

## ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

---

УДК 621.314

### СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ВИХІДНОЇ НАПРУГИ АКТИВНОГО ЧОТИРИКВАДРАНТНОГО ВИПРЯМЛЯЧА

Канд. техн. наук В. П. Нерубацький, канд. техн. наук О. А. Плахтій, аспіранти  
А. В. Машура, Д. А. Гордієнко, старший викладач В. В. Варв'янська

### SYNTHESIS OF THE OUTPUT VOLTAGE REGULATOR OF THE ACTIVE FOUR-QUADRANT RECTIFIER

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, PhD (Tech.) O. A. Plakhtii, Postgraduate student  
A. V. Mashura, Postgraduate student D. A. Hordiienko, Senior lecturer V. V. Varvianska

***Анотація.** Проведено аналіз відомих систем керування активного чотириквadrантного випрямляча з широтно-імпульсною модуляцією, що застосовується на електричному рухомому складі залізничного транспорту, і методів визначення модального та симетричного оптимуму. Встановлено необхідність системи автоматичного регулювання для стабілізації вихідної напруги за умови зміни струму. Розроблено систему керування активного трифазного чотириквadrантного випрямляча на базі широтно-імпульсної модуляції. Визначено статичну регульовальну характеристику вихідної напруги активного випрямляча у функції величини струму навантаження та значення регульовального коефіцієнта. Визначено амплітудно-частотну характеристику каналу керування вихідної напруги активного випрямляча, що отримано шляхом додавання до керуючого сигналу додаткових частот і вимірювання даних частот у формі вихідної напруги. Визначено динамічну регульовальну характеристику та передавальну функцію активного випрямляча. Проведено моделювання активного випрямляча із системою керування та частотою широтно-імпульсної модуляції 10 кГц у програмному середовищі Matlab / Simulink. Виконано синтез регулятора вихідної напруги активного трифазного чотириквadrантного випрямляча з широтно-імпульсною модуляцією на основі модального оптимуму. Отримано осцилограми перехідного процесу вихідної напруги при авторегулюванні.*

***Ключові слова:** активний трифазний чотириквadrантний випрямляч, електричний рухомий склад, коефіцієнт потужності, регулятор вихідної напруги, рекуперація, широтно-імпульсна модуляція.*

***Abstract.** The analysis of known control systems of the active four-quadrant rectifier with pulse-width modulation applied on a rolling stock of electric railway transport, and methods of definition of modal and symmetric optimum is carried out. The necessity of the automatic regulation system for stabilization of the output voltage under the condition of current change is established. The control system of the active three-phase four-quadrant rectifier on the basis of pulse-width modulation is developed. The static control characteristic of the output voltage of the active rectifier as a function of the value of the load current and the value of the control factor is determined. It is shown that the*

control characteristic is nonlinear, and the static transmission coefficient of the active rectifier depends on the load current. The amplitude-frequency characteristic of the control channel of the output voltage of the active rectifier is determined, which is obtained by adding additional frequencies to the control signal and measuring these frequencies in the form of the output voltage. The dynamic control characteristic and transfer function of the active rectifier are determined. The simulation of an active rectifier with a control system and a pulse-width modulation frequency of 10 kHz in the Matlab / Simulink software environment was performed. The synthesis of the output voltage regulator of an active three-phase four-quadrant rectifier with pulse-width modulation is performed, which is made on the basis of the modal optimum. The oscillograms of the transient process of the output voltage during autoregulation are obtained. Given the fact that the static transmission factor of the control system of the active rectifier depends on the load current, to obtain the uniqueness of the transient process when regulating the output voltage, it is necessary to create an adaptive regulator for the output current of the active rectifier.

**Keywords:** active three-phase four-quadrant rectifier, electric rolling stock, power factor, output voltage regulator, recuperation, pulse-width modulation.

**Вступ.** Активні чотириквadrантні випрямлячі електричного рухомого складу залізничного транспорту мають низку переваг порівняно з класичними діодними і тиристорними випрямлячами:

– можливість активного формування синусоїдальної форми вхідного струму [1, 2];

– можливість формування коефіцієнта потужності, близького до одиниці (більше 0,99) [3, 4];

– можливість компенсації реактивної потужності та вищих гармонік струмів у мережі [5, 6];

– можливість регулювання та стабілізації вихідної напруги випрямляча [7];

– можливість двонаправленої передачі енергії назад з ланки постійного струму в трифазну мережу з підтримкою синусоїдального струму [8, 9].

На рис. 1 наведено силову схему активного трифазного чотириквadrантного випрямляча.

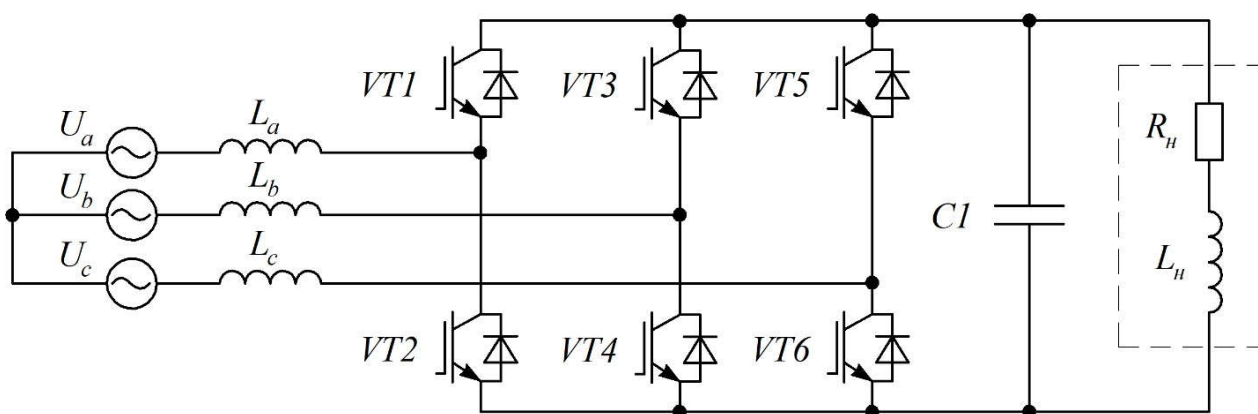


Рис. 1. Силовa схема активного трифазного чотириквadrантного випрямляча

Для опису балансу напруг у перетворювачі можна застосувати систему рівнянь:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u \\ u_c \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_c \\ u_c \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Диференціальне рівняння, що описує залежність вихідної напруги від величини фазних струмів з урахуванням миттєвих значень комутаційних функцій, має вигляд:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = S_a \cdot i_{Ca} + S_b \cdot i_{Cb} + S_c \cdot i_{Cc} - i_{dc} \quad (2)$$

Однак недоліком цього перетворювача є можливість зриву режиму корекції коефіцієнта потужності при зниженні вихідної напруги нижче амплітудного значення вхідної лінійної напруги, а також складність побудови регулятора вихідної напруги. Побудова системи автоматичного регулювання є важливим складником будь-якої перетворювальної системи [10, 11]. Для регулювання та стабілізації вихідної напруги активного випрямляча необхідна реалізація функції автоматичного регулювання вихідної напруги [12, 13].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [14, 15] наведено дослідження систем керування активного чотириквadrантного випрямляча, побудованих на принципі передбачуваного керування. Передбачуване керування дає змогу отримати оптимальний стан комутації, який можна легко вибрати без побудови віртуальних ортогональних величин порівняно з існуючими дослідженнями однофазних перетворювачів. Крім того, запропонований спосіб реалізує схеми перемикання з фіксованою частотою перемикання шляхом відповідного поділу стану нульової напруги і стану ненульової напруги без використання модулів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Запропонований метод має переваги простого оптимального вибору напруги і не використовує блок ШІМ порівняно з існуючими методами.

Ефективність запропонованого методу порівнювалася з традиційним методом прогнозного керування струмом зі змінною частотою перемикання та методом ШІМ на основі PI-контролера [16, 17]. Запропонований метод може генерувати шаблони комутації з постійною частотою перемикання, подібно до методу ШІМ на основі PI-контролера під час стаціонарного режиму, що полегшує вирішення проблем проєктування фільтрів. Крім того, запропонований метод дає змогу підтримувати швидку динаміку звичайного методу прогнозного регулювання струму, який є швидшим, ніж метод ШІМ на основі PI-контролера. Недоліком цих досліджень є невизначеність, за яким критерієм було обрано саме PI-регулятор, і незрозуміло, яким чином було виконано розрахунок відповідних коефіцієнтів регулятора.

Таким чином, завдання визначення динамічних властивостей, визначення передавальної функції активного випрямляча та синтезу регулятора вихідної напруги є актуальним невирішеним завданням.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи є визначення методу синтезу регулятора вихідної напруги активного трифазного чотириквadrантного випрямляча з широтно-імпульсною модуляцією для електричного рухомого складу залізничного транспорту, що дасть можливість отримання однозначності перехідного процесу при регулюванні та стабілізації вихідної напруги активного випрямляча. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- побудувати статичну регульовальну характеристику вихідної напруги активного випрямляча;
- визначити амплітудно-частотну характеристику каналу керування вихідної напруги активного випрямляча;
- визначити передавальну функцію активного випрямляча;

– визначити динамічну регульовальну характеристику активного випрямляча;

– виконати синтез регулятора вихідної напруги, налаштованого на модальний оптимум.

**Основна частина дослідження.**

Статична регульовальна характеристика вихідної напруги активного трифазного чотириквadrантного випрямляча електричного рухомого складу може бути отримана виходячи з рівняння балансу потужності:

$$3 \cdot U_{вх} \cdot I_{вх} \cdot \eta \cdot \lambda = U_{вих} \cdot I_{вих}, \quad (3)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії активного випрямляча;  $\lambda$  – коефіцієнт потужності;

$U_{вх}$  – середньоквадратичне значення вхідної фазної напруги;  $I_{вх}$  – середньоквадратичне значення вхідного струму;  $U_{вих}$  – середньоквадратичне значення вихідної напруги випрямляча;  $I_{вих}$  – середньоквадратичне значення вихідного струму активного випрямляча.

Для активних трифазних чотириквadrантних перетворювачів характерні два типи систем керування. Перший тип побудовано на основі гістерезисної модуляції, а другий тип – на основі широтно-імпульсної модуляції [18, 19].

На рис. 2 наведено систему керування активного трифазного чотириквadrантного випрямляча на базі широтно-імпульсної модуляції.

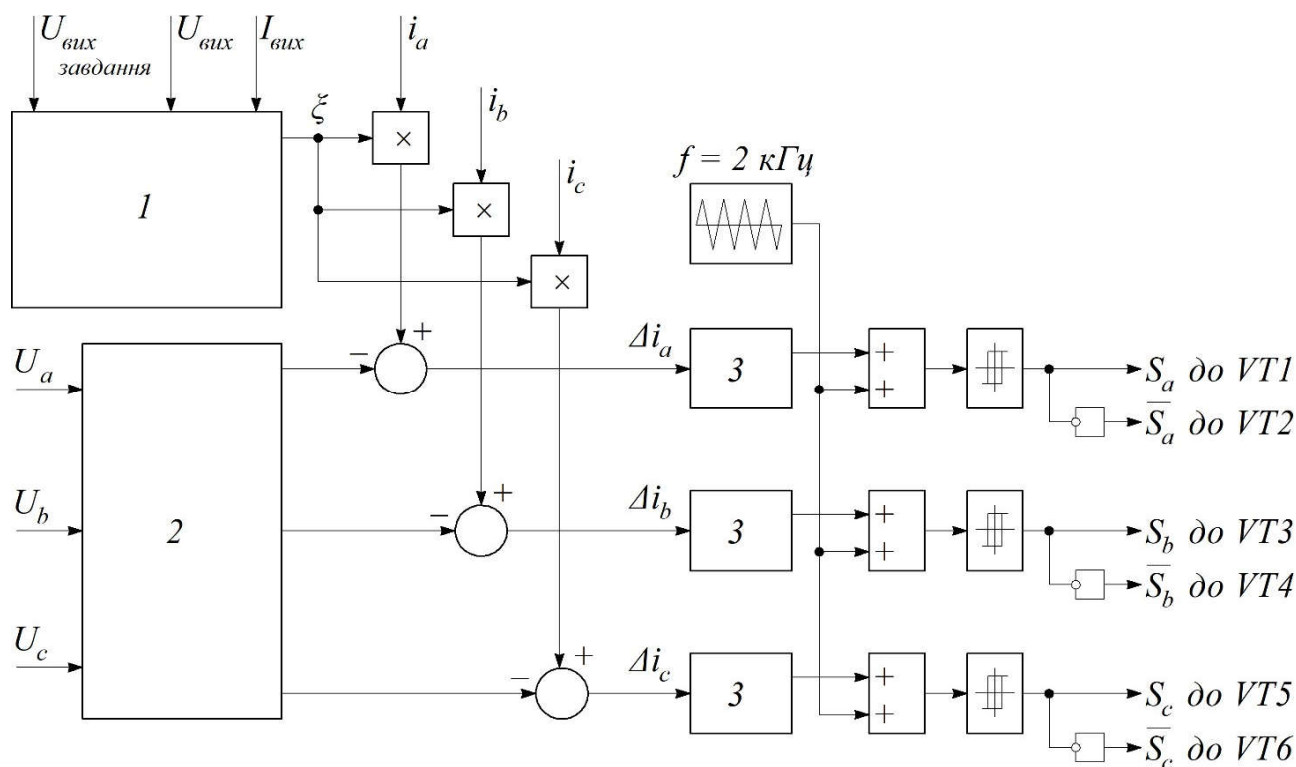


Рис. 2. Система керування активного трифазного чотириквadrантного випрямляча на базі широтно-імпульсної модуляції:

1 – регулятор вихідної напруги; 2 – блок виділення перших гармонік;

3 – фільтр низьких частот

Система керування активного випрямляча активно формує вхідний струм,

який за формою повторює форму вхідної напруги активного випрямляча [20, 21].

Проте амплітуда, необхідна для формування заданої величини вихідної напруги активного випрямляча, задається через регулювальний коефіцієнт, вхідний струм може бути визначено таким виразом [22]:

$$I_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} \cdot \xi, \quad (4)$$

де  $\xi$  – регулювальний коефіцієнт системи керування, що визначає відношення вхідного струму та вхідної напруги активного випрямляча.

Таким чином, значення вихідної напруги активного випрямляча електричного рухомого складу через регулювальний коефіцієнт  $\xi$  може бути визначено за такими виразами:

$$U_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вх}}^2 \cdot \xi \cdot \eta \cdot \lambda}{I_{\text{вих}}}; \quad (5)$$

$$U_{\text{вих}} = \sqrt{\frac{U_{\text{вх}} \cdot U_{\text{вх}} \cdot \xi \cdot \eta \cdot \lambda}{R_n}}. \quad (6)$$

При цьому необхідно зазначити, що режим випрямлення реалізується при додатному значенні регулювального коефіцієнта  $\xi$  при підтриманні коефіцієнта потужності, рівного одиниці  $\lambda = 1$ , а режим рекуперації реалізується при від'ємному значенні  $\xi$ . У зв'язку з тим, що режим корекції коефіцієнта потужності та формування синусоїдального вхідного струму активного випрямляча можливий лише за умови, коли вихідна напруга більша, ніж амплітудне значення вхідної напруги [23, 24],

$$U_{\text{вих}} \geq U_{\text{вх}} \cdot \sqrt{2}. \quad (7)$$

Статичну регулювальну характеристику вихідної напруги активного випрямляча електричного рухомого складу в режимах випрямлення та рекуперації може бути подано 3D-площинами (рис. 3).

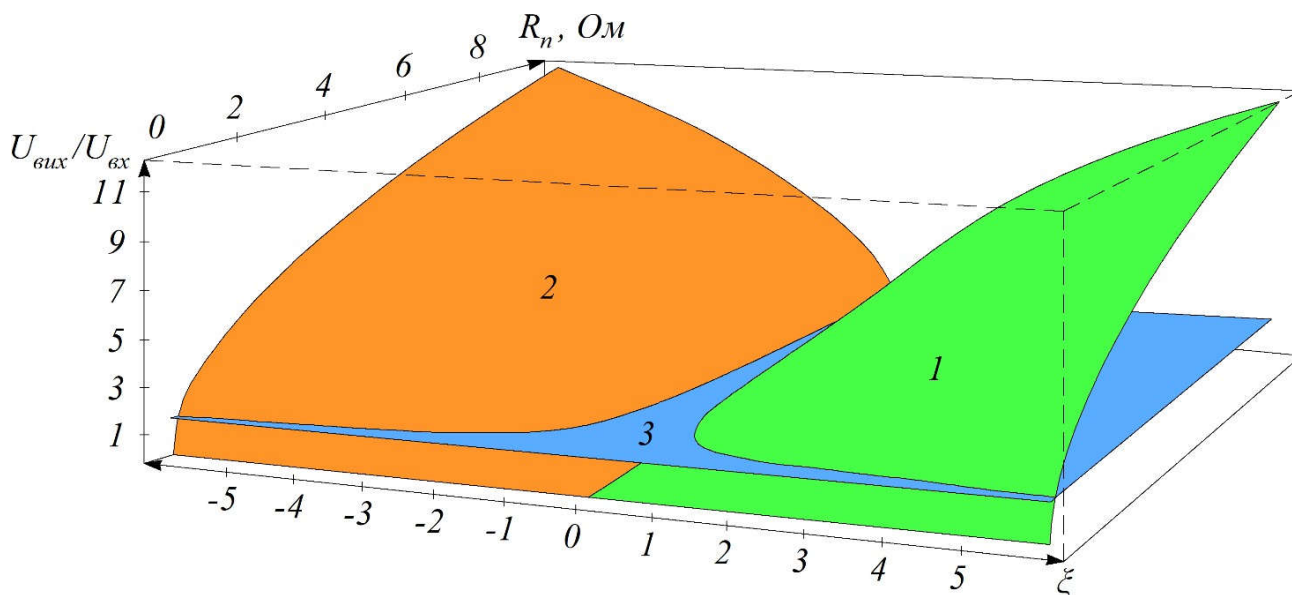


Рис. 3. Статична регулювальна характеристика вихідної напруги активного випрямляча: 1 – у режимі випрямлення; 2 – у режимі рекуперації; 3 – обмеження в регулюванні вихідної напруги

Таким чином, визначено нелінійний характер статичної регулювальної характеристики вихідної напруги активного випрямляча у функції величини струму навантаження і значення регулювального коефіцієнта  $\zeta$ .

Для стабілізації вихідної напруги за умови зміни струму навантаження система автоматичного регулювання є необхідною [25, 26]. Інакше при зміні струму навантаження при тому самому значенні регулювального коефіцієнта  $\zeta$ , величина вихідної напруги буде змінюватися.

Одними з методів синтезу регуляторів є частотні методи, такі як методи визначення модального та симетричного оптимуму [27, 28]. Для синтезу передавальної функції регулятора вихідної напруги за частотними методами необхідним є визначення амплітудно-частотних характеристик об'єкта керування [29, 30].

У даному випадку об'єкт керування є імпульсним, що пов'язано з широтно-імпульсною модуляцією в системі керування.

Амплітудно-частотні характеристики каналу керування вихідної напруги активного випрямляча отримано шляхом додавання сигналу керування  $\zeta$  гармонік з різними частотами (від 1 Гц до 10 кГц) і вимірюванням даної частоти у формі вихідної напруги активного випрямляча.

Обмеження цього методу полягає в тому, що необхідно додавати частоти, які не містяться у спектрі вихідної напруги активного випрямляча.

Даний експеримент проводився на розробленій комп'ютерній моделі активного випрямляча із системою керування із частотою ШІМ 10 кГц (рис. 4) в програмному середовищі Matlab / Simulink версії 2017b.

Параметри імітаційної моделі активного випрямляча наведено в табл. 1.

Результати моделювання, а саме визначення амплітуди доданих сигналів у канал керування у формі вихідної напруги, наведено в табл. 2.

Таблиця 1

Параметри активного трифазного чотириквadrантного випрямляча

| Параметр  | Значення    |
|---|-------------|
| Середньоквадратичне значення вхідної напруги, В | 100         |
| Індуктивність вхідного дроселя, мГн             | 2           |
| Опір вхідного дроселя, мОм                      | 1           |
| Ємність вхідного конденсатора, мФ               | 60          |
| Опір навантаження, Ом                           | від 1 до 10 |

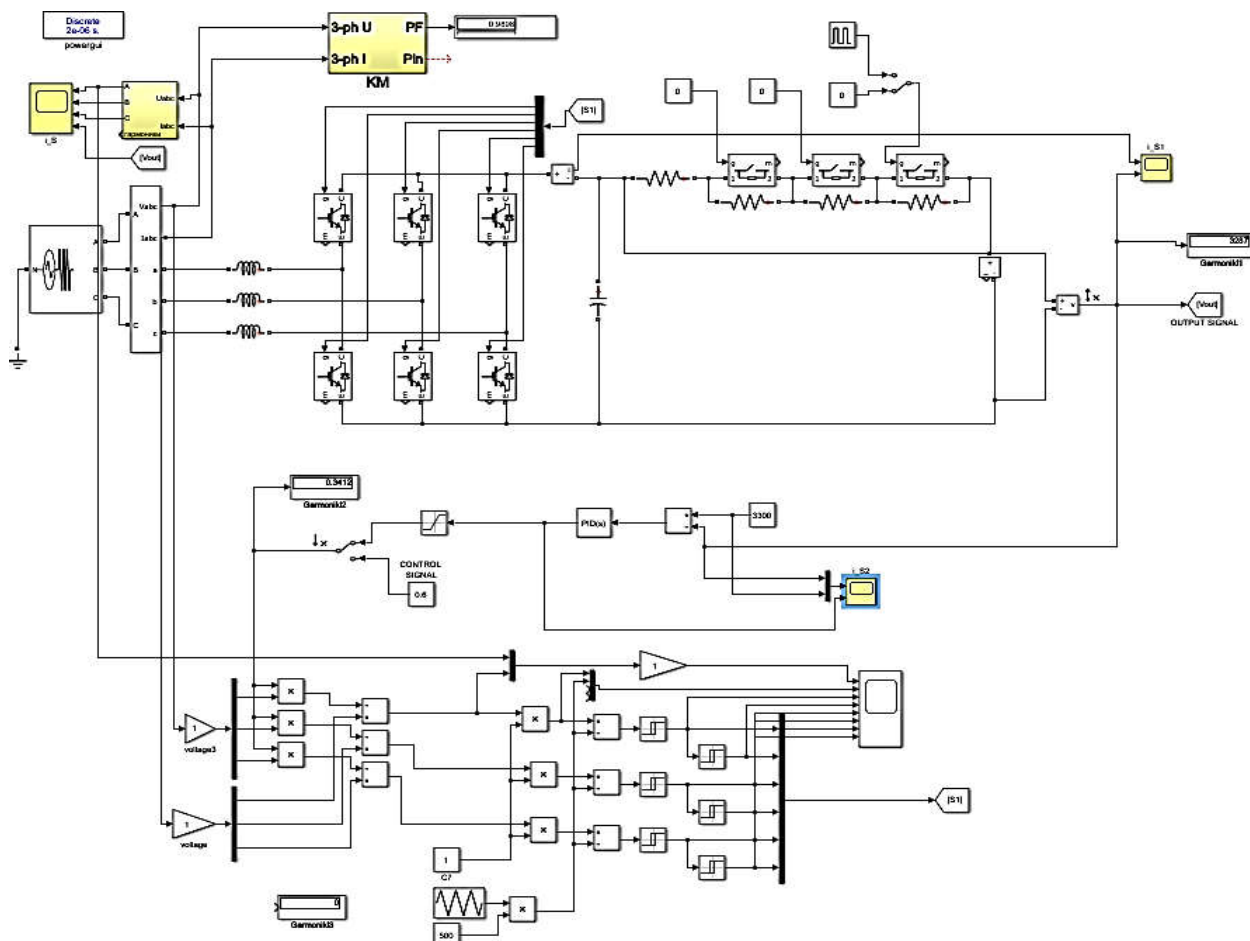


Рис. 4. Matlab-модель активного трифазного чотириквADRANTного випрямляча

Таблиця 2

Амплітудно-частотні характеристики каналу керування вихідної напруги активного випрямляча з ШІМ

| Частота доданого сигналу, Гц | Амплітуда доданого сигналу у формі вихідної напруги, В | Коефіцієнт передачі, дБ |
|------------------------------|--|-------------------------|
| 0,1                          | 47,48  | 35,23021                |
| 1                            | 45,98  | 34,85138                |
| 3                            | 37,64  | 34,01299                |
| 10                           | 17,25  | 26,73578                |
| 40                           | 5,704  | 15,12359                |
| 80                           | 4,238  | 12,54322                |
| 300                          | 2,392  | 7,575224                |
| 600                          | 1,339  | 2,535612                |
| 1200                         | 0,7063   | -3,02022                |
| 2500                         | 0,3974   | -8,01544                |
| 5000                         | 0,2016   | -13,9102                |
| 10000                        | 0,1125   | -18,9769                |
| 20000                        | 0,07693  | -22,2781                |

|       |       |          |
|-------|-------|----------|
| 40000 | 0,062 | -24,1522 |
|-------|-------|----------|

Отриману в ході експерименту логарифмічну амплітудно-частотну характеристику каналу керування вихідної

напруги активного випрямляча наведено на рис. 5.

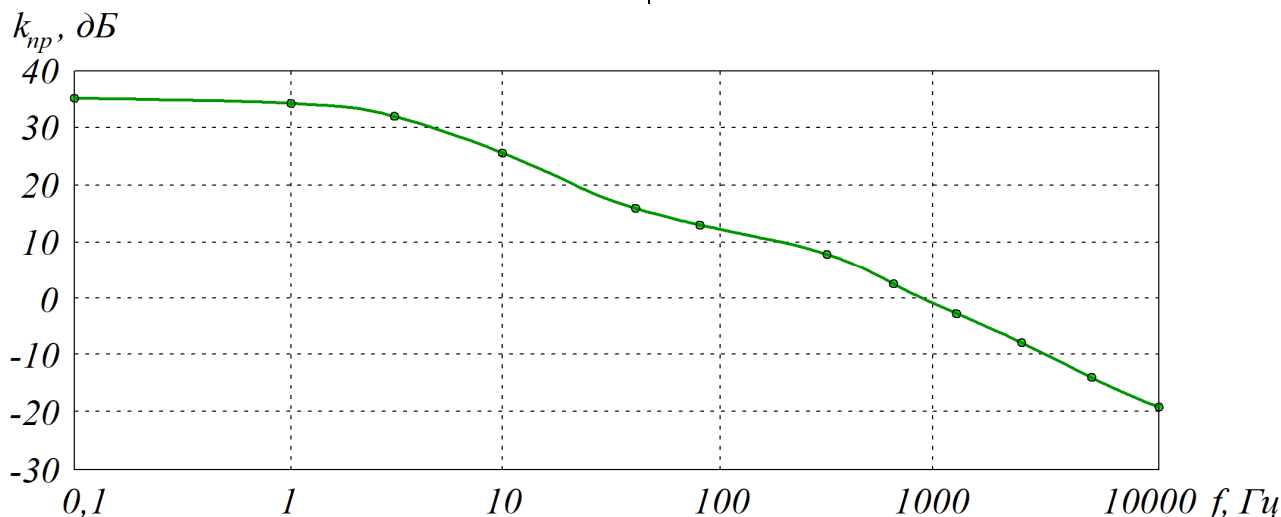


Рис. 5. Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика каналу керування вихідної напруги

Для налаштування системи автоматичного керування на модальний оптимум застосовано структурну схему

одноконтурної системи автоматичного регулювання, що наведено на рис. 6.

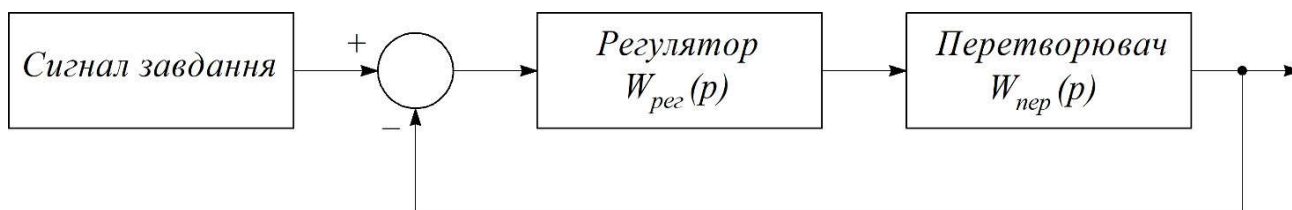


Рис. 6. Структурна схема одноконтурної системи автоматичного регулювання

При налаштуванні системи автоматичного регулювання на модальний оптимум ця система буде мати такі властивості:

- час виходу на установлене значення складає  $4,7 \cdot T_{\mu}$  (рис. 7, а);
- величина перерегулювання складає 4,3 % (рис. 7, а);

– характерна форма логарифмічної амплітудно-частотної характеристики (ЛАЧХ) (рис. 7, б);

– запас стійкості по фазі на частоті зрізу складає 63 градуси (рис. 7, б).



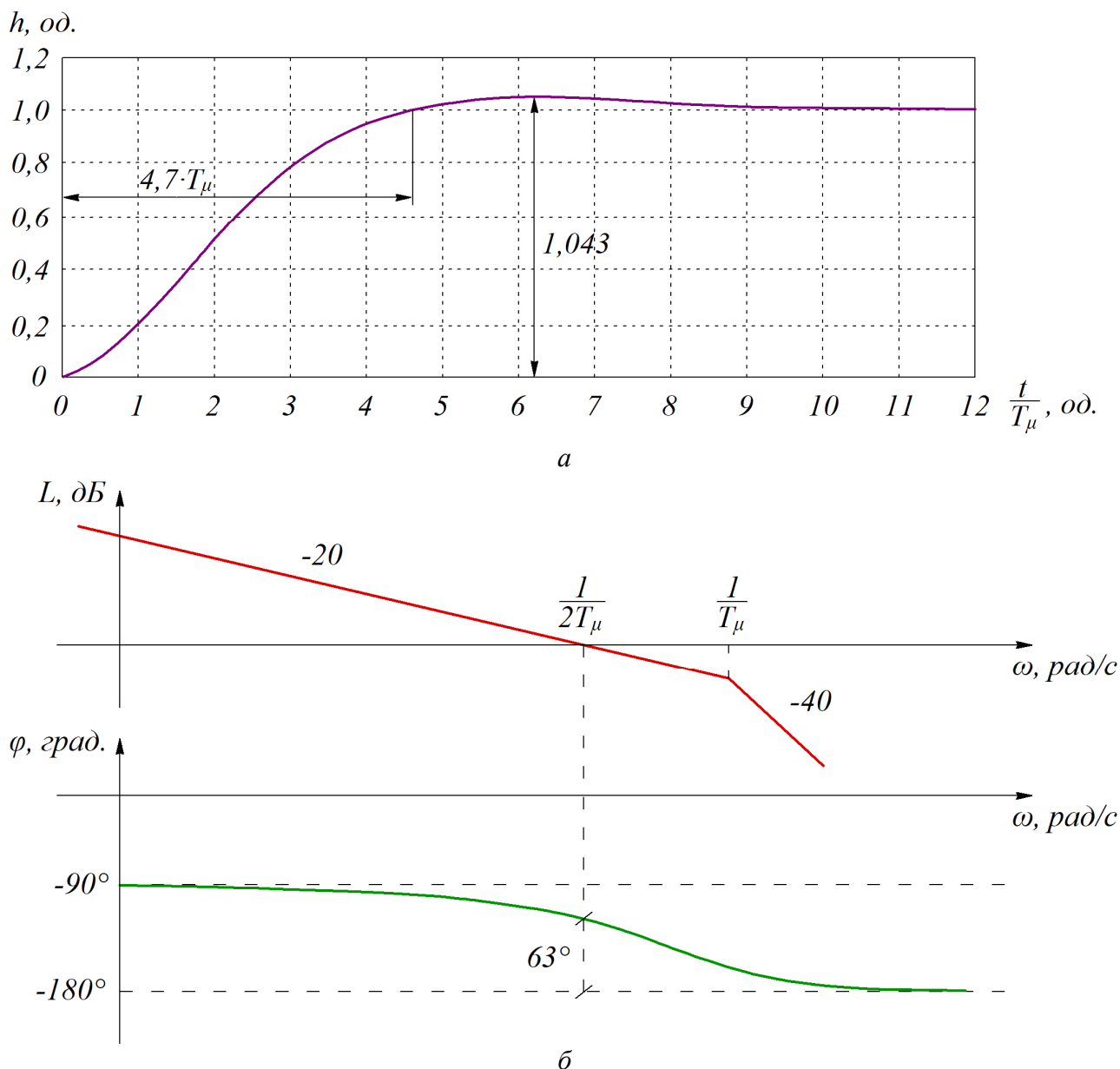


Рис. 7. Властивості системи авторегулювання, налаштованої на модальний оптимум:  
 а – типовий перехідний процес при ступінчастому завданні; б – амплітудно-частотна характеристика замкнутого контуру регулювання (запас системи авторегулювання по фазі)

Для бажаної ЛАЧХ, налаштованої на модальний оптимум, буде характерною передавальна функція:

$$W_p(p) = \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot (T_\mu \cdot p + 1)} \quad (8)$$

Час перехідного процесу замкнутого контуру автоматичного регулювання залежить від обраної частоти зрізу та обраного значення сталої  $T_\mu$ .

Задані значення бажаного часу виходу на усталений режим у  $T_{вих} = 0,2$  с. Тоді значення  $T_\mu$  для бажаної ЛАЧХ складатиме:

$$T_{\mu} = \frac{T_{вих}}{4,7} = \frac{0,2}{4,7} = 0,0425 \text{ с.} \quad (9)$$

Налаштування системи автоматичного регулювання проводиться з допущенням того, що отримана в ході експерименту логарифмічна амплітудно-частотна характеристика апроксимується в аперіодичну функцію першого порядку [31]:

$$W_{np}(p) = \frac{k_{np}}{T_0 \cdot p + 1}, \quad (10)$$

де  $k_{np}$  – статичний коефіцієнт передачі активного перетворювача;  $T_0$  – час зрізу АЧХ перетворювача.

У ході проведеного експерименту відповідно до рис. 5 значення  $k_{np}$  дорівнює 34 дБ (у функції це рази – 50 разів). Відповідно до цього значення за табл. 2 частота зрізу АЧХ перетворювача дорівнює 3 Гц.

Для побудови графіків необхідно використовувати значення не часу, а частоти в одиницях вимірювання – рад/с.

Знаючи значення часу зрізу АЧХ, можна обчислити частоту зрізу за виразом [32]:

$$\omega = \frac{1}{T_0}. \quad (11)$$

Звідси

$$T_0 = \frac{1}{\omega_0}. \quad (12)$$

Частота зрізу АЧХ перетворювача  $\omega_0$  складає 3 Гц, що дорівнює 18,8 рад/с.

$$T_0 = \frac{1}{18,8} = 0,053 \text{ с.}$$

При створенні замкненої системи автоматичного регулювання передавальна функція замкненого контуру має вигляд:

$$W_{np}(p) = \frac{50}{0,053 \cdot p + 1}.$$

Таким чином, отримана передавальна функція регулятора вихідної напруги, налаштованого на модальний оптимум, буде мати вигляд:

$$W_{pez}(p) = \frac{k_m \cdot (T_0 \cdot p + 1)}{(T_{\mu} \cdot p + 1)}, \quad (13)$$

де  $T_{\mu} = 0,042$  с ( $\omega_{\mu} = 24$  рад/с);  $T_{2\mu} = 0,084$  с ( $\omega_{2\mu} = 12$  рад/с);  $k_m = -8$  дБ (при переведенні в рази дорівнює 0,4).

Бажаний час перехідного процесу  $T_{nn}$  відображається при кроці 0,2 секунди.

Постійна часу, пов'язана із частотою зрізу, складає:

$$T_{nn} = \frac{T_{\mu}}{4,7}; \quad (14)$$

$$T_{\mu} = \frac{0,2}{4,7} = 0,042 \text{ с.}$$

Частота зрізу бажаної ВАХ складає:

$$\omega_{zp} = \omega_{2\mu} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu}}; \quad (15)$$

$$\omega_{zp} = \omega_{2\mu} = \frac{1}{2 \cdot 0,042} = 12 \text{ рад/с.}$$

Передавальна функція зворотного зв'язку буде мати вигляд:

$$W_{зам}(p) = \frac{W_{pez}(p) \cdot W_{np}(p)}{1 + W_{pez}(p) \cdot W_{np}(p)}; \quad (16)$$

$$W_{зам}(p) = \frac{\frac{k_m \cdot (T_\mu \cdot p + 1)}{T_1 \cdot p \cdot (T_{2\mu} \cdot p + 1)} \cdot \frac{k_{np}}{T_0 \cdot p + 1}}{1 + \frac{k_m \cdot (T_\mu \cdot p + 1)}{T_1 \cdot p \cdot (T_{2\mu} \cdot p + 1)} \cdot \frac{k_{np}}{T_0 \cdot p + 1}}. \quad (17)$$

За потреби прискорити час перехідного процесу відносно кроку в бажаній ВАХ потрібно зменшити  $T_m$ , що призведе до збільшення частоти зрізу бажаної ВАХ  $\omega_{зр}$ .

На рис. 8 наведено результати моделювання вихідної напруги при ступінчастому завданні величини вихідної напруги 300 В.

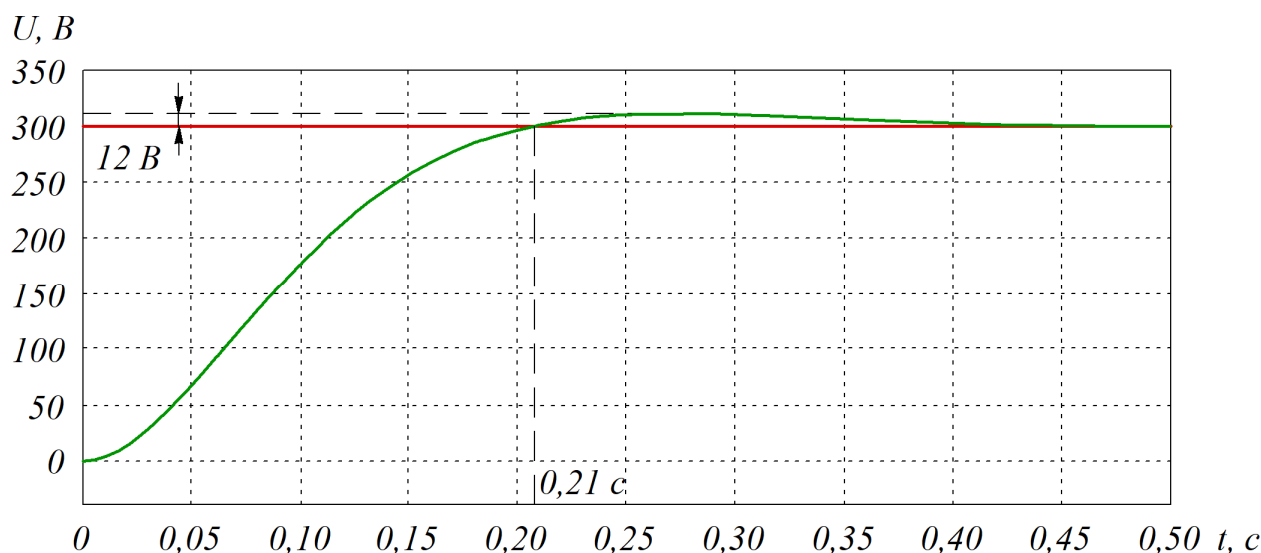


Рис. 8. Моделювання вихідної напруги при ступінчастому завданні

Як видно з рис. 8, величина перерегулювання вихідної напруги становить 12 В, тобто 4 %, що передбачалось при завданні системи на модальний оптимум.

При цьому час виходу на встановлене значення складає 0,21 с, що відповідає значенню  $T_\mu = 0,0$  с.

**Висновки.** На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– аналітичні вирази дають змогу визначити статичні регульовальні характеристики активного випрямляча електричного рухомого складу залізничного

транспорту; показано, що регульовальна характеристика нелінійна, а статичний коефіцієнт передачі активного випрямляча залежить від струму навантаження;

– динамічні регульовальні характеристики активного випрямляча представлено шляхом отримання передавальної функції активного трифазного випрямляча на основі аналізу частотного значення у вихідній напрузі активного випрямляча. У канал керування додано сигнали різної частоти;

– на основі отриманої АЧХ перетворювача методом налаштування системи для модального оптимуму виконано синтез регулятора вихідної напруги, отримано осцилограми перехідного процесу вихідної напруги при авторегулюванні;

– враховуючи те, що статичний коефіцієнт передачі системи керування активного випрямляча залежить від струму навантаження, то для отримання однозначності перехідного процесу при

регулюванні вихідної напруги необхідно створення адаптивного регулятора за параметром вихідного струму активного випрямляча.

*Роботу виконано за держбюджетною темою «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах» (державний реєстраційний номер 0121U109440).*

### Список використаних джерел

1. Chomat M. Operation of active front-end rectifier in electric drive under unbalanced voltage supply. *Electric Machines and Drives*. 2011. P. 195–216. DOI: 10.5772/14295.
2. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Karpenko N., Hordiienko D., Butova O., Khoruzhevskyi H. Research into energy characteristics of single-phase active four-quadrant rectifiers with the improved hysteresis modulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 5, No. 8 (101). P. 36–44. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.179205.
3. Rodriguez J. R., Dixon J. W., Espinoza J. R., Pontt J., Lezana P. PWM regenerative rectifiers: state of the art. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2005. Vol. 52 (1). P. 5–22. DOI: 10.1109/tie.2004.841149.
4. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskyi H. Prospects for the development of power electronics by application of technologies for production of power semiconductor switches based on silicon carbide. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2020. Vol. 5, Issue 4. P. 170–173.
5. Vazquez S., Leon J., Franquelo L., Rodriguez J., Young H., Marquez A., Zanchetta P. Model Predictive Control: a review of its applications in power electronics. *IEEE Ind Electron Mag*. 2014. Vol. 8 (1). P. 16–31.
6. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Control and accounting of parameters of electricity consumption in distribution networks. *2021 XXXI International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*. 2021. P. 114–117. DOI: 10.1109/MMA52675.2021.9610907.
7. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Sushko D., Ryshchenko I., Tsybulnyk V., Hordiienko D. Improving energy characteristics of AC electric rolling stock by using the three-level active four-quadrant rectifiers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4, No. 8 (100). P. 6–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174112.
8. Wei L., Jankovic Z., Patel Y. P., Hu J. Single phase precharge control method for active front end rectifier. *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/ecce.2016.7855436.
9. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Ananieva O., Zinchenko O. Analysis of the Smart Grid concept for DC power supply systems. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2019. Vol. 4, Issue 4. P. 179–182.
10. Venkatramanan D., Bharadwaj P., Adapa A. K., John V. Power Conversion Technologies for High-Performance AC Micro-grid. *INAE Lett*. 2019. Vol. 4, Issue 1. P. 27–35.
11. Barbie E., Kuperman A., Rabinovici R. A Novel Active Three-Phase Multilevel Power Factor Correction Rectifier. *2018 IEEE International Conference on the Science of Electrical Engineering (ICSEE)*. 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICSEE.2018.8646113.

12. Щербак Я. В., Плахтій О. А., Нерубацький В. П. Регулювальні характеристики активного чотириквADRантного перетворювача в режимах випрямлення і рекуперації. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 6. С. 26–31. DOI: 10.15407/techned2017.06.026.
13. Chan R., Kwak S. Model-based predictive current control method with constant switching frequency for single-phase voltage source inverters. *Energies*. 2017. Vol. 10. P. 1–21. DOI: 10.3390/en10111927.
14. Kouro S., Cortes P., Vargas R., Ammann U., Rodriguez J. Model predictive control – a simple and powerful method to control power converters. *IEEE Trans Ind Electron*. 2009. Vol. 56 (6). P. 1826–1838. DOI: 10.1109/TIE.2008.2008349.
15. Song W., Ma J., Zhou L., Feng X. Deadbeat predictive power control of single-phase three-level neutral-point-clamped converters using space-vector modulation for electric railway traction. *IEEE Trans Power Electron*. 2015. Vol. 31. P. 721–732. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2400924.
16. Bohra A., Sajeesh D., Patel C., Saldanha M. Modulation techniques in single phase PWM rectifier. *IJCA Proceedings on International Conference on Advances in Science and Technology*. 2016. P. 5–7.
17. Deng F., Chen Z. Voltage-Balancing Method for Modular Multilevel Converters Switched at Grid Frequency. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015. No. 62(5). P. 2835–2847. DOI: 10.1109/tie.2014.2362881.
18. Зниження динамічних втрат в активному однофазному чотириквADRантному перетворювачі з покращеним алгоритмом гістерезисної модуляції / О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, Д. Л. Сушко, В. Є. Кавун. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. Вип. 51. С. 88–94. DOI: 10.15407/publishing2018.51.088.
19. Martinez-Rodrigo F., Ramirez D., Rey-Boue A., de Pablo S., Herrero-de Lucas L. Modular Multilevel Converters: Control and Applications. *Energies*. 2017. No. 10 (11): 1709. 26 p. DOI: 10.3390/en10111709.
20. Dai P., Guoand G., Gong Z. A Selection Precharge Method for Modular Multilevel Converter. *International Journal of Control and Automation*. 2016. Vol. 9, No. 4. P. 161–170. DOI: 10.14257/ijca.2016.9.4.16.
21. Deng Y., Wang Y., Teo K. H., Harley R. G. A Simplified Space Vector Modulation Scheme for Multilevel Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016. P. 1–14. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2429595.
22. Нерубацький В. П. Регулювальні характеристики 4QS-перетворювача з гістерезисною системою керування. *Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика: матеріали III всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, фахівців, аспірантів (Маріуполь, 11–12 травня 2017 р.)*. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2017. С. 112–114.
23. Bashir S. B., Memon Z. A. An Improved Voltage Balancing Method for Grid Connected PV System Based on MMC Under Different Irradiance Conditions. *2018 IEEE 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. 2018. P. 865–868. DOI: 10.1109/MWSCAS.2018.8623947.
24. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Kotlyarov V. Analysis of topologies of active four-quadrant rectifiers for implementing the INDUSTRY 4.0 principles in traffic power supply systems. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2019. Vol. 4, Issue 3. P. 106–109.
25. Щербак Я. В., Нерубацький В. П. Динамічний коефіцієнт передачі статичного перетворювача системи автоматичного регулювання електричним гальмуванням. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2015. Вип. 153. С. 5–12. DOI: 10.18664/1994-7852.153.2015.63861.
26. Щербак Я. В., Нерубацький В. П. Динамічні характеристики системи автоматичного регулювання струму в режимі електричного гальмування. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2013. № 1. С. 58–63.

27. Chang H. T. Chen H. C. Voltage Balancing Control for Four-Switch Three-Phase Active Front-End Rectifier. *2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition*. 2021. P. 1993–1998. DOI: 10.1109/ECCE-Asia49820.2021.9479135.

28. Tarisciotti L., Burgos M., Claudio D., Garcia C., Rodriguez J. Predictive zero-sequence control of parallel three-phase active rectifiers. *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2020. P. 2584–2591. DOI: 10.1109/ECCE44975.2020.9236146.

29. Rebollo E., Talavera D., Granizo R. Use of Discharge Resistor to Improve Transient De-Excitation in Brushless Synchronous Machines. *Energies*. 2019. Vol. 12. P. 1–17. DOI: 10.3390/en12132528.

30. Tandukar S., Baldwin T., Chiu S., Hamlett B. Education of Control and Over-Current Protection Strategy for Active Three-Phase Rectifiers. *2020 52nd North American Power Symposium (NAPS)*. 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/NAPS50074.2021.9449767.

31. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Podnebenna S. Synthesis of a regulator recuperation mode a DC electric drive by creating a process of finite duration. *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. P. 272–277. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575792.

32. Scherbak Ya., Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D., Shelest D., Semenenko Yu. Analysis of exact and approximating dependences of the active resistance of conductor on the frequency of current under the action of skin effect. *IEEE EUROCON 2021 – 19th International Conference on Smart Technologies*. P. 438–442. DOI: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535581.

---

Нерубацький Володимир Павлович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Плахтій Олександр Андрійович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Машура Артем В'ячеславович, аспірант кафедри промислової та біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +38 (099) 000-23-34. E-mail: artemmashura94@gmail.com. ORCID: 0000-0002-6016-7801.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 612-02-12. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Варв'янська Вікторія Віталіївна, старший викладач кафедри промислової та біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +38 (098) 405-20-56. E-mail: tvita62@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-4962-6245.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (057) 730-10-76. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Plakhtii Alexandr Andreevych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Mashura Artem Vyacheslavovych, Postgraduate, Department of Industrial and Biomedical Electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Tel.: +38 (099) 000-23-34. E-mail: artemmashura94@gmail.com. ORCID: 0000-0002-6016-7801.

Hordiienko Denys Anatolievych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 612-02-12. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Varvianska Viktoriia Vitalievna, Senior Lecturer, Department of Industrial and Biomedical Electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Tel.: +38 (098) 405-20-56. E-mail: tvita62@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-4962-6245.

Статтю прийнято 12.11.2021 р.