

## Силовая електроніка

УДК 621.316.761.2

Р.В. Власенко, О.В. Бялобржеський

### АЛГОРИТМ ПРОГНОЗУЮЧОГО УПРАВЛІННЯ ТРИФАЗНОГО СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРУ

*В роботі розглянуто схеми підключення активних фільтрів до мережі, структури систем управління силових активних фільтрів і методи, що ґрунтуються на визначенні складових повної потужності. Проаналізовано існуючі структури систем управління силовими активними фільтрами та корегування алгоритму управління для зменшення комутаційних втрат вентилів. Запропоновано алгоритм прогнозного управління трифазним силовим активним фільтром.*

*В работе рассмотрены схемы подключения активных фильтров к сети, структуры систем управления силовых активных фильтров и методы, основанные на определении составляющих полной мощности. Проанализированы существующие структуры систем управления силовыми активными фильтрами и корректировки алгоритма управления для уменьшения коммутационных потерь вентилями. Предложен алгоритм прогнозирующего управления трехфазным силовым активным фильтром.*

#### ВСТУП

Впровадження останнім часом напівпровідникової техніки в електротехніці стало приводити до зростання нелінійного навантаження, що загостило проблему забезпечення якості електроенергії. Негативна дія нелінійного навантаження полягає в тому, що воно призводить до високого коефіцієнту несинусоїдальності струму, споживаного перетворювачами з мережі. Такий струм навантаження характеризується високим рівнем гармонік, негативний вплив яких призводить до економічних збитків, зумовлених погіршенням енергетичних показників та інше [1]. Останніми досягненнями силової перетворювальної техніки і найбільш ефективними технічними рішеннями в області компенсації неактивних складових потужностей навантажень є силові активні фільтри [1].

#### МЕТА РОБОТИ

Аналіз структури систем управління силовими активними фільтрами та корегування алгоритму управління для зменшення комутаційних втрат вентилів.

По типу підключення активного фільтру до мережі розрізняють: активний фільтр, що включається паралельно навантаженню (рис. 1) та підключений послідовно (рис. 2) в лінію.

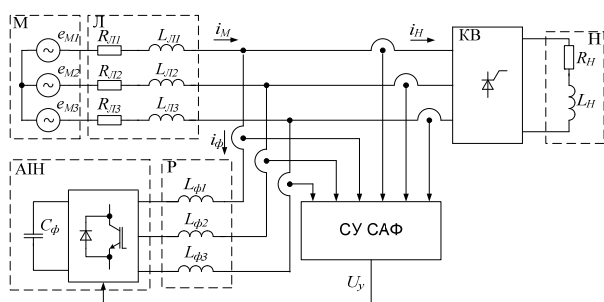


Рис. 1 Схема підключення паралельного активного фільтру до мережі: АИИ – автономний інвертор напруги; СУ САФ – система управління силовим активним фільтром; М – мережа; Л – лінія; КВ – керований випрямляч; Н – навантаження; Р – реактор

Активний фільтр, що включається паралельно навантаженню, застосовується, в основному, для зниження рівня гармонік струму, компенсації реактивної потужності, що викликаються наявністю нелінійних пристроїв, які входять до складу навантаження.

Увімкнений послідовно в лінію активний фільтр, окрім основної функції зниження гармонік струму, може використовуватися для регулювання напруги основної гармоніки у вузькому діапазоні значень, а також для демпфування порушень якості електроенергії – несиметрії напруг і флікер при роботі в мережі таких споживачів, як дугові печі або потужні електродвигуни з частими пусками.

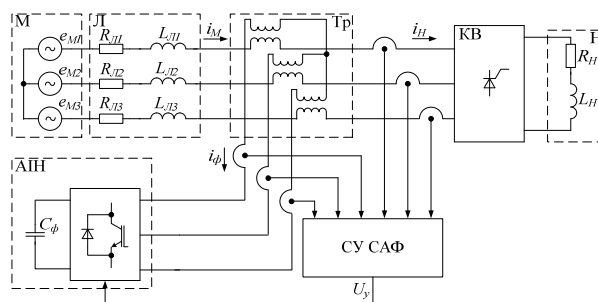


Рис. 2 Схема підключення послідовного активного фільтру до мережі: АИИ – автономний інвертор напруги; СУ САФ – система управління силовим активним фільтром; М – мережа; Л – лінія; КВ – керований випрямляч; Н – навантаження; Тр – трансформатор

Для виділення складових потужності, які підлягають компенсації чи фільтрації використовують різноманітні методи, що ґрунтуються на визначенні складових повної потужності, зокрема теорія за Фрізе;  $p-q$  теорії миттєвої потужності і її модернізацією  $d-q$  методом.

Польський вчений Станіслав Фрізе запропонував метод визначення складових повної потужності [2] шляхом розкладання їх на дві ортогональні складові в часовій області. Він запропонував розкласти струм  $i$  на активну  $i_a$  (повторює форму напруги мережі) і пасивну  $i_{II}$  (нев'язки до струму) складові:

$$i = i_a + i_{II} \quad (1)$$

Через загальноприйняті формули визначаються потужності, середньоквадратична напруга і струм за довільний інтервал розгляду:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot idt, \quad (2)$$

$$U^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt, \quad (3)$$

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt. \quad (4)$$

Активна і пасивна складова струму визначаються зі співвідношень:

$$i_a = \frac{P}{U^2} \cdot u, \quad (5)$$

$$i_{II} = i - i_a. \quad (6)$$

Оскільки пасивні складові не споживають енергії [2], то Фрізе запропонував їх компенсувати.

$P$ - $q$  теорія миттєвої потужності була вперше запропонована японськими вченими Н. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae. Застосовується вона в трифазних мережах без нульового проводу [3, 7]. В  $p$ - $q$  теорії миттєву активну і реактивну потужність визначають при синусоїдальній симетричній системі напруг мережі. Визначаються миттєві потужності із співвідношень в  $\alpha\beta$ -координатах, які отримуються в результаті перетворень Кларка.

Коли напруга живлячої мережі спотворена використовують корекцію  $p$ - $q$  теорії, яку автори F. Z. Peng, J. S. Lai назвали  $d$ - $q$  методом [7]. Метод  $d$ - $q$  заснований на використанні перетворень Парка і обертової системи координат.

Для формування імпульсів управління ключами перетворювача з метою відпрацювання розрахованих за вище наведеними методами потужності застосовують методи формування імпульсів: періодичної дискретизації (рис. 3,а), релейного управління (рис. 3,б) і широтно-імпульсної модуляції (рис. 3,в).

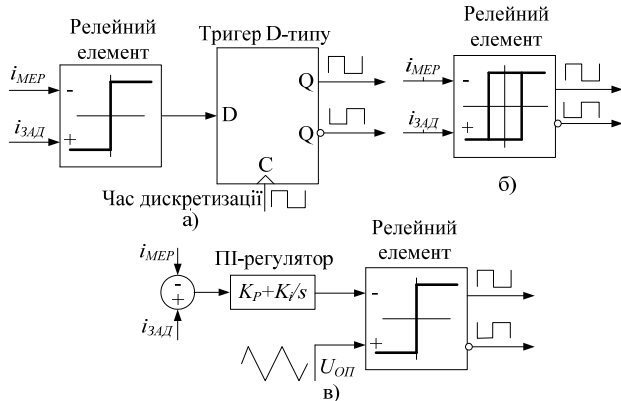


Рис. 3 Блоки керування ключами перетворювача: а) періодична дискретизація; б) релейне управління; в) широтно-імпульсна модуляція

Метод періодичної дискретизації забезпечує перемикання ключів силового активного фільтра залежно від стану релейного елемента та синхронізуючих сигналів визначених фіксованою частотою [4]. Основною перевагою цього методу є те, що мінімальний час між переходами перемикання обмежений періодом тактових імпульсів, недоліком – частота вихідних імпульсів чітко не визначена та додатково зумовлюється помилкою між заданим та поточним значенням параметру управління.

Релейне управління забезпечує перемикання силових ключів, коли похибка перевищує фіксовану величину – зону гістерезису [4]. У цьому випадку частота перемикання не фіксована, але вона може бути визначена [4]. Перевагою системи управління є її простота, недоліком – виникнення субгармонік.

Широтно-імпульсна модуляція передбачає порівняння похибки параметру регулювання з фіксованою амплітудою і частотою опорного сигналу. Похибка подається на вхід пропорційно-інтегрального ПІ-регулятора перед порівнянням з опорним сигналом. Параметри регулятора розраховуються у відповідності з абсолютним значенням критерію оптимальності [4]. Перевагою є те, що імпульси комутації короткої тривалості, недоліком – спотворення форми струму [4].

Втрати потужності в перетворювачі складаються із статичних і динамічних втрат потужності [5], які є складними функціями поточних значень: струмів, що протікають через вентилі і шунтуючі їх діоди; прямого падіння напруги на вентилях у відкритому стані і зворотного падіння напруги на шунтуючих діодах; та частоти модуляції (перемикання).

Електротехнічні установки працюють в режимах в яких можна виділити квазістаціонарні часові інтервали електроспоживання, при цьому використання швидкодіючої системи управління активним фільтром нерационально. Підвищена частота комутації вентилів на таких інтервалах знижує ефективність використання фільтру. У той же час перехід електротехнічної установки від одного квазістаціонарного стану до іншого може відбуватись досить швидко (наприклад керовані випрямлячі), при цьому потрібна висока швидкодія активного фільтру.

Відповідно до [6] режими роботи активного фільтру розділяють на сталий і динамічний режим роботи. Під сталим режимом роботи перетворювача слід розуміти його роботу при малих значеннях відхилень  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проекцій струму на стороні змінного струму перетворювача (які не перевищують допустимої для них області  $h$ ), а під динамічним режимом – роботу перетворювача при відхиленнях  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проекцій струму, що перевищують припустиму область відхилень.

Алгоритм прогнозуючого управління силовим активним фільтром в трифазній мережі змінного струму реалізується наступним чином (рис. 4).

Контролюють напругу  $U_{DC}$  на стороні постійного струму перетворювача.

Здають припустиму область відхилень проекцій струму  $h$  [6].

Вимірюють струми навантаження  $i_{H_{abc}}$ , струми компенсатора  $i_{K_{abc}}$  та фазні напруги мережі  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$  на стороні змінного струму перетворювача.

Виконують перетворення фазних напруг мережі  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$ , струмів навантаження  $i_{H_{abc}}$ , і струмів компенсатора  $i_{K_{abc}}$  на стороні змінного струму перетворювача в нерухому систему координат " $\alpha$ - $\beta$ " [7].

Визначають миттєву активну і реактивну потужності навантаження в нерухомій системі координат " $\alpha$ - $\beta$ " [7].

Розділяють миттєві активну і реактивну потужності на дві складові: постійну (середню, шляхом інтегрування) та змінну:

$$\begin{aligned} p_l &= P_l + \tilde{p}_l, \\ q_l &= Q_l + \tilde{q}_l. \end{aligned} \quad (7)$$

Корисною складовою приймають тільки постійну активну потужність  $P_l$  з урахуванням, що в трифазній симетричній системі напруг в сталому режимі постійні складові активної  $P_l$  і реактивної  $Q_l$  потужності визначаються основною гармонікою струму мережі прямої послідовності, а змінні складові  $\tilde{p}_l$  і  $\tilde{q}_l$  визначаються гармоніками струму навантаження, відмінними від основної гармоніки, і струмами основної гармоніки зворотної послідовності, виділяють  $\tilde{p}_l$  і  $\tilde{q}_l$ .

Визначають заданий струм компенсатора в нерухомій системі координат " $\alpha$ - $\beta$ " [7]. Перетворюють фактичний струм компенсатора  $i_{K_{abc}}$  на стороні змінного струму перетворювача в нерухому систему координат " $\alpha$ - $\beta$ ".

Розраховують кут повороту вектора струму мережі  $\theta$  [6]. Формують тригонометричні функції  $\cos\theta$ ,  $\sin\theta$  від аргументу  $\theta$  ортогональної обертової координатної системи " $d$ - $q$ ".

Виконують перетворення фактичного струму компенсатора і заданого струму компенсатора із системи координат " $\alpha$ - $\beta$ " до обертової ортогональної системи координат " $d$ - $q$ " [7].

Визначають прогнозовані значення проєкцій  $U_d(m)$ ,  $U_q(m)$  вектора напруги, створюваного на стороні змінного струму перетворювача при даних можливих комбінаціях його відкритих і закритих силових ключів, виходячи з прогнозованих значень, згідно з таблицею [6], проєкцій вектора вихідної напруги  $U_\alpha(m)$ ,  $U_\beta(m)$  на осі нерухомої ортогональної координатної системи " $\alpha$ - $\beta$ ", з використанням наступних співвідношень:

$$\begin{bmatrix} U_d(m) \\ U_q(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha(m) \\ U_\beta(m) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

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

Виконують перетворення фазних напруг мережі координатної системи " $\alpha$ - $\beta$ " в систему координат " $d$ - $q$ ".

Розраховують у вигляді різниці прогнозованих проєкцій  $U_d(m)$ ,  $U_q(m)$  вектора напруги проєкцій  $u_d$ ,  $u_q$  вектора напруги мережі  $u$  прогнозовані значення проєкцій  $\Delta U_d(m)$ ,  $\Delta U_q(m)$  результуючого вектора напруги при всіх можливих комбінаціях відкритих і закритих силових ключів перетворювача:

$$\begin{aligned} \Delta U_d(m) &= U_d(m) - u_d, \\ \Delta U_q(m) &= U_q(m) - u_q. \end{aligned} \quad (9)$$

Визначають відхилення  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  між заданими  $i_{Kd}^*$ ,  $i_{Kq}^*$  й фактичними  $i_d$ ,  $i_q$  значеннями проєкцій (на осі зазначеної ортогональної обертової координатної системи " $d$ - $q$ ") вектора струму  $i$ :

$$\begin{aligned} \Delta i_d &= i_d^* - i_d, \\ \Delta i_q &= i_q^* - i_q. \end{aligned} \quad (10)$$

Через обчислені проєкції  $\Delta U_d(m)$ ,  $\Delta U_q(m)$  прогнозуемого вектора результуючої напруги і через відхилення  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проєкцій струму розраховують для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача значення  $F_1(m)$  першого прогнозуемого функціонала:

$$\begin{aligned} F_1(m) &= K_1 f_q \Delta U_q(m), \\ K_1 &= 1 + \text{sign}[f_d \Delta U_d(m)], \end{aligned} \quad (11)$$

де  $f_d$ ,  $f_q$  – гістерезисного типу релейні функції від відхилень проєкцій струму.

З розрахованих значень  $F_1(m)$  першого прогнозуемого функціонала знаходять екстремальне значення  $F_1^0$  даного функціонала у вигляді його максимуму, яке відповідає швидкодіючому регулюванню струму на стороні змінного струму перетворювача у динамічних режимах його роботи:

$$F_1^0 = \max\{F_1(m)\} \text{ при } m = m_1. \quad (12)$$

де  $m$  й  $m_1$  – відповідно можлива й відповідна екстремальному значенню першого функціонала комбінація відкритих і закритих силових ключів перетворювача.

Задають припустиму область (яка характеризується границею  $h$ ) відхилень проєкцій вектора струму на стороні змінного струму перетворювача, що відповідає сталим режимам роботи цього перетворювача, з якою порівнюють відхилення  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проєкцій вектора струму  $i$ . Причому, якщо відхилення  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проєкцій вектора струму виходять за межі припустимої області задають значення  $m^* = m_1$  комбінації відкритих і закритих силових ключів перетворювача таким, яке відповідає знайденому екстремальному значенню  $F_1^0$  першого прогнозуемого функціонала й забезпечує, швидкодіюче регулювання струму на стороні змінного струму перетворювача у динамічних режимах роботи.

Якщо по закінченні динамічного режиму регулювання струму на стороні змінного струму перетворювача хоча б одне з відхилень  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проєкцій струму досягає границі припустимої області відхилень, то встановлюють значення  $\Delta U_{d0}(m)$ ,  $\Delta U_{q0}(m)$ , що відповідають значенням проєкцій  $U_d(m)$ ,  $U_q(m)$  прогнозованих результуючих векторів напруги на границі припустимої області відхилень  $h$ , встановлюють значення  $\Delta i_{d0}$ ,  $\Delta i_{q0}$  відхилень  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проєкцій струму, які належать границям припустимої області відхилень  $h$  відповідно до співвідношення:

$$\begin{aligned} \Delta i_d &= \Delta i_{d0} - \frac{\Delta U_{d0}(m)}{L_\phi} \cdot t, \\ \Delta i_q &= \Delta i_{q0} - \frac{\Delta U_{q0}(m)}{L_\phi} \cdot t. \end{aligned} \quad (13)$$

Розраховують для всіх можливих комбінацій ( $m = 1, 2, \dots, 8$ ) відкритих і закритих силових ключів перетворювача значення  $F_2(m)$  другого прогнозуемого функціонала, задаючи наступні залежності:

$$\begin{aligned} F_2(m) &= \min\{F_{2d}(m), F_{2q}(m)\} \\ F_{2d}(m) &= \frac{\Delta i_{d0} + \{\text{sign}[\Delta U_{d0}(m)]\}h}{\Delta U_{d0}}, \\ F_{2q}(m) &= \frac{\Delta i_{q0} + \{\text{sign}[\Delta U_{q0}(m)]\}h}{\Delta U_{q0}}. \end{aligned} \quad (14)$$

з яких знаходять екстремальне значення  $F_2^0$  даного функціонала, що відповідає мінімально можливій частоті перемикань силових ключів перетворювача для сталих режимів роботи й досягається при комбінації  $m_2$  відкритих і закритих силових ключів перетворювача:

$$F_2^0 = \min\{F_2(m)\} \text{ при } m = m_2. \quad (15)$$

де  $m_2$  – відповідна екстремальному значенню другого функціонала комбінація відкритих та закритих силових ключів перетворювача.

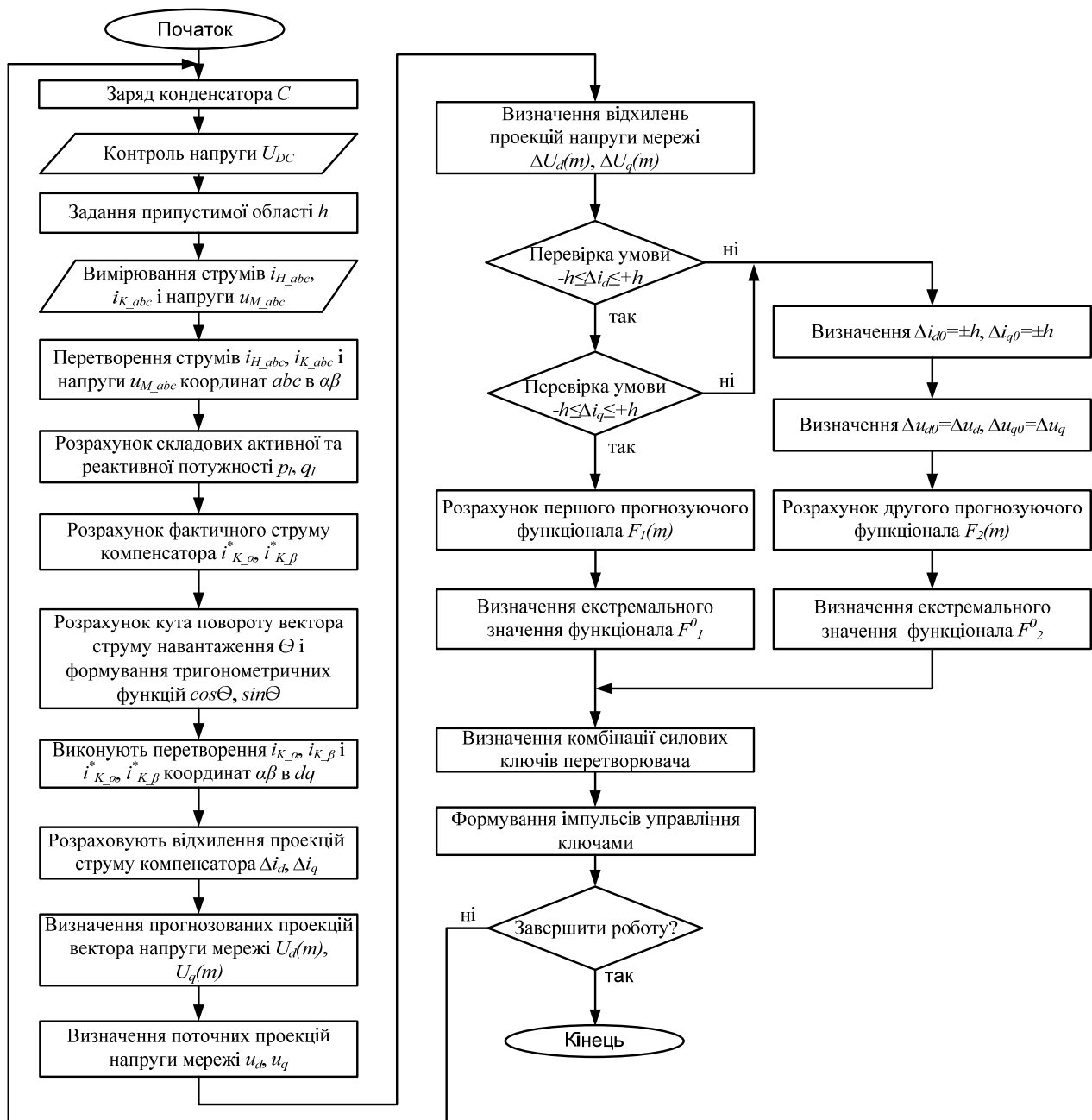


Рис. 4 Алгоритм прогнозуючого управління активним фільтром

Після входження відхилень  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проєкцій струму усередину припустимої області відхилень  $h$  (яка відповідає сталому режиму роботи перетворювача) задають комбінацію  $m^*$  відкритих і закритих силових ключів перетворювача рівної згаданому значенню  $m_2$ , яке відповідає екстремальному значенню  $F_2^0$  другого прогнозуючого функціонала й забезпечує мінімально можливу частоту перемикання силових ключів цього перетворювача в сталих режимах роботи.

#### ВИСНОВОК

Розділення режиму роботи трифазного силового активного фільтру на статичний і динамічний режими роботи, із використанням алгоритму прогнозуючого управління з визначенням двох функціоналів, яким відповідає комбінація відкритих та закритих силових

ключів перетворювача, дозволяє зменшити частоту комутації останніх.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Железко Ю.С. Потери електроенергії. Реактивна потужність. Качество електроенергії. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
2. Лохов С.М. Энергетические составляющие мощности вентиляльных преобразователей: учебное пособие. Ч.1. – Челябинск: ЮУрГУ, 1999. – 106 с.
3. Бурлака В.В., Поднебенная С.К., Дьяченко М.Д. Обзор методов управления активными фильтрами // Вісник ПДТУ. – 2011 – №22.
4. Juan YY, Dixon, Sebastian Tepper M., Luis Moran T. Analysis and evaluation of different modulation techniques for active power filters. IEEE, Chile, 1994, no.5/94, pp. 894-900.
5. Волков А.В., Скалько Ю.С. Потери мощности в системе "Автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией – асинхронный двигатель" // Електромашинно-

строение и электрооборудование. – Одесса: ОНПУ. – 2006. – №66 – С. 309-310.

6. Пат. 44892 У України. МПК (51) H02P 7/00, H02P 21/00. Спосіб векторного регулювання струму на стороні змінного струму трифазного чотириквadrantного перетворювача / О.В. Волков, В.О. Волков, М.Л. Антонов – №200900025 Заявлено 05.01.09; Опубл. 26.10.09. Бюл. №20. – 38 с.

7. Домнин И.Ф. Полупроводниковые компенсаторы неактивных составляющих полной мощности: автореф. дис. ... д. техн. наук: 05.09.12 / Домнин Игорь Феликсович; НТУ "ХПИ". – Х., 2008. – 36 с.

**REFERENCES:** 1. Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaia moshchnost'. Kachestvo elektroenergii* [Electricity losses. Reactive power. power quality]. Moscow, ENAS Publ., 2009. 456 p. 2. Lokhov S.M. *Energeticheskie sostavliaiushchie moshchnosti ventil'nykh preobrazovatelei: uchebnoe posobie. Ch.1* [Energy components for power rectifier converters: study guide. Part 1]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 1999. 106 p. 3. Burlaka V.V., Podnebennaia S.K., D'iachenko M.D. *Obzor metodov upravleniia aktivnymi fil'trami* [Review of active filters control methods]. *Visnyk Pryazov'skogo derzhavnogo tehnicnogo universytetu – Bulletin of Pryazovskiy State Technical University*, 2011, no.22. 4. Juan YY. Dixon, Sebastian Tepper M., Luis Moran T. Analysis and evaluation of different modulation techniques for active power filters. *IEEE*, Chile, 1994, no.5/94, pp. 894-900. 5. Volkov A.V., Skalko Yu.S. Power losses in system "voltage source inverter with pulse-width modulation – induction motor". *Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie – Electrical machine-building and electrical equipment*, 2006, no.66, pp. 309-310. 6. Volkov O.V., Volkov V.O., Antonov M.L. *Sposob vektornogo regulirovaniia toka na storone perezmen'nogo toka trekhfaznogo chetyrekhkvadrantnogo preobrazovatel'ia* [Method for vector control of current for AC side of three-phase four-quadrant converter]. Patent UA, no.44892, 2009. 7. Domnin I.F. *Poluprovodnikovye kompensatory neaktivnykh sostavliaiushchikh polnoi moshchnosti*. Autoref. diss. dokt. techn. nauk [Semiconductor components inactive compensators apparent power. Abstracts dr. techn. sci. diss.]. Kharkiv, 2008. 36 p.

*Надійшла (received) 05.12.2013*

*Власенко Руслан Володимирович<sup>1</sup>, аспірант, Бялобржеський Олексій Володимирович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,<sup>1</sup> Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, 39600, Полтавська обл., Кременчук, вул. Першотравнева, 20, тел/phone +38 066 7588712, e-mail: vla-ruslan@yandex.ru, seemAl@kdu.edu.ua*

*R.V. Vlasenko<sup>1</sup>, O.V. Bialobrzeski<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University  
20, Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine

**A predictive control algorithm for an active three-phase power filter.**

The paper deals with grid connection circuits for active filters, structures of active power filter control systems, and methods based on full capacity components determination. The existing structures of active power filter control and control algorithm adjustment for valve commutation loss reduction are analyzed. A predictive control algorithm for an active three-phase power filter is introduced.

**Key words – active power filter, predictive control, P-Q theory, reactive power compensation, modulation techniques.**