

УДК 621.314

doi:10.20998/2413-4295.2026.01.09

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АКТИВНОГО ВИПРЯМЛЯЧА З ПАРАМЕТРИЧНОЮ СИСТЕМОЮ УПРАВЛІННЯ І ФІКСОВАНОЮ ЧАСТОТОЮ МОДУЛЯЦІЇ

Д. С. КРИЛОВ*, О. І. ХОЛОД

кафедра промислової і біомедичної електроніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: denis.krylov@khi.edu.ua

АНОТАЦІЯ Сучасна промисловість вимагає ефективних і недорогих рішень у сфері вентильного електроприводу, де використання асинхронних двигунів займає провідне місце. Спрощення структури систем управління перетворювачами частотного електроприводу без погіршення його експлуатаційних характеристик є одним із засобів зменшення вартості кінцевого виробу. Замість векторних алгоритмів, що потребують значної обчислювальної потужності, можна застосувати параметричні і для їхньої реалізації поставити дешеві елементи. Використання активного випрямляча з такою системою управління задовольняє сучасним вимогам енергозбереження. Проте особливості роботи його схеми та системи управління на конкретну структуру частотного електроприводу потребують додаткових досліджень. Розглянуто вдосконалений алгоритм корекції кута зсуву першої гармоніки струму мережі відносно напруги джерела живлення в параметричній системі управління з фіксованою частотою модуляції та промодельовано такий перетворювач у складі частотно-регульованого асинхронного електроприводу в руховому та генераторному режимах роботи асинхронного двигуна. Запропоновано оновлену структуру системи управління активного випрямляча, яка не потребує тригонометричних обчислень й використовує виключно струми і напруги мережі та навантаження при формуванні сигналу завдання на вході широтно-імпульсного модулятора. Представлено основні принципи його роботи, отримані співвідношення для побудови та розроблена структурна схема. Результати моделювання показали, що активний випрямляч з такою системою управління забезпечує стійку роботу перетворювача в режимі двонаправленого обміну енергією між мережею та асинхронним двигуном в будь-якому режимі його роботи. Він автоматично підтримує завдану напругу на виході та синусоїдальний струм на вході при нульовому споживанні реактивної потужності.

Ключові слова: асинхронний двигун; частотне регулювання; руховий і генераторний режими роботи; параметрична система управління; активний керований випрямляч; синусоїдальна модуляція з фіксованою частотою.

SIMULATION OF THE OPERATION OF AN ACTIVE RECTIFIER WITH A PARAMETRIC CONTROL SYSTEM AND A FIXED MODULATION FREQUENCY

D. KRYLOV, O. KHOLOD

Department of industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Modern industry requires effective and inexpensive solutions in the field of valve electric drives, where the use of asynchronous motors occupies a leading place. Simplifying the structure of control systems for frequency electric drive converters without deteriorating its operational characteristics is one of the means of reducing the cost of the final product. Instead of vector algorithms that require significant computing power, parametric ones can be used, and cheaper elements can be supplied for their implementation. The use of an active rectifier with such a control system meets modern energy saving requirements. But the features of its circuit and control system for a specific structure of a frequency electric drive require additional research. Therefore, an improved algorithm for correcting the angle of shift of the first harmonic of the network current relative to the voltage of the power source in a parametric control system with a fixed modulation frequency is considered and such a converter is modeled as part of a frequency-controlled asynchronous electric drive in the driving and generator modes of operation of an asynchronous motor. An updated structure of the active rectifier control system is proposed, which does not require trigonometric calculations and uses only the currents and voltages of the network and the load when forming the task signal at the input of the pulse-width modulator. The basic principles of operation and the obtained relations for its construction are considered, and a structural diagram is developed. The simulation results showed that the active rectifier with such a control system ensures stable operation of the converter in the mode of bidirectional energy exchange between the network and the asynchronous motor in any mode of its operation. It automatically maintains the applied voltage at the output and the sinusoidal current at the input with zero reactive power consumption.

Key words: asynchronous motor; frequency control; driving and generator modes of operation; parametric control system; active controlled rectifier; sinusoidal modulation with fixed frequency.

Вступ

Сучасна промисловість вимагає ефективних та недорогих рішень у сфері вентильного електроприводу, де використання асинхронних двигунів (АД) займає провідне місце. Для

регулювання його обергів та підтримання необхідного моменту на валу в будь-яких режимах роботи традиційно використовуються перетворювальні системи на основі автономних інверторів напруги, що здатні забезпечити сучасні алгоритми частотного управління та гнучко підлаштовувати їх під

конкретні потреби кінцевого користувача [1,2]. Повною мірою це стосується систем малої та середньої потужності із живленням від промислової трифазної мережі змінної напруги. Однак, в умовах енергетичного переходу одним із основних факторів ефективності таких пристроїв є енергоефективність, що, стосовно до асинхронного електроприводу, позначається у необхідності забезпечення двонаправленого потоку енергії між двигуном і мережею та синусоїдального струму мережі при відсутності споживання чи генерації реактивної потужності перетворювачем [3,4]. З цим у класичних структур автономних інверторів напруги (АІН) з проміжною ланкою постійного струму є деякі проблеми. Трифазний мостовий діодний випрямляч, що найчастіше використовується в якості вхідного перетворювача змінної напруги мережі у постійну в малопотужних схемах, є простим і дешевим. Проте він не задовольняє жодної із умов сучасного енергозбереження. Натомість зараз виробники все частіше замінюють діодний випрямляч на схему активного керованого випрямляча – джерела напруги (АВДН), який повністю усуває всі його недоліки [5,6]. Таке рішення підвищує вартість виробу і її зменшення без втрати ефективності пристрою в конкретних умовах використання є актуальною задачею [7,8].

Спрощення структури систем управління перетворювачами частотного електроприводу без суттєвого погіршення його експлуатаційних характеристик є одним із засобів дещо зменшити вартість кінцевого виробу. Замість використання векторних алгоритмів, що потребують значної обчислювальної потужності, можна застосувати параметричні і для їхньої реалізації використати простіші й, відповідно, дешевші елементи [9–11]. При цьому *під параметричними алгоритмами матимемо на увазі такі, що формують сигнал управління перетворювачем безпосередньо із струмів і напруг мережі чи навантаження*, не використовуючи складні математичні методи їхньої обробки. Зазвичай, в структурах на базі АВДН та АІН параметричні методи працюють у зв'язці із широтно-імпульсним методом регулювання напруги (ШІМ) при фіксованій частоті перемикавання. Робота ШІМ-АІН при фіксованій частоті перемикавання добре відома [7,11]. Однак роботі АВДН з параметричною системою управління при фіксованій частоті перемикавання довгий час уваги приділено не було.

У попередніх дослідженнях [10–12] авторами була запропонована, обґрунтована, та досліджена параметрична система управління АВДН, який працює з фіксованою частотою модуляції у режимі двонаправленого потоку енергії крізь себе при можливості його глибокого регулювання в обидві боки. Було показана можливість АВДН, з такою системою управління, задовільнити сучасним вимогам енергозбереження на прикладі моделювання його роботи на еквівалентне навантаження. Проте особливості роботи схеми та системи управління АВДН

на конкретну структуру частотного електроприводу АІН-АД промодельовано не було. Також вдосконалення потребує втілений авторами алгоритм корекції кута зсуву першої гармоніки струму мережі.

Мета роботи

Метою роботи є вдосконалення алгоритму корекції кута зсуву першої гармоніки струму мережі відносно напруги джерела живлення в параметричній системі управління АВДН з фіксованою частотою модуляції та моделювання такого перетворювача в складі частотно-регульованого асинхронного електроприводу з автономним інвертором напруги в руховому та генераторному режимах роботи асинхронного двигуна.

Виклад основного матеріалу

Принцип роботи трифазного мостового АВДН з фіксованою частотою ШІМ а також структура параметричної системи його управління детально описано у роботах авторів [10–12]. Він заснований на формуванні необхідної форми та фази струму вхідного дроселя схеми, що водночас є і фазним струмом мережі $i_L = i_{M\phi}$, завдяки формуванню відповідної напруги u_L на ньому. Напруга дроселя, в свою чергу, формується як суперпозиція фазної напруги мережі живлення $u_{M\phi}$ та напруги на вході напівпровідникового комутатора $u_{V\phi}$, що регулюється завдяки системі управління. Таким чином, при фіксованій та незмінній напрузі мережі задачею параметричної системи управління є формування сигналу завдання, що подається на вхід широтно-імпульсного модулятора, який буде пропорційний фазній вхідній напрузі комутатора АВДН і відповідатиме умові завданої компенсації зсуву фазного струму мережі відносно фазної напруги при формуванні її синусоїдальної форми. Для цього розглядається баланс миттєвих напруг вхідного контура фази схеми за законом Кірхгофа та аналізуються векторні діаграми для режимів споживання та рекуперації енергії при умові повної компенсації реактивної потужності, що є найпоширенішою умовою роботи системи.

Також необхідною умовою роботи АВДН за будь яких режимів є підтримання незмінної напруги на його виході, яка має перевищувати амплітуду лінійної напруги на вході схеми. Це також має досягатися через вплив на струм вхідного дроселя.

Еквівалентна схема взаємозв'язку напруг і струмів у фазі вхідного контуру АВДН наведена на рис. 1.

Згідно з рис. 1, баланс миттєвих вхідних фазних напруг за законом Кірхгофа має вигляд

$$u_{M\phi} = u_L + u_{V\phi} \quad (1)$$

Таким чином, регулювання роботи вхідних і вихідних ланцюгів АВДН здійснюється виключно за рахунок впливу на величину та фазу вхідної фазної

напруги комутатора, що своєю першою гармонікою повторює сигнал управління на вході СУ ШІМ. Тобто можна розглядати силову схему перетворювача та формування сигналів системи управління, використовуючи лише перші гармоніки змінних сигналів і перейти до векторного опису схеми. При цьому, відповідно до (1), маємо

$$\bar{U}_{V\phi(1)} = \bar{U}_{M\phi} - \bar{U}_{L(1)}, \quad (2)$$

і формування амплітуди і фази першої гармоніки вхідної напруги комутатора може бути здійснено впливом на сигнал, пропорційний амплітуді та фазі першої гармоніки напруги дроселя при умові незмінності величини синусоїдальної фазної напруги мережі живлення.

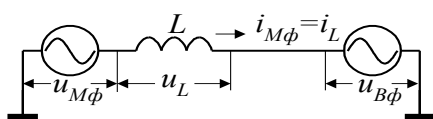


Рис. 1 - Еквівалентна схема вхідного ланцюга АВДН

Відомо [12], що в режимі повної компенсації реактивної потужності, вектори перших гармонік фазних струму і напруги мережі колінеарні, а вектор першої гармоніки напруги дроселя випереджає вектор його струму на 90 електричних градусів. Там же показано, що в неномінальних режимах роботи цей зсув може бути іншим і запропоновано структуру системи управління, що формує сигнал, пропорційний u_L , як функцію косинуса із додатковою фазовою корекцією на кут φ_K . Дослідження показали ефективну роботу такої системи. Проте вона потребує додаткових зусиль для коректного переходу в режим рекуперації і зворотно і, в цілому, необхідність обчислення тригонометричних функцій із урахуванням кутів корекції дещо протирічить самому визначенню параметричної системи управління. Тому спробуємо сформувати сигнал завдання за описаним раніше принципом, але використовуючи лише напруги і струми мережі та навантаження.

Розглянемо векторну діаграму роботи схеми в режимі споживання енергії при повній компенсації реактивної потужності, що наведена на рис. 2а.

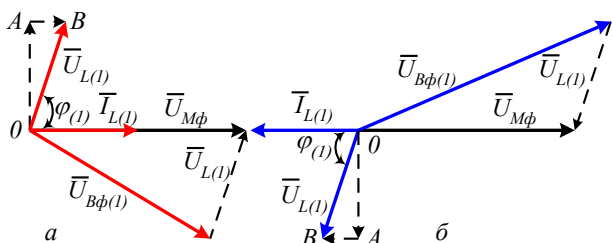


Рис. 2 – Векторна діаграма роботи АВДН при повній компенсації реактивної потужності для режимів: а) споживання; б) рекуперації енергії з навантаження в мережу живлення

Для регулювання довжини, знаку та фазового зсуву $\varphi_{(1)}$ вектора першої гармоніки напруги вхідного дроселя $\bar{U}_{L(1)}$ необхідно регулювати довжину і знак двох векторів: \overline{OA} , що перпендикулярній до вектора фазної напруги $\bar{U}_{M\phi}$ та \overline{AB} , що паралельній до нього. При цьому

$$\bar{U}_{L(1)} = \overline{OA} + \overline{AB}. \quad (3)$$

Як сигнал, що формує вектор, перпендикулярній до фазної напруги, можна використати лінійну напругу, що сформована двома іншими фазами. Тобто, перпендикулярною для u_a буде напруга u_{bc} , для $u_b - u_{ca}$, для $u_c - u_{ab}$. В якості паралельного сигналу можна використати саму фазну напругу. Корегувати довжину та знак векторів за (3) можна, помножуючи відповідні формуючі сигнали на чисельні коефіцієнти, сформовані регуляторами: K_U – регулятором вихідної напруги; K_Q – регулятором вхідної реактивної потужності. Позначивши лінійну напругу мережі, що перпендикулярна до фазної, як u_{Ml} , запишемо (3) у наступному вигляді

$$\bar{U}_{L(1)} = K_U \cdot \bar{U}_{Ml} + K_Q \cdot \bar{U}_{M\phi}. \quad (4)$$

Підставивши (4) у (2), отримаємо вираз для знаходження вектора першої гармоніки вхідної фазної напруги комутатора, як

$$\begin{aligned} \bar{U}_{V\phi(1)} &= \bar{U}_{M\phi} - (K_U \cdot \bar{U}_{Ml} + K_Q \cdot \bar{U}_{M\phi}) = \\ &= \bar{U}_{M\phi} \cdot (1 - K_Q) - K_U \cdot \bar{U}_{Ml} \end{aligned} \quad (5)$$

Зважаючи на те, що ті самі лінійні напруги, що перпендикулярні фазним, використовуються для визначення сумарної миттєвої реактивної потужності на вході перетворювача а також те, що в трифазній симетричній системі живлення фазні і лінійні напруги синусоїдальні і можуть бути знайдені одна через іншу, модифікуємо структуру параметричної системи управління [12] з урахуванням описаного вище підходу та виразу (5). Структурна схема модифікованої параметричної системи управління АВДН, що працює з фіксованою частотою модуляції в режимі двонаправленого потоку енергії, наведена на рис. 3.

У схемі на вході регулятора напруги R_U діє різниця між відносною завданою вихідною енергією АВДН та її відносним поточним значенням, пропорційним квадрату напруги на конденсаторі ланки постійного струму схеми. Регулятор формує на своєму виході чисельний коефіцієнт K_U , який помножується на відносні лінійні напруги мережі u_{Ml}^* , що сформовані в блоці ОЛ з вимірних зовнішніми датчиками відносних фазних напруг мережі $u_{M\phi}^*$ та перпендикулярні ним. Ці ж лінійні напруги разом із відносним фазним струмом мережі $i_{M\phi}^*$ надходять до блоку ОР, що обчислює відносне

значення миттєвої реактивної потужності на вході випрямляча за виразом

$$q^* = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_a^* \cdot u_{bc}^* + i_b^* \cdot u_{ca}^* + i_c^* \cdot u_{ab}^*). \quad (6)$$

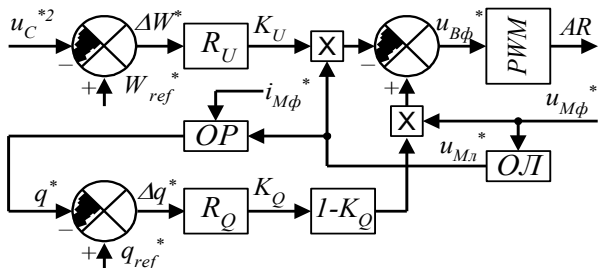


Рис. 3 – Структурна схема системи управління АВДН

Сигнал неузгодженості між завданою, зазвичай нульовою, і фактичною миттєвою реактивною потужністю поступає на вхід регулятора R_Q , що формує чисельний коефіцієнт K_Q . Далі, згідно до (5), K_Q віднімається від одиниці, помножується на відносні фазні напруги мережі $u_{M\phi}^*$ і з результату віднімається добуток лінійних напруг на коефіцієнт K_U , формуючи відносне значення сигналу завдання PWM генератора $u_{B\phi}^*$, що пропорційний першій гармоніці вхідної фазної напруги комутатора.

Зазначимо, що як базові величини при отримання відносних значень струмів і напруг взяті номінальні амплітудні значення фазного струму та напруги мережі живлення для входу та амплітуда лінійної напруги мережі для виходу схеми.

Перехід АВДН до рекуперативного режиму при умові повної компенсації реактивної потужності характеризується, згідно до рис.3б, зміною напрямку вектора першої гармоніки струму дроселя $\bar{I}_{L(1)}$ на протилежний. Вектор першої гармоніки напруги вхідного дроселя $\bar{U}_{L(1)}$ також змінює напрям і кут нахилу, що, згідно до (4), легко досягається регулюванням величини та знаку коефіцієнтів K_U та K_Q . Ці коефіцієнти, за структурою рис. 3, є вихідними сигналами пропорційно-інтегральних регуляторів, які намагатимуться підтримувати завдані величини вихідної напруги та миттєвої реактивної потужності на вході схеми при будь яких умовах її роботи.

Тобто модифікована структура параметричної системи рис.3 не потребує ніяких додаткових зусиль для переходу від режиму споживання до режиму рекуперативної енергії і навпаки. Також вона не потребує складних тригонометричних обчислень та формує усі необхідні сигнали виключно зі струмів і напруг мережі чи навантаження, що робить її повною мірою параметричною. Це вигідно відрізняє її від структури, запропонованої авторами в [12].

Структурна схема частотно-регульованого асинхронного електроприводу на базі автономного інвертора напруги та активного керованого випрямляча в якості вхідного перетворювача схеми наведена на рис. 4.

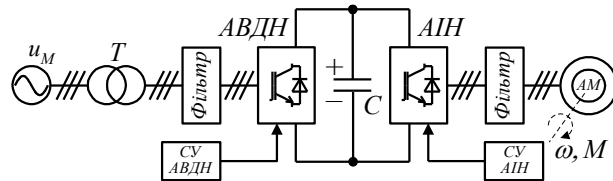


Рис. 4 – Структурна схема електроприводу

До неї входить: джерело трифазної змінної напруги мережі живлення u_M ; перетворювальний трансформатор T ; вхідний фільтр із реакторами АВДН, що придушує вищі гармоніки струму і напруги мережі; АВДН та АІН, що виконані по трифазній мостовій схемі на ключах знакозмінного струму із конденсатором C в проміжній ланці постійного струму між ними; вихідний фільтр між інвертором та навантаженням – трифазним асинхронним двигуном (АД) із фазним ротором, що обертається з частотою ω та розвиває момент M .

Система управління АВДН виконана за структурою рис. 3 і працює в режимі синусоїдальної ШІМ з фіксованою частотою модуляції. Принцип її дії описаний вище. Відповідно з нею добре підходить параметрична система управління АІН, що також працює в режимі синусоїдальної ШІМ з фіксованою частотою модуляції та підтримує оберти асинхронного двигуна за законом $U/f=Const$. Зазвичай, такий закон регулювання не є досить оптимальним. Але він є досить простим в реалізації і тому, із різними доповненнями, є дуже поширеним серед асинхронних приводів малої і середньої потужності із невисокими вимогами до динамічних властивостей. Саме тому СУ АІН, створена за таким принципом, була обрана для перевірки роботи АВДН із модернізованою системою управління в режимі двонаправленого потоку енергії при глибокій зміні параметрів навантаження. Її структурна схема наведена на рис. 5.

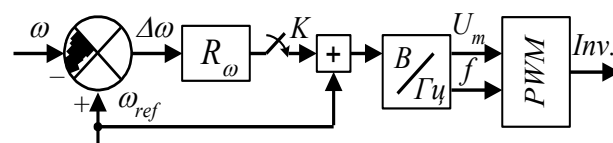


Рис. 5 – Структурна схема системи управління АІН

В ній сигнал завдання кутової швидкості обертання ротора АД ω_{ref} сумується із сигналом з виходу регулятора швидкості R_ω , що діє в функції різниці між завданою ω_{ref} і фактичною ω швидкістю обертання ротора. Результуючий сигнал поступає на блок, що згідно із законом $U/f=Const$ формує за амплітудою і частотою сигнал завдання на вході ШІМ. Таким чином компенсується ковзання, що змінюється при зміні режимів роботи АД. Доповнення СУ АІН регулятором швидкості дозволить дослідити його вплив на роботу запропонованої СУ АВДН. Перевіримо це моделюванням.

Моделювання та обговорення результатів

Математична модель силових ланцюгів асинхронного електропривода, що виконана за структурою рис. 4 в інтерактивному середовищі *Matlab/Simulink*, показана на рис. 6.

Її параметри відповідають тим, що приймалися авторами у попередніх дослідженнях [11,12]. А саме: асинхронна машина *AM* номінальною активною потужністю 315КВт, параметри схеми заміщення якої відповідають реальному двигуну типу АІР 355 М4, живиться від трифазного мостового автономного інвертора напруги *Inv* через гармонійний фільтр *F_Out*. Інвертор, через проміжну ланку постійного

струму із згладжуючим конденсатором *C*, під'єднаний до виходу активного випрямляча *AR*, що виконаний за аналогічною з ним схемою. АВДН, через вхідний фільтр *F_In*, під'єднаний до вентильних обмоток перетворювального трансформатора *T*, що живиться від трифазної промислової мережі змінного струму *Us*. Вимірювачі фазного струму та напруги *I1_U1* та *I2_U2* включені на вході і виході трансформатора. Аналогічні ним вимірювачі *Ii_Ui* та *In_Un* підключені до виходу інвертора та входу навантаження. Система управління АВДН *SU_A* виконана відповідно до структури рис. 3, а система управління інвертором *SU_I* – згідно зі структурою рис. 5.

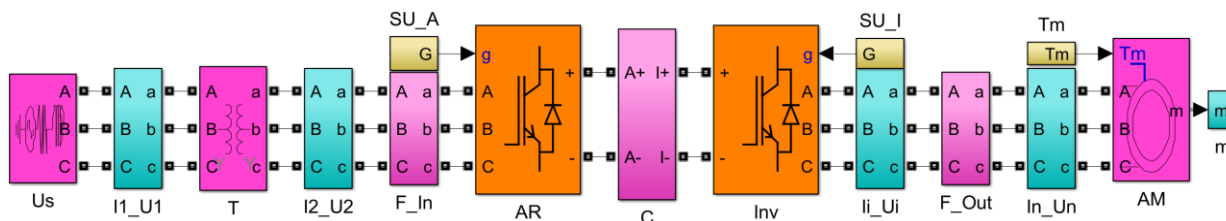


Рис. 6 – Математична модель силових ланцюгів асинхронного електроприводу з АВДН

Забезпечити стійку роботу асинхронного двигуна в генераторному режимі можна кількома способами: змінюючи знак моменту спротиву навантаження на роторі АМ при підтриманні постійній швидкості його обертання; змінюючи знак кутової швидкості обертання ротора при незмінному моменті спротиву; комбінуючи обидва попередні способи. Так як перевірка динамічних властивостей СУ АІН не є метою цієї роботи, для переведення двигуна в генераторний режим і навпаки обрано перший, найпростіший спосіб. Завдання закону зміни моменту спротиву навантаження моделюється блоком *Tm* а параметри роботи двигуна вимірюються блоком *m*.

Машинограми, що характеризують роботу силової схеми та систем управління приводу при зміні моменту на валу навантаження, наведені на рис. 7 а-г.

На рис. 7а показано завдану ω_{ref} та фактичну ω кутову швидкість обертання ротора АД, впевнене підтримання якої в пусковому і робочому режимах свідчать про коректну роботу регулятора швидкості в обраній структурі СУ АІН.

На рис. 7б показані відносні значення завданого моменту спротиву навантаження T_e^* та моменту на роторі АМ T_m^* . Обидва змінюються по величині та знаку, переводячи двигун з рухомого режиму в генераторний і навпаки при незмінній кутовій швидкості обертання ротору.

На рис. 7в показані миттєві значення напруги та струму на виході АВДН. Струм, що промодульований високою частотою, змінюється за величиною та полярністю. Напруга ж підтримується незмінною в усіх режимах роботи схеми завдяки регулятору R_U СУ АВДН (рис. 3).

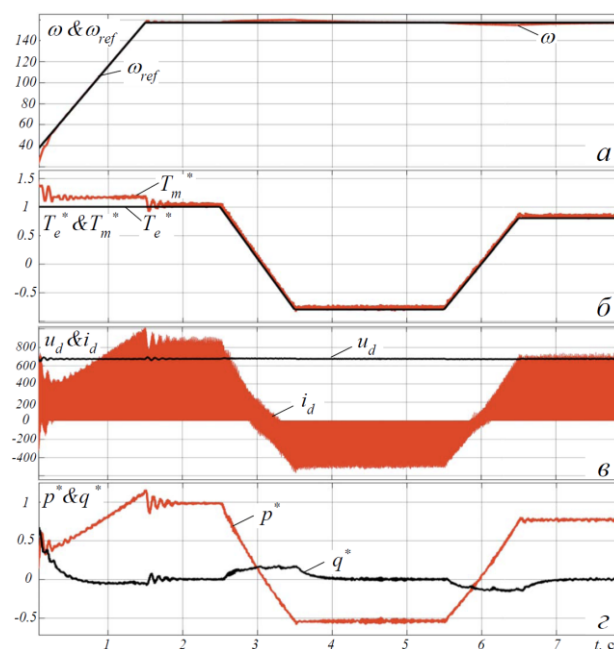


Рис. 7 – Машинограми роботи силової схеми АВДН асинхронного електроприводу з АВДН

На рис. 7г показані відносні миттєві значення сумарних активної і реактивної потужності на стороні мережі живлення схеми. Видно, що миттєва активна потужність змінюється по величині і знаку разом із моментом двигуна та струмом на виході АВДН. Зміна її знаку на негативний свідчить про перехід АД до генераторного режиму роботи а АВДН – до режиму рекуперації енергії в мережу живлення. Миттєва реактивна потужність в сталому режимі роботи схеми прагне до завданого нульового значення, плавно

змінюючи свій знак в перехідних режимах роботи. Це свідчить про коректну роботу регулятора реактивної потужності R_Q СУ АВДН (рис.3).

Машинограми миттєвої напруги та струму фази a на стороні вентильної обмотки перетворювального трансформатора для сталого рухомого та генераторного режимів роботи двигуна при відносному моменті спротиву навантаження на рівні $T_e^* = \pm 0.8$ наведені на рис. 8 а,б. З них видно, що в обох режимах струм фази має синусоїдальну форму та нульовий (чи півперіодний) зсув відносно фазної напруги, що свідчить про коректну роботу модифікованої структури системи управління АВДН з фіксованою частотою модуляції.

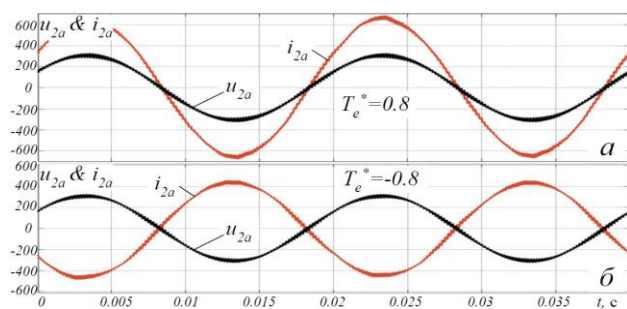


Рис. 8. – Машинограми струму та напруги фази мережі живлення

З машинограм, наведених на рис. 7, 8 видно, що запропонований у роботі модифікований алгоритм корекції кута зсуву першої гармоніки струму мережі відносно напруги джерела живлення в параметричній системі управління з фіксованою частотою модуляції забезпечує коректну роботу силової схеми АВДН в складі частотно-регульованого асинхронного електроприводу з автономним інвертором напруги для рухомого та генераторного режиму роботи асинхронного двигуна в широкому діапазоні зміни параметрів навантаження. АВДН забезпечує підтримання заданої вихідної напруги в сталих та перехідних режимах, легкий перехід між режимами споживання та рекуперації енергії при синусоїдальній формі струму, який в сталих режимах роботи знаходиться у фазі чи протифазі із фазною напругою мережі живлення.

Висновки

У статті запропонована оновлена структура системи управління АВДН, що працює з фіксованою частотою модуляції, яка не потребує тригонометричних обчислень та відрізняється від попередньої використанням виключно струмів і напруг мережі та навантаження при формуванні сигналу завдання на вході широтно-імпульсного модулятора, що робить її повною мірою параметричною. Розглянуті основні принципи роботи та отримані співвідношення для її побудови, розроблена структурна схема. В середовищі

Matlab/Simulink проведено математичне моделювання роботи АВДН з такою системою управління в складі частотно-регульованого асинхронного електроприводу на основі АІН з параметричною системою управління із додатковим регулятором швидкості, що дає можливість зробити наступні висновки:

– оновлена СУ АВДН є універсальною параметричною системою, що забезпечують стійку роботу перетворювача з фіксованою частотою модуляції в режимі двонаправленого обміну енергією між мережею та асинхронним двигуном в будь-якому режимі його роботи. Вона автоматично підтримує задану напругу на виході та синусоїдальний струм на вході при нульовому споживанні реактивної потужності без необхідності відстежувати характер роботи навантаження;

– кількість регуляторів і їх функціональне призначення в оновленій структурі відносно попередньої не змінилося. Моделювання виявило деякий вплив регулятора швидкості СУ АІН на роботу СУ АВДН, тому його бажано робити менш швидкодіючим, ніж регулятори напруги і реактивної потужності;

– в цілому, система АВДН-АІН-АД із запропонованими структурами систем управління виявила гарну стабільність в перехідних і сталих режимах роботи, високу електромагнітну сумісність з мережею живлення та може бути рекомендована для практичного застосування.

Список літератури

1. Kouro S., Cortés P., Rodríguez J. Advanced control of power converters in AC motor drives. *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics*. 2021. № 9 (4). P. 4050–4062. doi:10.1109/JESTPE.2020.3041127.
2. Li X., Sun Y., Wang J. Control of regenerative AC drives using active front-end converters with reduced sensor count. *IEEE Transactions on industrial electronics*. 2023. № 70 (10). P. 10021–10032. doi:10.1109/TIE.2022.3221456.
3. Zhang Y., Wang X., Blaabjerg F. Control of PWM rectifiers for bidirectional power flow in AC–DC systems: a review. *IEEE Access*. 2020. № 8. P. 228417–228433. doi:10.1109/ACCESS.2020.3045483.
4. Gao F., Zhang Z., Sun Y. Model-free control of active front-end rectifier for regenerative motor drive systems. *IEEE Transactions on transportation electrification*. 2023. № 9 (2). P. 2685–2696. doi:10.1109/TTE.2022.3204561.
5. Rojas C. A., Silva C. A., Rodríguez J. R. Simplified control strategy for bidirectional AC–DC converters in motor drive applications. *IEEE Transactions on industrial applications*. 2022. № 58 (4). P. 4587–4597. doi:10.1109/TIA.2022.3162048.
6. Hosseini S. H., Sabahi M., Yazdani A. Fixed switching frequency control of active rectifiers for regenerative energy systems. *IET Power electronics*. 2020. № 13 (14). P. 3065–3075. doi:10.1049/iet-pel.2020.0123.
7. Morales J., Espinoza J., Rivera M. Fixed-frequency PWM control of bidirectional AC–DC converters for industrial drives. *Electric power systems research*. 2022. № 206 (107820). doi:10.1016/j.epsr.2022.107820.
8. Wang L., Zhao Z., Xu D. Sinusoidal input current control of active front-end rectifiers without phase-locked loop. *IEEE Transactions on power electronics*. 2024. № 39 (2). P. 2145–2157. doi:10.1109/TPEL.2023.3298841.

9. Peng Y., Zhang H., Liu Y. Parametric control of active front-end rectifiers for energy-saving electric drives. *International journal of electrical power & energy systems*, 2025, № 148 (109023). doi:10.1016/j.ijepes.2024.109023.
10. Krylov D., Kholod O., Radohuz S. Active rectifier with different control system types. *2020 IEEE 4th International conference on intelligent energy and power systems (IEPS)*, Turkey, 2020, P. 273–278. doi:10.1109/IEPS51250.2020.9263226.
11. Krylov D. S., Kholod O. I. Determination of the input filter parameters of the active rectifier with a fixed modulation frequency. *Electrical engineering & electromechanics*, 2022, № 4, P. 21–26. doi:10.20998/2074-272X.2022.4.03.
12. Крилов Д. С., Холод О. І. Вдосконалення структури параметричної системи управління активним випрямлячем з фіксованою частотою модуляції для роботи в режимі двонаправленого потоку енергії. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*, 2024, № 1 (19), С. 91–98. doi:10.20998/2413-4295.2024.01.12.
5. Rojas C. A., Silva C. A., Rodríguez J. R. Simplified control strategy for bidirectional AC–DC converters in motor drive applications. *IEEE Transactions on industrial applications*, 2022, 58 (4), pp. 4587–4597, doi:10.1109/TIA.2022.3162048.
6. Hosseini S.H., Sabahi M., Yazdani A. Fixed switching frequency control of active rectifiers for regenerative energy systems. *IET Power electronics*, 2020, no. 13 (14), pp. 3065-3075, doi:10.1049/iet-pel.2020.0123.
7. Morales J., Espinoza J., Rivera M. Fixed-frequency PWM control of bidirectional AC–DC converters for industrial drives. *Electric power systems research*, 2022, no. 206 (107820), doi:10.1016/j.epsr.2022.107820.
8. Wang L., Zhao Z., Xu D. Sinusoidal input current control of active front-end rectifiers without phase-locked loop. *IEEE Transactions on power electronics*, 2024, no. 39 (2), pp. 2145–2157, doi:10.1109/TPEL.2023.3298841.
9. Peng Y., Zhang H., Liu Y. Parametric control of active front-end rectifiers for energy-saving electric drives. *International journal of electrical power & energy systems*, 2025, no. 148 (109023), doi:10.1016/j.ijepes.2024.109023.

References (transliterated)

1. Kouro S., Cortés P., Rodríguez J. Advanced control of power converters in AC motor drives. *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics*, 2021, no. 9 (4), pp. 4050–4062, doi:10.1109/JESTPE.2020.3041127.
2. Li X., Sun Y., Wang J. Control of regenerative AC drives using active front-end converters with reduced sensor count. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 2023, no. 70 (10), pp. 10021–10032, doi:10.1109/TIE.2022.3221456.
3. Zhang Y., Wang X., Blaabjerg F. Control of PWM rectifiers for bidirectional power flow in AC–DC systems: a review. *IEEE Access*, 2020, no. 8, pp. 228417–228433, doi:10.1109/ACCESS.2020.3045483.
4. Gao F., Zhang Z., Sun Y. Model-free control of active front-end rectifier for regenerative motor drive systems. *IEEE Transactions on transportation electrification*, 2023, no. 9 (2), pp. 2685–2696, doi:10.1109/TTE.2022.3204561.
10. Krylov D., Kholod O., Radohuz S. Active rectifier with different control system types. *2020 IEEE 4th International conference on intelligent energy and power systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, 2020, pp. 273–278, doi:10.1109/IEPS51250.2020.9263226.
11. Krylov D. S., Kholod O. I. Determination of the input filter parameters of the active rectifier with a fixed modulation frequency. *Electrical engineering & electromechanics*, 2022, no 4, pp. 21–26, doi:10.20998/2074-272X.2022.4.03.
12. Krylov D., Kholod O. Improving the structure of the parametric control system of an active rectifier with a fixed modulation frequency for operation in bidirectional energy flow mode. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1 (19), pp. 91–98, doi:10.20998/2413-4295.2024.01.12.

Відомості про авторів (About authors)

Крилов Денис Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової і біомедичної електроніки; м Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1025-3939; e-mail: denis.krylov@khpі.edu.ua

Denis Krylov – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Department of industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1025-3939; e-mail: denis.krylov@khpі.edu.ua

Холод Ольга Ігорівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової і біомедичної електроніки; м Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-0036-0239; e-mail: Olha.Kholod@khpі.edu.ua

Olga Kholod – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Department of industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-0036-0239; Olha.Kholod@khpі.edu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Крилов Д. С., Холод О. І. Моделювання роботи активного випрямляча з параметричною системою управління і фіксованою частотою модуляції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2026. № 1 (27). С. 67–73. doi:10.20998/2413-4295.2026.01.09.

Please cite this article as:

Krylov D., Kholod O. Simulation of the operation of an active rectifier with a parametric control system and a fixed modulation frequency. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2026, no. 1(27), pp. 67–73, doi:10.20998/2413-4295.2026.01.09.

*Надійшла (received) 02.02.2026
Прийнята (accepted) 13.03.2026
Опублікована (published) 02.04.2026*