

УДК 621.314

doi:10.20998/2413-4295.2022.04.02

## ПАРАМЕТРИЧНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТРИФАЗНИМ АКТИВНИМ ВИПРЯМЛЯЧЕМ З ФІКСОВАНОЮ ЧАСТОТОЮ МОДУЛЯЦІЇ

Д. С. КРИЛОВ\*, О. І. ХОЛОД

кафедра промислової і біомедичної електроніки, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА  
\*e-mail: denis.krylov@khp.edu.ua

**АНОТАЦІЯ** Дослідження характеристик активних керованих випрямлячів – джерел напруги (АВДН) нерозривно пов'язане з питанням використання у них того чи іншого алгоритму керування ключами. Відомо, що вони поділяються на дві основні групи – алгоритми зі змінною і з фіксованою частотою модуляції. Кожен з них має свої переваги і недоліки, привносячи особливості як до розрахунку параметрів силової схеми перетворювача, так і у вибір структури системи керування та авторегулювання. Алгоритми керування з фіксованою частотою модуляції мають відчутні переваги, що спрощують тепловий розрахунок елементів схеми і вхідних фільтрів перетворювача. На практиці, найчастіше, необхідно підтримувати кут зсуву між струмом і напругою мережі живлення рівний 0, або, в режимі рекуперації енергії рівний 180 електричним градусам. З цим завданням добре справляються параметричні системи керування. Тому розглянуто створення і моделювання структури параметричної системи керування АВДН з фіксованою частотою модуляції, що дозволяє формувати близький до синусоїди струм мережі живлення з нульовим фазовим зсувом щодо напруги мережі в широкому діапазоні зміни параметрів схеми і споживаної нею потужності. У роботі розглянуто: фізичні передумови функціонування запропонованого авторами алгоритму роботи системи керування, яка побудована на принципі формування сигналу керування PWM генератора зі складових напруг вхідного ланцюга схеми з фазовою корекцією кута зсуву першої гармоніки струму мережі щодо напруги живлення; принципи формування сигналів, що діють всередині неї; побудовано залежності, що обґрунтовують необхідність застосування запропонованих у статті технічних рішень. Результати моделювання показали, що АВДН, який працює із запропонованою системою керування, дозволяє підтримувати задане значення вихідної напруги і близький до синусоїди струм мережі живлення з нульовим фазовим зсувом відносно напруги живлення у широкому діапазоні зміни параметрів схеми і споживаної нею потужності.

**Ключові слова:** параметрична система керування; активний випрямляч; фіксована частота модуляції; фазовий зсув; векторна діаграма; широтно-імпульсна модуляція; фазова корекція.

## PARAMETRIC CONTROL SYSTEM OF A THREE-PHASE ACTIVE RECTIFIER WITH A FIXED MODULATION FREQUENCY

D. KRYLOV\*, O. KHOLOD

Department of industrial and biomedical electronics, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The study of the characteristics of active controlled rectifiers – voltage sources (ARVS) is inextricably connected with the issue of using one or another key management algorithm in them. It is known that they are divided into two main groups: algorithms with a variable and with a fixed modulation frequency. Each of them has its advantages and disadvantages, bringing features both to the calculation of the parameters of the power circuit of the converter, and to the choice of the structure of the control system and autoregulation. Control algorithms with a fixed modulation frequency have tangible advantages that simplify the thermal calculation of circuit elements and input filters of the converter. In practice, most often, it is necessary to maintain the offset angle between the current and the voltage of the power network equal to 0, or, in the energy recovery mode – 180 electrical degrees. Parametric control systems cope well with this task. Therefore, it was shown creation and modeling the structure of the parametric control system of the ARVS with a fixed modulation frequency, which allows to form a power network current close to a sinusoid with a zero phase shift with respect to the network voltage in a wide range of changes in the parameters of the circuit and the power consumed by it. The paper examines: the physical prerequisites for the operation of the control system algorithm proposed by the authors, which is built on the principle of generating a PWM generator control signal from the component voltages of the input circuit of the circuit with phase correction of the shift angle of the first harmonic of the network current relative to the supply voltage; principles of formation of signals operating within it; the dependencies justifying the need to apply the technical solutions proposed in the article are built. The simulation results showed that the ARVS, which works with the proposed control system, allows maintaining the specified value of the output voltage and the current close to the sinusoid of the power network with zero phase shift relative to the power supply voltage in a wide range of changes in the parameters of the circuit and the power consumed by it.

**Keywords:** parametric control system; active rectifier; fixed modulation frequency; phase shift; vector diagram; pulse width modulation; phase correction.

### Вступ

Дослідження характеристик активних керованих випрямлячів – джерел напруги (АВДН) нерозривно пов'язане з питанням використання в них

того чи іншого алгоритму керування ключами. Із публікацій [1-4] відомо, що вони діляться на дві основні групи – алгоритми зі змінною і з фіксованою частотою модуляції. Кожен з них має свої переваги і недоліки, привносячи особливості як до розрахунку

параметрів силової схеми перетворювача, так і у вибір структури системи керування та авторегулювання. На думку авторів, алгоритми керування з фіксованою частотою модуляції мають відчутні переваги, що спрощують тепловий розрахунок елементів схеми і вхідних фільтрів перетворювача. У роботах [5,6] авторами було проаналізовано вплив вхідної індуктивності на якісні показники роботи АВДН з фіксованою частотою модуляції та запропоновано алгоритм вибору її величини, а також запропоновано методику розрахунку параметрів вхідного фільтра. У дослідженнях [3,7] запропоновані та промодельовані різні структури систем керування АВДН з фіксованою частотою модуляції, засновані, перш за все, на теорії представлення струмів і напруг перетворювача у вигляді узагальнених векторів у різних системах координат. При формуванні сигналу завдання *PWM* генератора, векторні системи керування аналізують і обробляють складові узагальненого вектору струму фаз мережі живлення. Це дозволяє отримувати синусоїдальну форму і заданий кут зсуву струму мережі щодо напруги живлення, але ускладнює структуру системи керування і підвищує її вартість. При цьому на практиці, найчастіше, необхідно підтримувати кут зсуву між струмом і напругою мережі живлення рівний 0, або, в режимі рекуперації енергії, 180 електричних градусам. З цим завданням, як показано в роботі [8], добре справляються простіші і дешевші параметричні системи керування. Однак їх структури розглядають, найчастіше [1,2,4], стосовно систем керування з гістерезисним виходом зі змінною частотою модуляції. У розглянутій авторами літературі докладного дослідження та моделювання параметричних систем керування АВДН, що працюють з фіксованою частотою модуляції в широкому діапазоні зміни параметрів силової схеми та її вихідної потужності виявлено не було.

### Мета роботи

Метою даної роботи є створення і моделювання структури параметричної системи керування АВДН з фіксованою частотою модуляції, що дозволяє формувати близький до синусоїди струм мережі живлення з нульовим фазовим зсувом щодо напруги мережі в широкому діапазоні зміни параметрів схеми і споживаної нею потужності.

### Виклад основного матеріалу

Фізика роботи силових ланцюгів однофазних і трифазних схем АВДН детально описана в публікаціях [1,2,4,9-11,13]. При аналізі взаємозв'язку струмів і напруг у цьому перетворювачі найчастіше розглядають однофазну мостову схему, як найбільш просту, проте не характерну для приводів змінного струму середньої потужності. У них найбільшого поширення набула трифазна мостова схема, виконана, як і однофазна, на ключах знакозмінного струму.

Спрощена структурна схема силових ланцюгів трифазної схеми АВДН наведена на рис. 1. Вона, у загальному випадку, складається з: трифазного джерела синусоїдальної змінної напруги мережі живлення, що характеризується миттєвими фазними напругами  $u_{Sa}, u_{Sb}, u_{Sc}$ ; вхідних індуктивностей схеми  $L_a, L_b, L_c$ , які підключені послідовно у фази мережі живлення на вході перетворювача *AR*, зібраного по трифазній мостовій схемі на ключах знакозмінного струму; конденсатора *C* у проміжній ланці постійного струму, що характеризується вихідним струмом  $i_d$  та напругою  $u_d$  перетворювача; навантаження *Load*, якою, як правило, є автономний інвертор напруги (АІН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

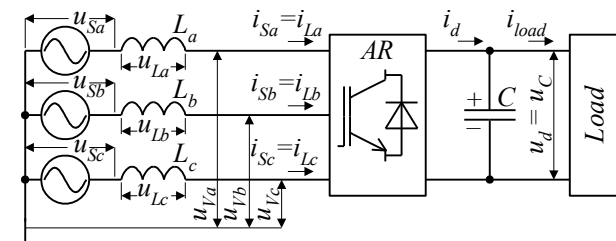


Рис. 1 – Структурна схема силових ланцюгів АВДН

В процесі роботи АВДН періодично підключає до фаз мережі живлення напругу конденсатора ланки постійного струму  $u_C = u_d$  з різною полярністю, що формує щодо нульового виводу джерела живлення фазні напруги  $u_{Va}, u_{Vb}, u_{Vc}$  на його вході. У результаті на періоді модуляції змінюється динаміка струму фаз джерела  $i_a, i_b, i_c$ , що протікає через вхідні індуктивності, та падіння напруги на самих індуктивностях  $u_{La}, u_{Lb}, u_{Lc}$ . Це дозволяє сформувати необхідну форму та фазу струму джерела живлення.

З теорії роботи трифазної схеми АВДН [1,2,4,11-13], структурна схема силових ланцюгів якої приведена на рис. 1, відомо, що фізика процесів, що протікають у кожній з її фаз, збігається з такою, що характерна і для однофазної схеми. Тобто для схеми рис. 1 будуть справедливі співвідношення, отримані для однофазної схеми, стосовно струмів і напруг у кожній з фаз. Тому надалі, розглядаючи принцип формування сигналів у параметричній системі керування трифазним АВДН, будемо вести мову про струми і напруги лише в одній фазі вхідного ланцюга схеми. Робота решти фаз буде аналогічною, зі зсувом на 120 електричних градусів.

У цьому випадку розглянуті вище напруги у фазі вхідного контуру АВДН за законом Кірхгофа в будь-який момент часу будуть пов'язані між собою виразом:

$$u_S = u_L + u_V. \quad (1)$$

Миттєве значення струму фази АВДН, який протікає і через вхідний дросель, формується під дією падіння напруги на дроселі  $u_L$ , що змінюється з частотою модуляції. Припустивши, що напруга джерела живлення  $u_S$  синусоїдальна і незмінна за частотою, фазою і діючим значенням, формувати необхідну форму напруги на вхідному дроселі  $L$ , згідно (1), можна, якщо формувати необхідну форму миттєвої напруги на вході АВДН  $u_V$ . Таким чином, миттєвий струм фази мережі живлення  $i_S = i_L$  формується під дією миттєвої напруги на вході АВДН  $u_V$ . Відповідно, амплітуда та фаза першої гармоніки струму мережі  $i_{S(1)}$  визначатиметься амплітудою та фазою першої гармоніки фазної напруги на вході АВДН  $u_{V(1)}$ .

В основі роботи систем керування перетворювачами з широтно-імпульсною модуляцією зазвичай лежить принцип порівняння змінного за величиною сигналу керування з опорною напругою – періодичним сигналом з фіксованою амплітудою та частотою. Частота опорної напруги визначає частоту модуляції, а її амплітуда – можливий діапазон зміни напруги керування. При коректній побудові *PWM* генератора вихідна напруга перетворювача повторює своєю першою гармонікою напругу керування, що формується системою керування, з деяким заданим коефіцієнтом передачі.

Стосовно перетворювача, який розглядається при роботі з фіксованою частотою модуляції, це означає, що для формування необхідної амплітуди і фази першої гармоніки струму мережі потрібно сформувати необхідну форму і фазу першої гармоніки вхідної напруги АВДН, для чого сформувати відповідну йому форму і фазу напруги керування на вході *PWM* генератора системи керування.

На практиці, перед АВДН найчастіше стоїть завдання формування максимально близького за формою до синусоїди струму мережі живлення, що знаходиться у фазі з напругою джерела живлення. Або в протифазі до нього в режимі рекуперації енергії. Тому подальший розгляд принципу побудови системи керування АВДН продовжимо з урахуванням лише перших, що змінюються з частотою мережі живлення, гармонік струмів і напруг у вхідному ланцюзі перетворювача. Тоді від виразу (1) можна перейти до векторної суми у вигляді:

$$\bar{U}_S = \bar{U}_{L(1)} + \bar{U}_{V(1)}, \quad (2)$$

де  $\bar{U}_S = U_S \cdot e^{j\omega}$  – вектор першої гармоніки фазної напруги джерела живлення;  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_S$  – кругова частота мережі живлення;  $\bar{U}_{V(1)}$  – вектор першої гармоніки напруги на вході АВДН;  $\bar{U}_{L(1)} = j \cdot \omega \cdot L \cdot \bar{I}_{S(1)}$  – вектор першої гармоніки падіння напруги на вхідному дроселі АВДН;  $\bar{I}_{S(1)}$  –

вектор першої гармоніки струму мережі, зрушений, в загальному випадку, від вектора першої гармоніки фазної напруги мережі на кут  $\varphi$ .

У режимі передачі енергії від джерела в навантаження при повній компенсації реактивної потужності кут зсуву  $\varphi$  буде дорівнювати нулю і вектори перших гармонік струму мережі  $\bar{I}_{S(1)}$  та напруги мережі  $\bar{U}_S$  будуть співспрямовані. Тоді вектор першої гармоніки падіння напруги на вхідному дроселі АВДН  $\bar{U}_{L(1)}$  буде зрушений щодо вектора  $\bar{I}_{S(1)}$  на 90 електричних градусів у бік випередження. При цьому, згідно (2), вектор першої гармоніки напруги на вході АВДН  $\bar{U}_{V(1)}$  можна визначити як векторну різницю

$$\bar{U}_{V(1)} = \bar{U}_S - \bar{U}_{L(1)}. \quad (3)$$

В режимі  $\varphi = 0$  він буде зрушений щодо вектора  $\bar{U}_S$  на кут  $\theta$  та більший його по модулю. Векторна діаграма напруг і струмів у вхідному ланцюзі АВДН, що працює в режимі повної компенсації реактивної потужності при передачі енергії від джерела в навантаження, наведена на рис. 2.

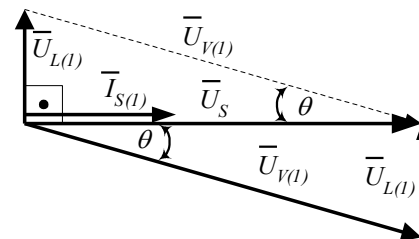


Рис. 2 – Векторна діаграма напруг та струмів у вхідному ланцюзі АВДН в режимі  $\varphi = 0$

Струм мережі АВДН, що протікає через вхідний дросель і викликає на ньому падіння напруги, повинен не тільки передавати енергію з джерела в навантаження, але і забезпечувати підтримку на конденсаторі ланки постійного струму рівня напруги, що перевищує амплітуду напруги джерела живлення. Для реалізації цього в системі керування з синусоїдальною ШІМ і фіксованою частотою модуляції необхідно подавати на вхід *PWM* генератора сигнал керування, пропорційний по амплітуді і фазі першій гармоніці вхідної напруги АВДН. Враховуючи, що напруга джерела живлення синусоїдальна і незмінна за величиною, сформувати такий сигнал у системі керування можна, згідно (3) і рис. 2, якщо задати величину і фазу сигналу, пропорційного першій гармоніці падіння напруги на вхідному дроселі фази АВДН.

Структурна схема параметричної системи керування АВДН, що працює в режимі синусоїдальної ШІМ з фіксованою частотою модуляції, наведена на рис. 3.

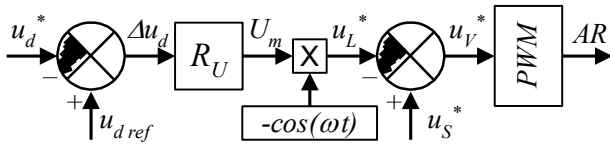


Рис. 3 – Структурна схема системи керування

Сигнал завдання напруги ланки постійного струму  $u_{d\ ref}$  порівнюється з відносним поточним значенням напруги на конденсаторі  $u_d^*$ . Отриманий сигнал різниці  $\Delta u_d$  надходить як завдання на вхід регулятора вихідної напруги АВДН  $R_U$ , який формує сигнал завдання відносної амплітуди першої гармоніки напруги вхідного дроселя  $U_m$ . Для отримання поточного миттєвого значення сигналу згідно рис. 2,  $U_m$  необхідно домножити на функцію косинуса, отримавши напругу  $u_L^*$ , що випереджає струм мережі на 90 електричних градусів. Відносно значення сигналу керування  $PWM$  генератора  $u_V^*$ , згідно (3), отримуємо, віднімаючи з відносної фазної напруги джерела  $u_S^*$  відносне падіння напруги на вхідному дроселі  $u_L^*$ .

Для отримання відносних величин струмів і напруг у схемі для вхідного ланцюга АВДН в якості базових приймаємо амплітудні значення фазного струму та напруги, а для вихідного – амплітуду лінійної напруги джерела живлення.

Таким чином, регулюючи величину падіння напруги на вхідному дроселі, ми задаємо необхідне значення струму мережі, який протікає через нього та необхідний для підтримки заданої напруги на вихідному конденсаторі АВДН. Вона, згідно з теорією роботи схеми, має перевищувати амплітуду лінійної напруги на вході мінімум на 15% для стійкої роботи перетворювача. На практиці приймають значення  $u_{d\ ref}$  у діапазоні 1.2–1.5 і намагаються знижувати вихідну напругу АВДН для зменшення втрат у схемі.

### Обговорення результатів

На рис. 4 наведено математичну модель перетворювача, що відповідає структурі рис. 1. Вона виконана в інтерактивному середовищі Matlab/Simulink.

Параметри моделі прийняті такими ж, як і в попередніх дослідженнях, що проводилися авторами на цю тематику [3,5,8]: джерело трифазної змінної напруги з потужністю короткого замикання 150 МВА і рівнем лінійної напруги 0.4 кВ на вході перетворювача; ємність ланки постійного струму 28 мкФ; мостова схема АВДН, що працює в режимі синусоїдальної ШІМ з частотою модуляції 4 кГц; навантаженням є трифазний автономний інвертор напруги з синусоїдальною ШІМ, система керування якого підтримує в еквівалентному  $RL$ -навантаженні

виділення активної потужності на рівні 315 кВт в номінальному режимі роботи схеми. Величина вхідної індуктивності фази, згідно [5], може лежати в діапазоні від 100 до 600 мкГн, забезпечуючи коректну роботу перетворювача.

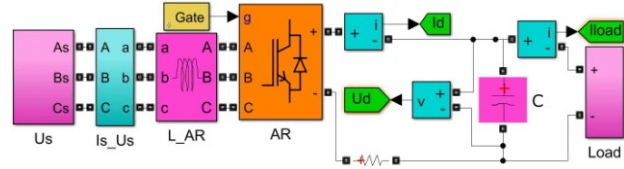


Рис. 4 – Matlab модель силових ланцюгів АВДН

Математичне моделювання показало працездатність запропонованого алгоритму формування сигналу керування  $PWM$  генератора  $u_V^*$ , що дозволяє впевнено підтримувати задане значення напруги на виході перетворювача і формувати синусоїдальний струм фази мережі живлення у всіх режимах роботи схеми. Однак і виявило його суттєвий недолік – нездатність підтримувати нульовий фазовий зсув між першими гармоніками напруги і струму фази джерела при зміні параметрів схеми і потужності, яку споживає навантаження.

На рис. 5-7 наведено залежності кута зсуву  $\varphi$  першої гармоніки струму мережі щодо фазної напруги мережі живлення при зміні індуктивності вхідного дроселя і потужності навантаження вниз від номінальної, а також зміні завдання за величиною вихідної напруги  $u_{d\ ref}$  вище номінальної величини  $u_{d\ refn} = 1.2$ .

Дійсно, векторна діаграма рис. 2, покладена в основу структури рис. 3, побудована з припущенням, що перші гармоніки струму і падіння напруги вхідного дроселя зсунуті один щодо одного на 90 електричних градусів. Це може бути справедливо у номінальному режимі роботи схеми, що підтверджують залежності рис. 5–7. При зниженні вхідної індуктивності або потужності навантаження цей зсув зменшується і перша гармоніка струму мережі, що дорівнює першій гармоніці струму вхідного дроселя, починає випереджати фазну напругу джерела на кут  $\varphi$  тим більший, чим більше відхилення від номінальних параметрів системи.

Для усунення цього недоліку в системі керування, що працює відповідно до запропонованого алгоритму, можна реалізувати можливість розрахунку і завдання кута фазового зсуву між першими гармоніками струму і напруги дроселя в залежності від поточних параметрів роботи силової схеми. Це добре реалізується у структурах векторного керування. У параметричній системі керування, яка розглядається, найбільш доцільним на думку авторів рішенням є введення в структуру рис. 3 додаткового контуру корекції фазового зсуву між струмом і напругою джерела.



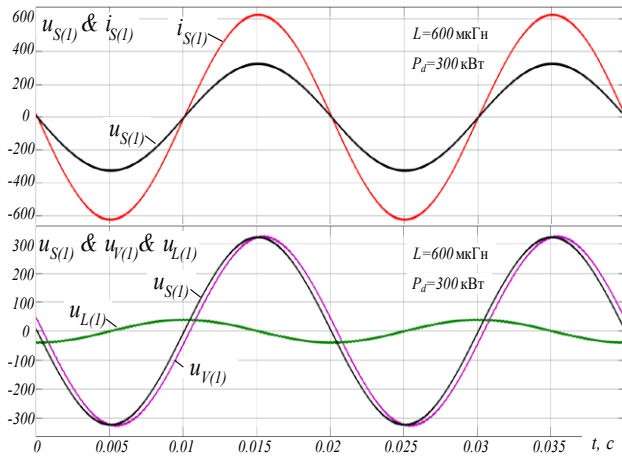


Рис. 10 – Машинограми роботи схеми при  $L=600 \text{ мкГн}$  та  $P_d=300 \text{ кВт}$

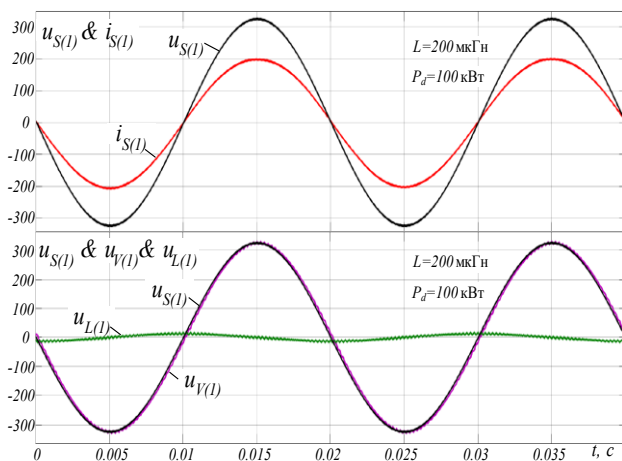


Рис. 11 – Машинограми роботи схеми при  $L=200 \text{ мкГн}$  та  $P_d=100 \text{ кВт}$

### Висновки

У статті докладно розглянуті фізичні передумови функціонування запропонованого авторами алгоритму роботи параметричної системи керування АВДН з фіксованою частотою модуляції, принципи формування діючих усередині неї сигналів, побудовані залежності кута зсуву перших гармонік напруги і струму фази джерела живлення від параметрів силової схеми перетворювача та потужності, яку вона споживає, обґрунтовано застосування додаткового контуру корекції фазового зсуву. Математичне моделювання перетворювача з розробленою системою керування в об'єктно-орієнтованому програмному середовищі Matlab/Simulink дозволяє зробити такі висновки:

- схема АВДН може підтримувати задане значення вихідної напруги і близький до синусоїди струм мережі живлення з нульовим, або іншим заданим фазовим зсувом щодо напруги мережі в

широкому діапазоні зміни параметрів схеми і потужності, яку вона споживає;

- отримані машинограми дозволяють переконаватися в коректності роботи силової схеми та запропонованої системи керування, яка побудована на принципі формування сигналу керування *PWM* генератора зі складових напруг вхідного ланцюга схеми з фазовою корекцією кута зсуву першої гармоніки струму мережі щодо напруги живлення.

### Список літератури

1. Wang, Y. *Analysis of three-phase rectifier via three different control methods and switch power loss comparison*. Mankato: Minnesota State University. 2021. 93 p.
2. Malinowski M. *Sensorless Control Strategies for Three - Phase PWM Rectifiers*. Warsaw: Warsaw University of Technology, 2001. 127 p.
3. 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. P. 273–278. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263226.
4. Premkumar K., Kandasamy P., Vishnu Priya M., Thamizhselvan T., Ron Carter S. B. Three-phase rectifier control techniques: A comprehensive literature survey. *International Journal of Scientific and Technology Research*. 2020. Vol. 9. No 1. P. 3183–3188.
5. Крилов Д. С. Холод О. І. Вплив величини вхідної індуктивності на якісні показники роботи активного керованого випрямляча. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 18-23. doi: 10.20998/2413-4295.2021.01.03.
6. 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.
7. Крилов Д. С., Холод О. І. Вдосконалення структури векторної системи керування активного керованого випрямляча. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 43–48. doi: 10.20998/2413-4295.2021.04.06.
8. Krylov D. S., Kholod O. I. The efficiency of the active controlled rectifier operation in the mains voltage distortion mode. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. No. 2. P. 30–35. doi: 10.20998/2074-272X.2021.2.05.
9. Song T., Zhang Y., Gao F., Zhu X., Shan J., Kong Z. Power Model Free Voltage Ripple Suppression Method of Three-Phase PWM Rectifier Under Unbalanced Grid. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2022. Vol. 37. No. 11. P. 13799-13807. doi: 10.1109/TPEL.2022.3184403.
10. Wai R.-J., Yang Y. Design of Backstepping Direct Power Control for Three-Phase PWM Rectifier. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019. Vol. 55. No. 3. P. 3160–3173. doi: 10.1109/TIA.2019.2893832.
11. He H., Si T., Sun L., Liu B., Li Z. Linear Active Disturbance Rejection Control for Three-Phase Voltage-Source PWM Rectifier. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 45050–45060. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978579.
12. Zhang C., Yu S., Ge X. A Stationary-Frame Current Vector Control Strategy for Single-Phase PWM Rectifier. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68. No. 3. P. 2640–2651. doi: 10.1109/TVT.2019.2895290.

13. Frisfelds K., Krievs O. Design of a Three-Phase Bidirectional PWM Rectifier with Simple Control Algorithm. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2019. Vol.56. No.3. P. 3–12. doi: 10.2478/lpts-2019-0015.

#### References (transliterated)

1. Wang Y. *Analysis of three-phase rectifier via three different control methods and switch power loss comparison*, Mankato: Minnesota State University, 2021, 93 p.
2. Malinowski M. *Sensorless Control Strategies for Three - Phase PWM Rectifiers*, Warsaw. Warsaw University of Technology, 2001. 127 p.
3. 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)*, 2020, pp. 273–278, doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263226.
4. Premkumar K., Kandasamy P., Vishnu Priya M., Thamizhselvan T., Ron Carter S. B. Three-phase rectifier control techniques: A comprehensive literature survey. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 2020, Vol. 9, no 1, pp. 3183–3188.
5. Krylov D., Kholod O. The value influence of the input inductance on the qualitative indicators of the active rectifier operation. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, 1 (7), pp. 18–23, doi: 10.20998/2413-4295.2021.01.03.
6. 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), pp. 21–26, doi: 10.20998/2074-272X.2022.4.03.

7. Krylov D., Kholod O. Improving of the vector control system structure of the active controlled rectifier. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4(10), pp. 43–48, doi: 10.20998/2413-4295.2021.04.06.
8. Krylov D. S., Kholod O. I. The efficiency of the active controlled rectifier operation in the mains voltage distortion mode. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 2, pp. 30–35, doi: 10.20998/2074-272X.2021.2.05.
9. Song T., Zhang Y., Gao F., Zhu X., Shan J., Kong Z. Power Model Free Voltage Ripple Suppression Method of Three-Phase PWM Rectifier Under Unbalanced Grid, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, Vol. 37, no. 11, pp. 13799–13807, doi: 10.1109/TPEL.2022.3184403.
10. Wai R.-J., Yang Y. Design of Backstepping Direct Power Control for Three-Phase PWM Rectifier. In *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, Vol. 55, no. 3, pp. 3160–3173, doi: 10.1109/TIA.2019.2893832.
11. He H., Si T., Sun L., Liu B., Li Z. Linear Active Disturbance Rejection Control for Three-Phase Voltage-Source PWM Rectifier. *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 45050–45060, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978579.
12. Zhang C., Yu S., Ge X. A Stationary-Frame Current Vector Control Strategy for Single-Phase PWM Rectifier. In *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, Vol. 68, no. 3, pp. 2640–2651, doi: 10.1109/TVT.2019.2895290.
13. Frisfelds K., Krievs O. Design of a Three-Phase Bidirectional PWM Rectifier with Simple Control Algorithm. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2019, Vol. 56, no. 3, pp. 3–12, doi: 10.2478/lpts-2019-0015.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Крилов Денис Сергійович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової та біомедичної електроніки; м Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-1025-3939>; e-mail: [denis.krylov@khi.edu.ua](mailto:denis.krylov@khi.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; <https://orcid.org/0000-0002-1025-3939>; e-mail: [denis.krylov@khi.edu.ua](mailto:denis.krylov@khi.edu.ua).

**Холод Ольга Ігорівна** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри промислової та біомедичної електроніки; м Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-0036-0239>; e-mail: [Olha.Kholod@khi.edu.ua](mailto:Olha.Kholod@khi.edu.ua).

**Olga Kholod** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-0036-0239>; [Olha.Kholod@khi.edu.ua](mailto:Olha.Kholod@khi.edu.ua)

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Крилов Д. С., Холод О. І. Параметрична система керування трифазним активним випрямлячем з фіксованою частотою модуляції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 11-17. doi:10.20998/2413-4295.2022.04.02.

*Please cite this article as:*

Krylov D., Kholod O. Parametric control system of a three-phase active rectifier with a fixed modulation frequency. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 4 (14), pp. 11–17, doi:10.20998/2413-4295.2022.04.02.

*Надійшла (received) 28.11.2022*