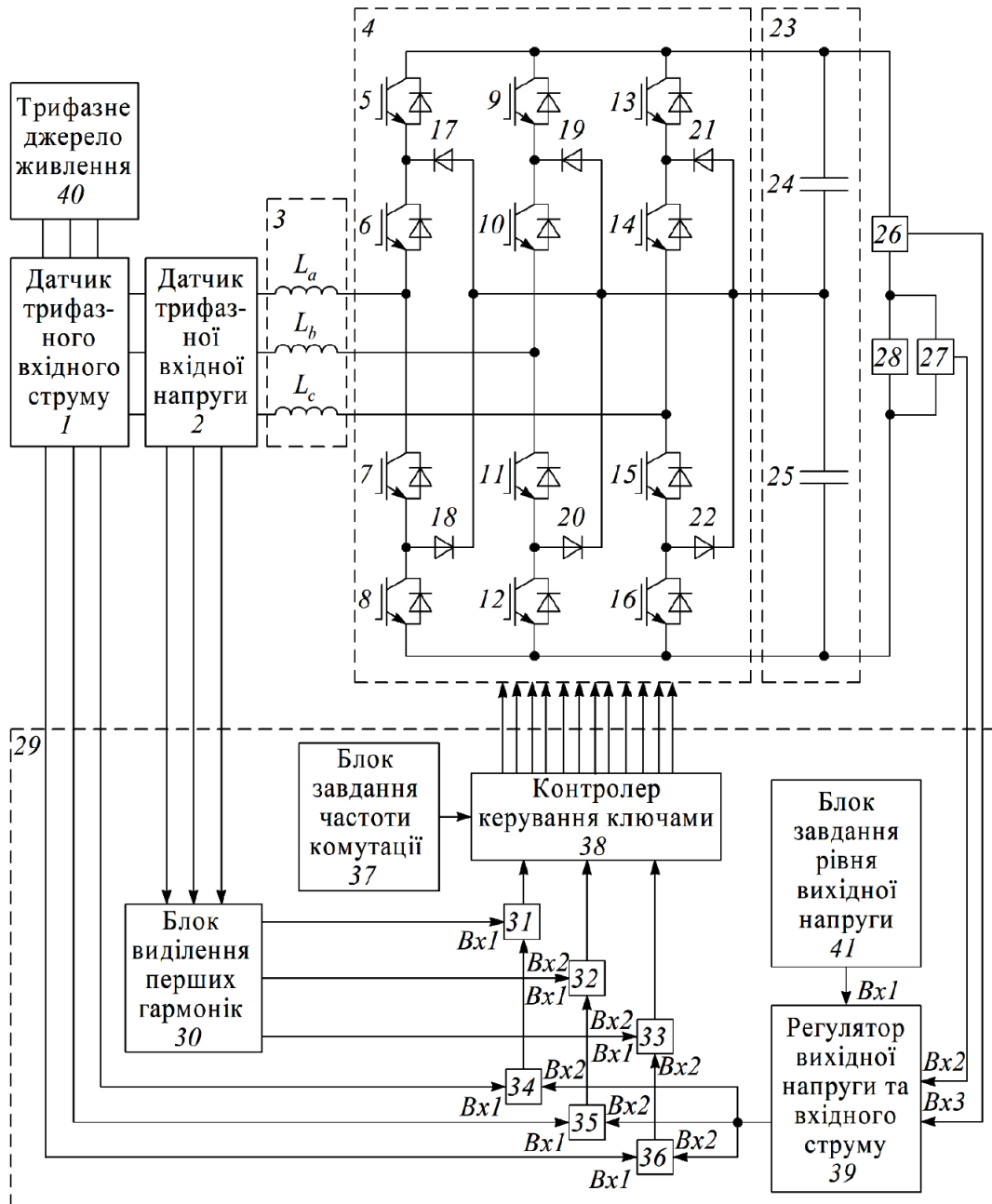
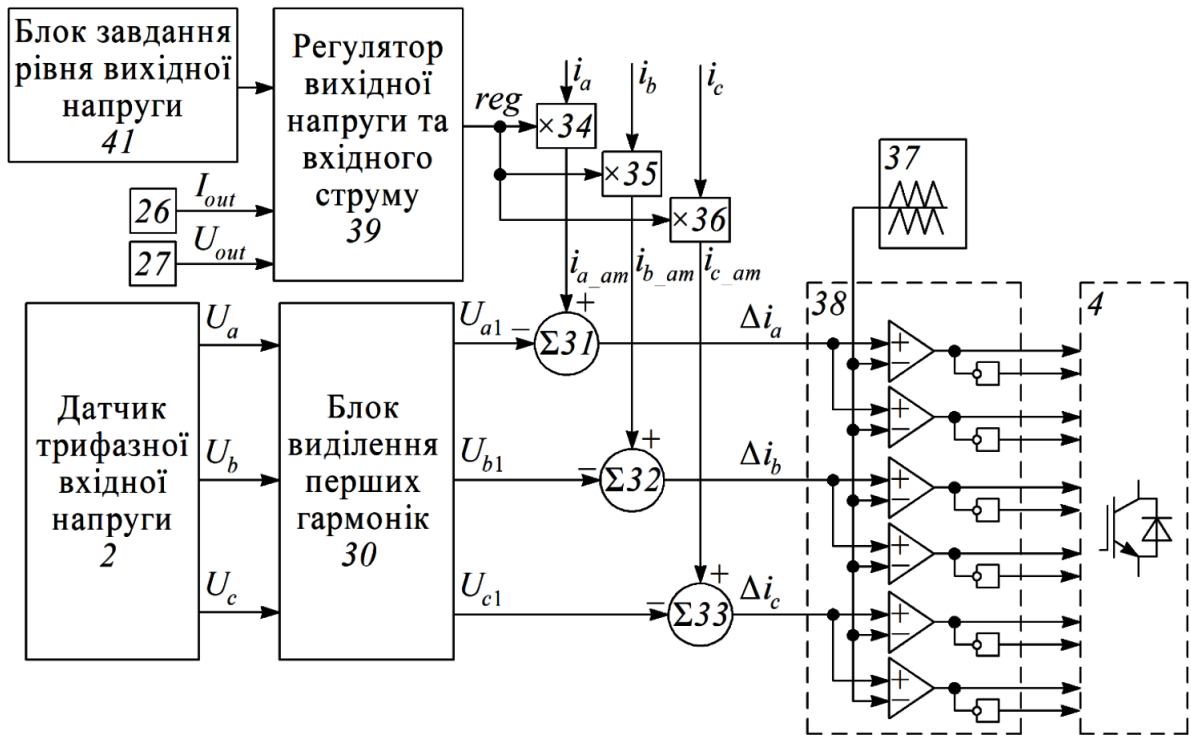


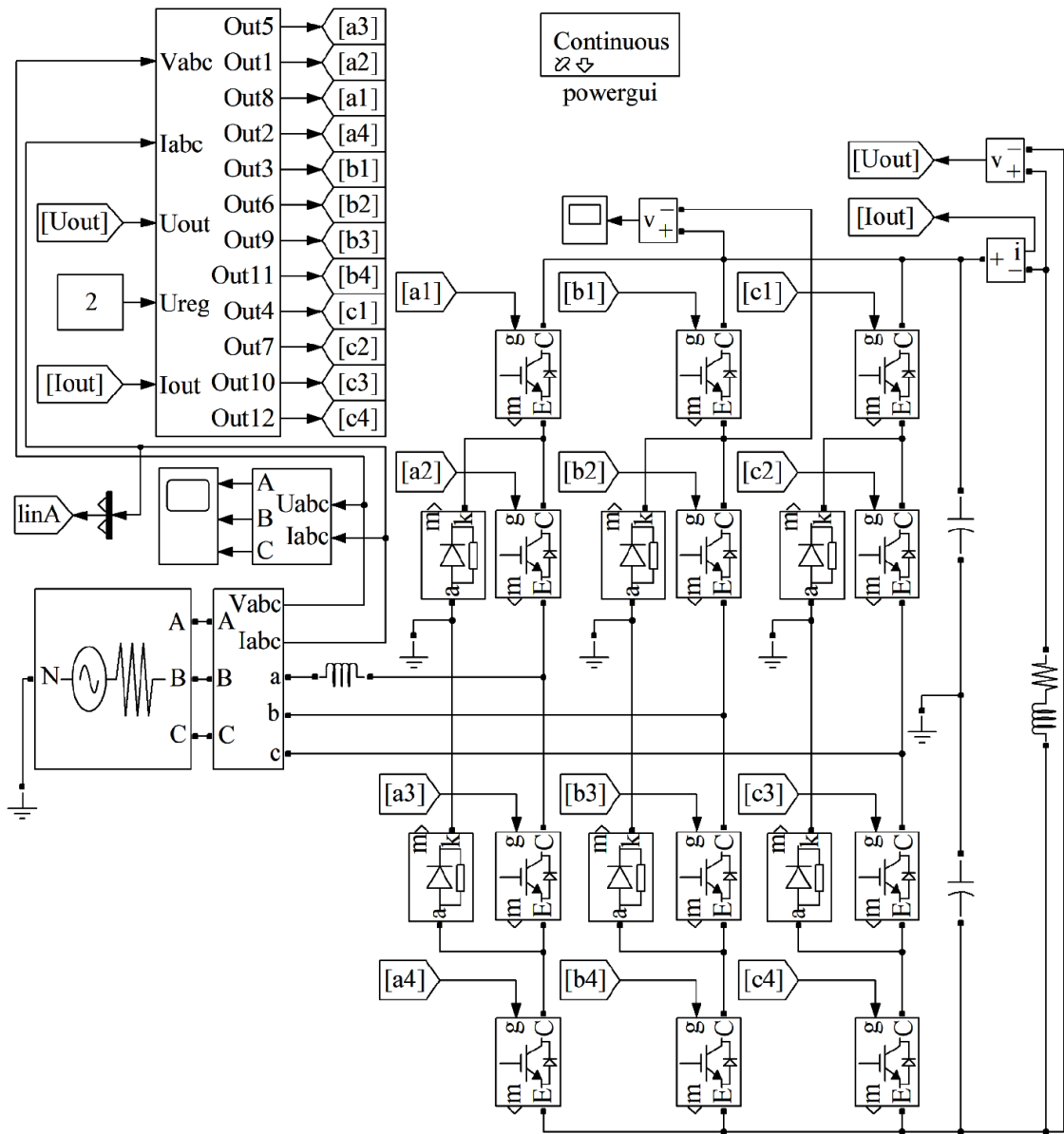
Fig. 2



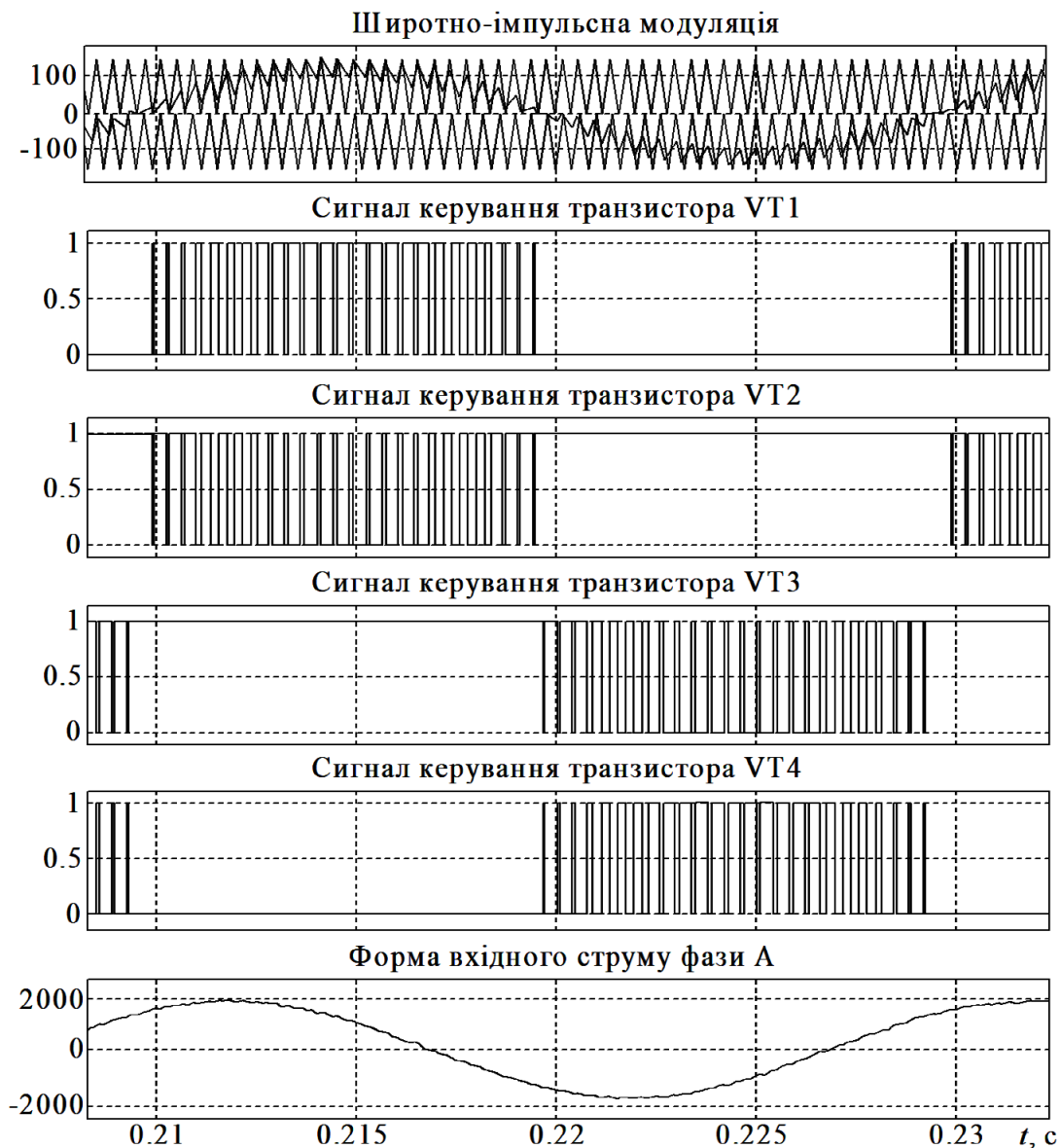
Фіг. 3



Фіг. 4



Фиг. 5



Фіг. 6