

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ УСТАНОВОК ЕШЗ/ЕШП З ФАЗОІМПУЛЬСНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ТИРИСТОРІВ

Ю.М. Ланкін, В.Ф. Семікін, Є.М. Байштрук, І.Ю. Романова

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [lankin.y.n@gmail.com](mailto:lankin.y.n@gmail.com)

Розглянуто характеристики трансформаторних джерел живлення з фазоімпульсним регулюванням тиристорних кон-такторів, що забезпечують плавне регулювання напруги. Основний їх недолік – неприпустимо низький коефіцієнт потужності. Розглянуто характеристики та рекомендовані області застосування дво-, три- та чотириступінчастих джерел живлення із фазоступінчастим регулюванням, що мають високий коефіцієнт потужності в широкому діапазоні регулювання напруги. Системи фазоступінчастого регулювання дуже добре підходять для модернізації існуючих джерел живлення зі ступінчастим регулюванням, підвищуючи якість продукції, що випускається, і технологічні можливості при збереженні високих енергетичних характеристик. Бібліогр. 5, табл. 1, рис. 5.

*Ключові слова:* електрошлакові технології, джерела живлення змінного струму, фазоімпульсне регулювання, фазо-ступінчасте регулювання, коефіцієнт потужності

**Вступ.** В електрошлакових технологіях дже-релом тепла, яке витрачається на плавлення елек-тродного дроту або металу, що переплавляється, є розплавлений електропровідний шлак, через який проходить струм, що викликає його нагрів. У діапазоні робочих температур ванна розплав-леного шлаку для джерела живлення є практич-но чисто резистивним лінійним навантаженням. Електрошлаковий процес на змінному струмі від-бувається стійкіше, ніж на постійному. Тому в більшості випадків для ЕШЗ/ЕШП застосовують-ся джерела живлення змінного струму промисло-вої частоти як найпростіші, дешевші та надійніші.

Згідно з технологічними вимогами вихідна на-пруга трансформаторів для ЕШЗ/ЕШП складає 50...80 В. Якість зварних швів ЕШЗ і якість металу, отриманого в процесі ЕШП, суттєво залежить від стабільності теплового режиму шлакової ван-ни, який, у свою чергу, визначається електричним режимом зварювання та переплаву, умовами охо-лодження зварного шва або зливка, коливаннями напруги мережі та іншими збуреннями, що впли-вають на технологічний процес. Це призводить до необхідності регулювання вихідної напруги дже-рел живлення в межах 100...50 %.

**Метою** роботи є дослідження регульовальних та енергетичних характеристик систем регулюван-ня напруги джерел живлення змінного струму для електрошлакових технологій.

**Характеристики джерел живлення устано-вок ЕШЗ/ЕШП з плавним регулюванням ви-хідної напруги фазоімпульсним регулюванням**

**тиристорів.** У джерелах живлення для ЕШЗ/ЕШП застосовуються три способи регулювання напру-ги під навантаженням: зміна кількості ввімкнених витків первинної обмотки трансформатора (сту-пінчасте регулювання); використання спеціальних трансформаторів з магнітною комутацією, що за-безпечує плавну зміну напруги в достатньо широ-ких межах; застосування дроселів насичення (маг-нітних підсилювачів) або керованих вентилів, що вмикаються зустрічно-паралельно в ланцюг пер-винної або вторинної обмотки трансформатора (плавне регулювання) [1, 2] (рис. 1).

Трансформатори зі ступінчастим регулюван-ням напруги (рис. 1, а) отримали в даний час най-більше розповсюдження. Перевагою ступінчастого методу регулювання напруги, що підводиться до навантаження, є відсутність зміни форми кривої напруги, а також відсутність фазового зсуву струму відносно напруги мережі живлення (при чисто ак-тивному навантаженні). Межі регулювання їхньої вихідної напруги зазвичай становлять 50...100 %. Зменшення дискретності регулювання живлячої напруги для плавного регулювання призводить до створення трансформаторів з більшим числом від-пайок (до 100 і більше), що разом з ускладненням конструкції силових трансформаторів ускладнює також і роботу перемикача ступенів напруги, зни-жуючи в цілому довговічність і надійність джере-ла живлення.

Схема з вольтододатковим трансформатором (рис. 1, б) дозволяє здійснювати роздільне регу-

Ланкін Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0001-6306-8086>, Семікін В.Ф. – <https://orcid.org/0000-0002-7407-5887>,

Романова І.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>

© Ю.М. Ланкін, В.Ф. Семікін, Є.М. Байштрук, І.Ю. Романова, 2024

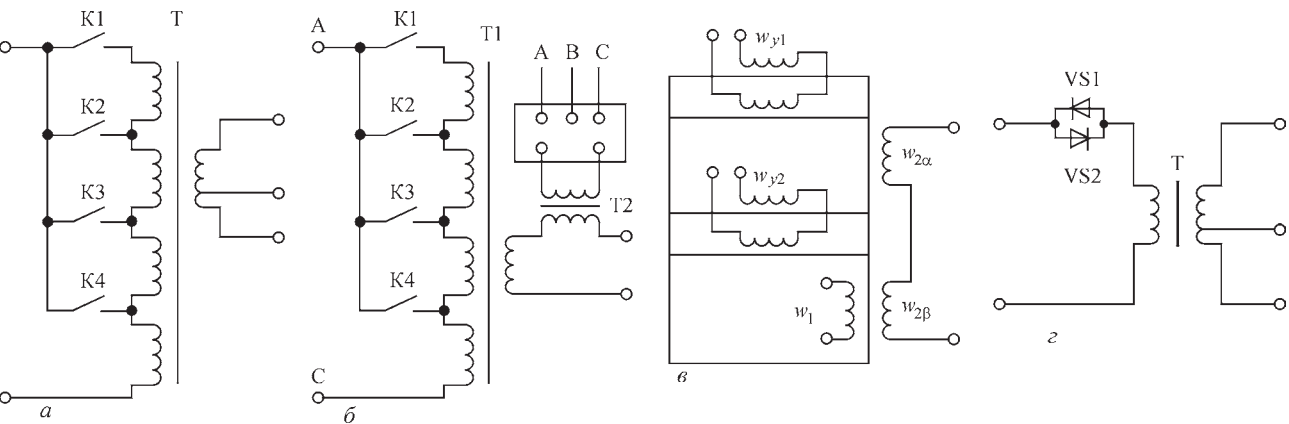


Рис. 1. Електричні схеми зварювальних трансформаторів із різними способами регулювання напруги

лювання фазових напруг у необхідних межах і не потребує потужної комутаційної апаратури.

У джерелах струму з магнітною комутацією (рис. 1, в) напругу регулюють шляхом підмагнічування постійним струмом (за допомогою керуючих обмоток  $w_{y1}$  і  $w_{y2}$ ) двох ярем трансформатора та перерозподілу основного магнітного струму між ними.

Схема з керованими вентилями (рис. 1, г) має задовільні регульовальні характеристики: плавне регулювання вихідної напруги в діапазоні 0...100 %, що досягається шляхом зміни кута ввімкнення  $\alpha$  та кута провідності  $\lambda$  керованих вентилю (рис. 2). Однією з перших тиристорне регулювання напруги на шлаковій ванні в своїй системі управління процесом ЕШП застосувала шведська фірма ASEA [3].

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона на цьому принципі пізніше також було розроблено тиристорний регулятор напруги А-1307 [1].

Проте регулювання напруги за допомогою тиристорів (рис. 1, г), призводить до зниження коефіцієнта потужності  $\chi$  пропорційно глибині регулювання. Оскільки електрошлакові технології є електровитратними, будь-які вдосконалення, що скорочують витрати електроенергії в них, є необ-

хідними та актуальними [4]. Це викликано тим, що струм і напруга навантаження в цих джерелах живлення є суттєво несінусоїдальними (рис. 2).

Аналіз електричних ланцюгів з нелінійними елементами проводиться за допомогою надання реальної форми досліджуваного сигналу у вигляді гармонічного спектру струмів і напруг:

– амплітуда першої гармоніки  $I_{1m}$ :

$$I_{1m} = \frac{1}{\pi} \sqrt{(\pi - \alpha)^2 + (\pi - \alpha) \cdot \sin 2\alpha + \sin^2 \alpha},$$

– амплітуда  $n$ -ї гармоніки:

$$I_{nm} = \frac{2}{\pi} \frac{\sqrt{(n \cdot \sin \alpha - \sin n\alpha)^2 + (\cos \alpha - \cos n\alpha)^2}}{n^2 - 1}.$$

Зі зміною величини кута регулювання  $\alpha$  змінюється гармонічний спектр струму і, відповідно, енергетичні характеристики ланцюга з вентилями (рис. 3).

Крім активної потужності тиристорний регулятор споживає також реактивну потужність за рахунок зсуву фаз між першими гармоніками напруги та напруги генератора, що виникає при фазовому регулюванні тиристорами. При природній комутації вентилю струм відстає від напруги на кут  $\varphi_1$ , що визначається кутом ввімкнення тиристорів  $\alpha$  (рис. 3). Косинус кута зсуву за фазою між перши-

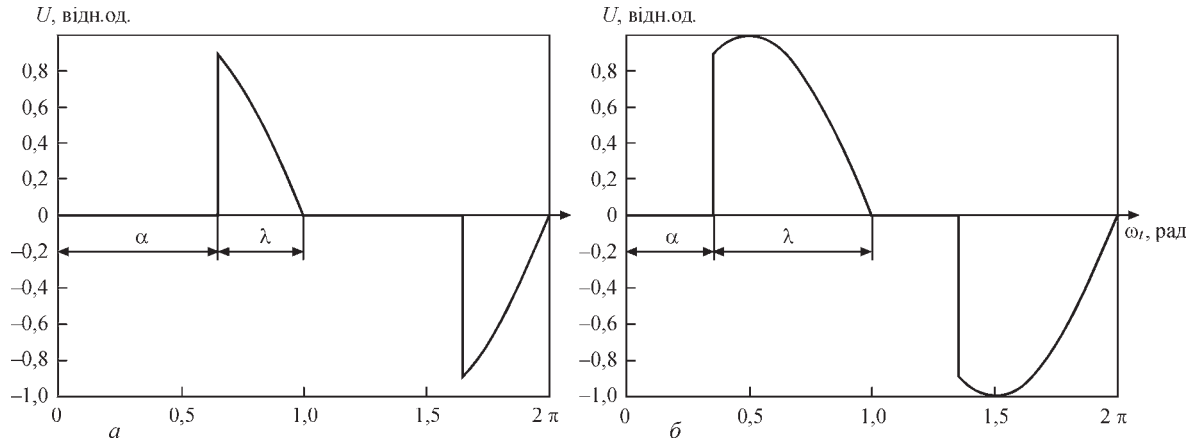


Рис. 2. Діаграми вихідної напруги регулятора із зустрічно-паралельними тиристорами при активному навантаженні та кутах ввімкнення тиристорів: а –  $\alpha = 0,65\pi$ ; б –  $\alpha = 0,35\pi$

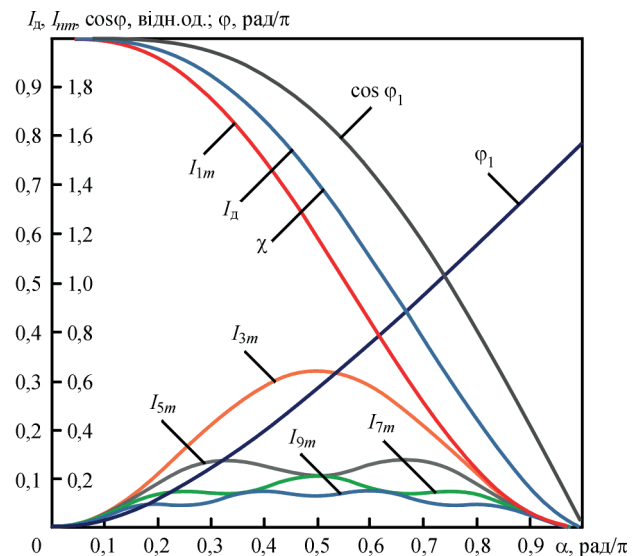


Рис. 3. Гармонічний спектр струму, фазового зсуву першої гармоніки  $\varphi_1$ ,  $\cos \varphi_1$  і коефіцієнта потужності  $\chi$  у залежності від кута ввімкнення тиристорів  $\alpha$

ми гармоніками струму та напруги  $\cos \varphi_1$  визначається як:

$$\cos \varphi_1 = \frac{(\pi - \alpha) + \frac{\sin 2\alpha}{2}}{\sqrt{(\pi - \alpha) + (\pi - \alpha) \cdot \sin 2\alpha + \sin^2 \alpha}}.$$

Показники якості енергії, що споживається, можуть бути оцінені коефіцієнтом потужності  $\chi = P/S$ , що визначає, яка частка від найбільшої потужності, яку можна отримати від джерела живлення при заданих діючих значеннях напруги та струму, використовується навантаженням, де  $P$  – активна потужність,  $S$  – повна потужність. У нашому випадку коефіцієнт потужності  $\chi$  дорівнює відносному діючому значенню струму  $I_d$ :

$$\chi = I_d = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}}.$$

Зі збільшенням кута ввімкнення тиристорів для плавного зменшення напруги (струму) коефіцієнт потужності змінюється від 1 до 0 (рис. 3), що є основним недоліком тиристорних регуляторів з фазоімпульсним регулюванням. Передача реактивної потужності по лініях призводить до виникнення додаткових активних втрат во всіх елементах системи. Наявність вищих гармонічних складових струму, що споживається, призводить до низки небажаних явищ у мережі живлення: додаткових втрат у магнітопроводах і обмотках трансформаторів і генераторів, а також у розподільчій мережі, до різних резонансних явищ.

Типові оцінки якості електроспоживання

| Значення коефіцієнта потужності | Високе   | Добре      | Задовільне | Низьке     | Незадовільне |
|---------------------------------|----------|------------|------------|------------|--------------|
|                                 | 0,95...1 | 0,8...0,95 | 0,65...0,8 | 0,5...0,65 | 0...0,5      |

Транспортування реактивної потужності повітряними та кабельними лініями електропередачі за допомогою силових трансформаторів заподіює енергетикам великих збитків. Це – поява додаткових втрат активної потужності  $\Delta P$ ; виникнення додаткових втрат напруги  $\Delta U$ ; зменшення пропускної спроможності систем електропостачання завантаженням реактивною потужністю.

У 1995 р. введено в дію міжнародний стандарт МЭК ІЕС 1000-3-2 (ДСТУ EN ІЕС 61000-3-2:2019), згідно з яким коефіцієнт потужності працюючих пристроїв з потужністю більше 300 Вт для всіх споживачів повинен наближатися до одиниці. Типові оцінки якості електроспоживання наведено в таблиці. Практично коефіцієнт потужності 0,95 і вище вважається відмінним показником.

Як зазначено вище, звичайний діапазон регулювання вихідної напруги джерел живлення для електрошлакових технологій складає 50 %. З рис. 3 випливає, що в джерелах живлення з фазоімпульсним регулюванням вихідної напруги його зниження до 50 % отримаємо при куті регулювання тиристорів  $\alpha = 0,63\pi$ . Згідно з рис. 3 при такому значенні кута регулювання коефіцієнт потужності  $\chi = 0,5$ , тобто його значення є незадовільним за загальноприйнятою думкою (див. таблицю).

**Характеристики джерел живлення установок ЕШЗ/ЕШП з плавним регулюванням вихідної напруги фазоступінчастим регулюванням тиристорів.** Підвищити коефіцієнт потужності джерела живлення з трансформатором і тиристорним регулюванням напруги можна шляхом фазоступінчастого регулювання [5]. Існує дво-, три-, чотири- і багатоступінчасте фазове регулювання (рис. 4). Суть фазоступінчастого методу – у використанні фазового регулювання для плавної зміни діючого значення напруги на навантаженні в межах кожного ступеня вихідної напруги. Виконуючи широкий діапазон плавного регулювання напруги, фазоступінчастий метод забезпечує вищі значення коефіцієнта потужності у порівнянні з фазоімпульсним методом регулювання.

Джерело живлення змінного струму з двоступінчастою схемою фазоступінчастого регулювання напруги зображено на рис. 4, а. Регулюючий елемент складається з двох зустрічно-паралельних тиристорних груп і трансформатора Т. Схема працює наступним чином. На початку позитивного напівперіода вхідної напруги  $U_c$  (кут  $\alpha = 0$ ) схема управління вмикає тиристор VS1 першої ко-

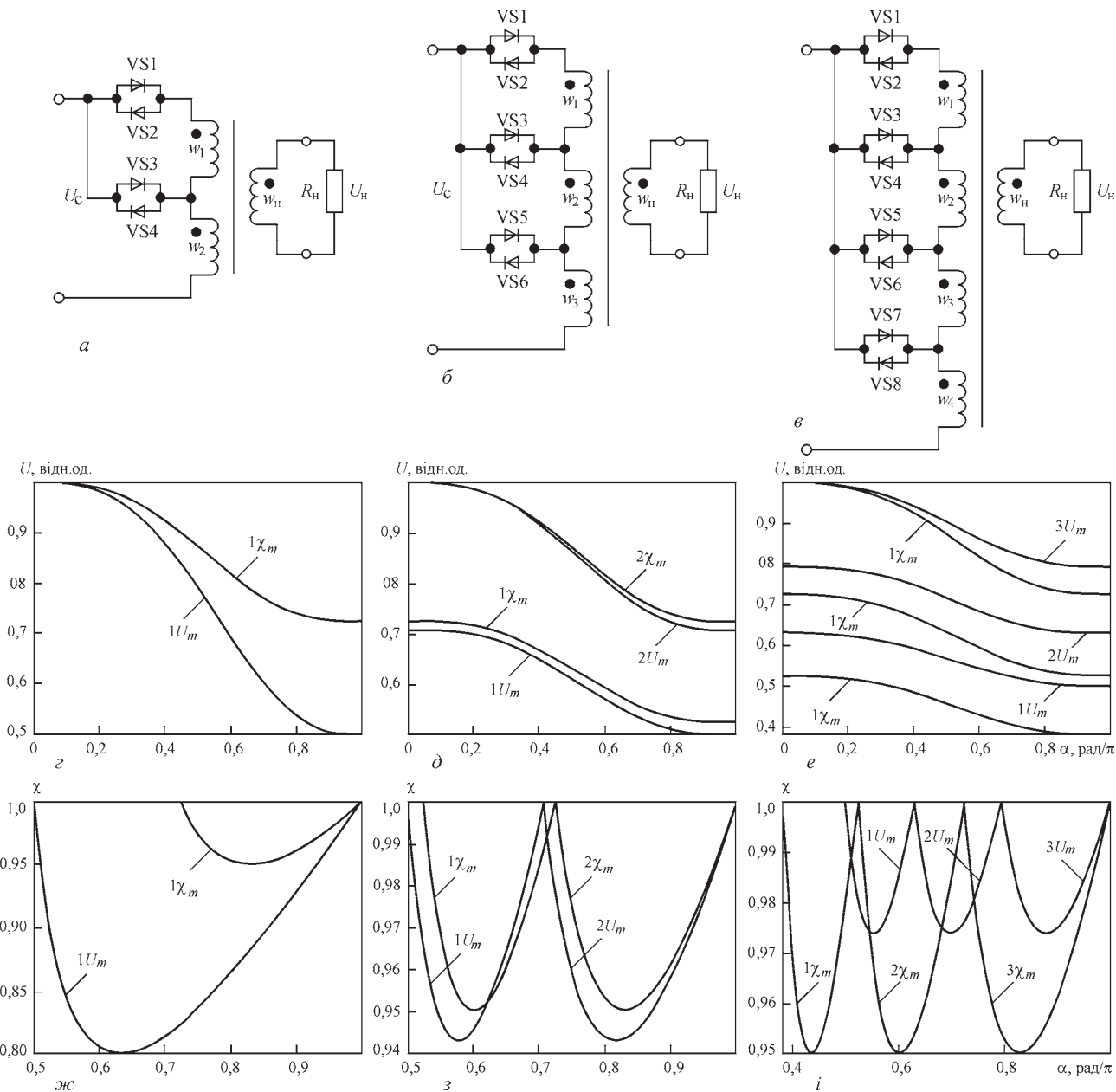


Рис. 4. Фазоступінчасті регулятори напруги: а – двоступінчастий; б – тріступінчастий; в – чотириступінчастий та їх регульовальні характеристики (з, д, е) і коефіцієнти потужності (ж, з, і) відповідно,  $1\chi_m - 3\chi_m$  – залежності  $U$  і  $\chi$  від  $\alpha$  на 1–3 ступенях регулювання для регуляторів з  $\chi_{min} = 0,95$ ,  $1U_m - 3U_m$  – так само для регуляторів з  $U_{min} = 0,5$

мутуючої групи. При цьому амплітуда напруги на навантаженні буде  $U_{mn} = U_{mc} \cdot n$ , де  $n = w_n / (w_1 + w_2)$  – коефіцієнт трансформації,  $U_{mc}$  – амплітуда напруги мережі (рис. 5, а). При заданому куті  $\alpha > 0$  схема управління вмикає тиристор VS3 II комутуючої групи, коефіцієнт трансформації у вторинний ланцюг стрибкообразно зростає в  $m$  разів, де  $m = (w_1 + w_2) / w_2$  – коефіцієнт перемикавання схеми джерела живлення. Транзистор VS1 замикається зворотною напругою, яка виникає в обмотці  $w_1$  трансформатора Т (рис. 5, б). На початку наступного (негативного) напівперіода вмикається тиристор VS2 (рис. 4, а), потім при фазі вхідної напруги, що дорівнює  $\alpha$ , відмикається тиристор VS4, а тиристор VS2 замикається і миттєве значення вихідної напруги знову стрибкообразно зростає в  $m$  разів (рис. 5, б). У результаті на виході джерела живлення напруга має ступінчато-синусоїдальну форму (рис. 5, б, в), діюча напруга на навантаженні  $U$  зростає. Якщо кут запалення тиристорів VS3, VS4 зменшується, наприклад стає  $\alpha = 0,65\pi$ , то напруга на навантаженні ще збільшується (рис. 5, в) у порівнянні з рис. 5, б. При куті ввімкнення тиристорів VS3, VS4  $\alpha = 0$  напруга на навантаженні стає максимальною (рис. 5, з). У результаті в системі (рис. 4, а) з фазоступінчастим регулюванням відбувається плавне регулювання напруги, але з меншим викривленням форми, ніж при фазоімпульсному регулюванні. Таким чином, при плавному регулюванні кутом  $\alpha$  (моментом відпирання

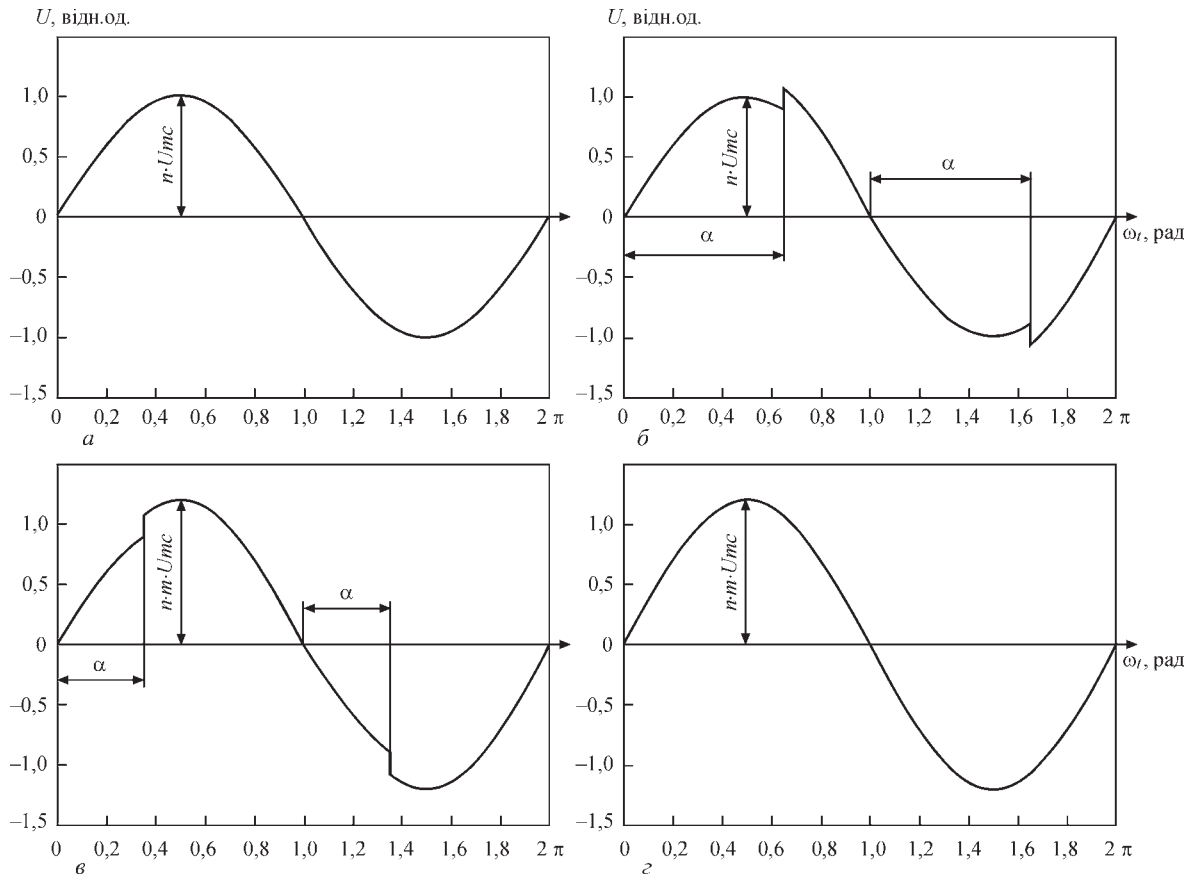


Рис. 5. Діаграми вихідної напруги джерела живлення з двотактним (фазоступінчастим) тиристорним регулятором при активному навантаженні: а –  $\alpha = \pi$ ; б –  $\alpha = 0,65\pi$ ; в –  $\alpha = 0,35\pi$ ; г –  $\alpha = 0$

тиристорів VS3, VS4) перетворювач змінює діюче значення напруги на навантаженні в межах від  $nU_c$  (рис. 5, а) до  $nmU_c$  (рис. 5, г). Регулююча характеристика діючого значення напруги на навантаженні  $U_{\text{нг}} = f(\alpha)$  будується на залежності:

$$U_{\text{нг}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\alpha} (\sqrt{2}U_1)^2 \sin^2 \omega t d\omega t + \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U_2)^2 \sin^2 \omega t d\omega t},$$

де  $U_1 = n \cdot m \cdot U_c$  і  $U_2 = n \cdot U_c$ .

Після спрощення формули отримаємо:

$$U_{\text{нг}} = \sqrt{\frac{U_1^2}{\pi} \left( \alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) + \frac{U_2^2}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)}.$$

Відносне значення регульованої напруги на навантаженні  $U = (U_{\text{нг}}/U_c) n \cdot m$  дорівнює:

$$U = \sqrt{1 + \frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha (1 - a^2) + \frac{\alpha}{\pi} (a^2 - 1)},$$

де  $a = 1/m$ .

Залежність коефіцієнта потужності  $\chi$  від  $\alpha$  (рис. 4, ж) при активному навантаженні визначається за залежністю:

$$\chi = \frac{m^2 - \frac{m^2 - 1}{\pi} \left( \alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)}{\sqrt{m^4 - \frac{m^4 - 1}{\pi} \left( \alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)}}$$

Як видно з рис. 4, ж,  $\chi$  має мінімум при деякому значенні  $\alpha$ . З формули для  $\chi$  знаходимо цей мінімум у залежності від  $m$ :

$$\chi_{\min} = 2m/(m^2 + 1).$$

При  $m = 1,38$  маємо  $\chi_{\min} = 0,95$  і  $\chi_{\text{ср}} = 0,9796$  (рис. 4, ж, крива 1 $\chi_m$ ), а  $U_{\min} = 1/m = 0,725$  (рис. 4, г, крива 1 $\chi_m$ ). Оптимальною областю застосування схеми (рис. 4, а) є стабілізатор однієї нерегульованої напруги  $U$  при коливаннях напруги мережі живлення. Якщо напруга, що стабілізується, за величиною близька до величини номінальної напруги мережі, то замість трансформатора Т (рис. 4, а) доцільно застосовувати автотрансформатор як економічніший.

Для ширшого діапазону коливань напруги мережі, наприклад  $+1,15 \dots -0,8 U_{\text{с.ном}}$ ,  $m = 1,15/0,8 = 1,4375$  отримаємо  $\chi_{\min} = 0,9376$ . Таким чином, збільшення діапазону коливань напруги мережі зі звичайного ( $+10 \dots -15 \%$ ) до максимально високого ( $+15 \dots -20 \%$ ) знижує коефіцієнт потужності одноступінчастого фазоступінчастого стабілізатора потужності з високого ( $0,95 \dots 1$ ) до доброго ( $0,8 \dots 0,95$ ) значення (див. табл.).

Слід зазначити, що в цій схемі замість зустрічно-паралельно включених пар тиристорів неможна використовувати симетричні тиристори (семистори). У симетричних тиристорах одним імпульсом

відмикаються обидва зустрічно-паралельно включених тиристора, а струм проводить лише той, у якого в даний момент позитивна напруга на аноді.

Додавання ще одного ступеня з  $m = 1,38$  (рис. 4, б) дозволяє розширити діапазон регулювання напруги до 100...52,5 % ( $U_{min} = 1/m^2 = 0,525 U_{max}$ ), рис. 4, б), криві  $1\chi_m$  і  $2\chi_m$  при тих же  $\chi_{min} = 0,95$  і  $\chi_{cp} = 0,9796$  (рис. 4, з).

Мінімальну вихідну напругу двоступінчастої системи регулювання можна знизити до 0,5 шляхом збільшення коефіцієнта перемикавання  $m$ . Оскільки  $U_{min} = 1/m^2$ , то для  $U_{min} = 0,5$  (крива  $1U_m$  на рис. 4, д) отримаємо  $m = 1,414$ . На жаль при цьому зменшиться коефіцієнт потужності до  $\chi = 0,94$  (криві  $1U_m$  і  $2U_m$  на рис. 4, з).

Простіше за все розширити діапазон регулювання вихідної напруги схеми можна шляхом деякої модернізації алгоритму управління. У схемі рис. 4, б, як і в схемі рис. 4, а, тиристори VS1 і VS2 працюють тільки в повнофазному режимі з  $\alpha = 0$  (рис. 5). Тоді при збільшенні кута ввімкнення тиристорів VS1, VS2 з 0 до  $0,27\pi$  отримаємо  $U_{min} = 0,5$  при  $\chi_{min} = 0,952$  згідно з рис. 3.

Схема також дозволяє плавно знижувати вихідну напругу аж до нуля, збільшуючи кут ввімкнення тиристорів VS1, VS2 до  $\pi$ . Таку схему можна розглядати як чотириступінчасту у вигляді комбінації схем з фазоступінчастим регулюванням (ступені II, III) і схеми з фазоімпульсним регулюванням (I ступінь). Правда, при цьому коефіцієнт потужності на першому ступені пропорційно знижується аж до нуля внаслідок переходу на фазоімпульсне регулювання. Таке регулювання є допустимим, якщо є потреба у низькій вихідній напрузі джерела живлення лише короткочасно.

У більшості практичних випадків можна прийняти це рішення як найпростіше та разом з тим таке, що забезпечує високе значення  $\chi$  і достатньо широкий діапазон регулювання напруги.

Щоби збільшити коефіцієнт потужності вище 0,95 у діапазоні регулювання вихідної напруги 1...0,5 і вище, необхідно додати четвертий ступінь фазоімпульсного регулювання вихідної напруги (рис. 4, в).

Для цього регулятора з діапазоном регулювання напруги 1...0,5 повинна виконуватися умова  $1/m^3 = 0,5$ . Звідси  $m = \sqrt[3]{\frac{1}{0,5}} = 1,26$ . На рис. 4, е

наведено регульовальні характеристики напруги регулятора. Як бачимо, на першому ступені мінімальна напруга  $U_{min} = 0,5U$  (крива  $1U_m$ ). Тоді згідно з залежністю для  $\chi_{min}(m)$  мінімальне значення коефіцієнта потужності у всьому діапазоні регулю-

вання напруги складає  $\chi_{min} = 0,9738$  (рис. 4, і, криві  $1U_m$ ,  $2U_m$ ,  $3U_m$ ), а середнє значення  $\chi_{cp} = 0,9893$ . При однаковому з триступінчастою схемою коефіцієнті потужності  $\chi_{min} = 0,95$  (рис. 4, і, криві  $1\chi_m$ ,  $2\chi_m$ ,  $3\chi_m$ ) діапазон регулюємої напруги суттєво розширюється –  $U_{min} = 0,38$  (рис. 4, е, крива  $1\chi_m$ ).

Як і триступінчаста, чотириступінчаста схема фазоступінчастого регулювання також дозволяє плавно знижувати вихідну напругу аж до нуля, збільшуючи кут ввімкнення тиристорів VS1, VS2 до  $\pi$ .

Розглянуті системи плавного безперервного тиристорного регулювання змінної напруги є ідеальними для модернізації найпоширеніших трансформаторних джерел живлення зі ступінчастим регулюванням для ЕШЗ/ЕШП (рис. 1, а).

При цьому, по-перше, збільшується надійність джерел живлення внаслідок заміни електроmechanічних контакторів електронними приладами – тиристорами, а кількість комутуючих елементів може навіть зменшуватись; по-друге, технологічні можливості установок значно покращуються внаслідок плавного регулювання напруги, розширення діапазону регулювання напруги, автоматичної стабілізації незалежно від збурень, наприклад коливань напруги мережі живлення, заданих або тих, що програмно змінюються, електричних параметрів технологічного процесу.

## Висновки

1. Для електрошлакових технологій переважно застосовуються джерела живлення змінного струму зі ступінчастим регулюванням вихідної напруги. Їх недоліком є складність при широкому діапазоні регулювання вихідної напруги.

2. Для плавного регулювання напруги використовуються джерела живлення з фазоімпульсними тиристорними регуляторами. Вони простіше джерел живлення зі ступінчастим регулюванням, але мають неприпустимо низький коефіцієнт потужності, який зменшується пропорційно напрузі, що регулюється, аж до нуля.

3. Задовільний коефіцієнт потужності в широкому діапазоні плавного регулювання вихідної напруги мають джерела живлення з фазоступінчастим регулюванням напруги.

4. При коефіцієнті перемикавання  $m = 1,38$  незалежно від кількості ступенів отримаємо мінімальне значення коефіцієнта потужності джерела живлення  $\chi_{min} = 0,95$  у всьому діапазоні регулювання напруги при середньому значенні  $\chi_{cp} = 0,98$ .

5. Для двоступінчастої схеми при  $m = 1,38$  мінімальна відносна вихідна напруга  $U_{min} = 0,725$ . Низький діапазон регулювання вихідної напруги обмежує область застосування двоступінчастої

схеми стабілізаторами напруги мережі в діапазоні її зміни  $+10 \dots -15 \%$ .

6. Для триступінчастої схеми при  $m = 1,38$  маємо  $U_{\min} = 0,525$ . Ця схема з-за своєї простоти при високих регульовальних та енергетичних характеристиках є оптимальною для більшості джерел живлення ЕШЗ/ЕШП.

7. Якщо потрібно мати ширший діапазон регулювання вихідної напруги, можна використовувати джерела живлення з чотириступінчастою системою фазоступінчастого регулювання, що при  $m = 1,38$  забезпечує  $U_{\min} = 0,38$ .

8. Для нетривалих режимів та операцій в джерелах живлення з фазоступінчастим регулюванням, використовуючи фазоімпульсне регулювання тиристорами верхньої відпайки мережевої обмотки трансформатора, можна забезпечити плавне зниження мінімальної вихідної напруги аж до нуля, але з відповідним зниженням коефіцієнта потужності.

9. Системи фазоступінчастого регулювання дуже добре підходять для модернізації джерел живлення ЕШЗ/ЕШП зі ступінчастим регулюванням. Заміна електромеханічних контакторів на тиристорні із системою управління підвищує надійність, технологічні можливості установок, забезпечує підвищення стабільності якості продукції, що випускається, з-за стабілізації параметрів заданого технологічного режиму незалежно від збурень, що діють на процес (коливань напруги мережі тощо).

## CHARACTERISTICS OF POWER SOURCES OF ESW/ESM INSTALLATIONS WITH PHASE-PULSE REGULATION OF THYRISTORS

Yu.M. Lankin, V.F. Semikin, Ye.M. Bayshttruk, I.Yu. Romanova

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: lankin.y.n@gmail.com

The characteristics of transformer power sources with phase-pulse regulation of thyristor contactors, which provide smooth voltage regulation, are considered. Their main drawback is an unacceptably low power factor. The characteristics and recommended areas of application of two-, three- and four-stage power sources with phase-step regulation, which have a high power factor in a wide range of voltage regulation, are considered. Phase-step regulation systems are very well suited for upgrading the existing power supplies with step regulation, increasing the quality of the manufactured products and the technological capabilities while maintaining high energy characteristics. 5 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

**Keywords:** *electroslag technologies, alternating current power sources, phase-pulse regulation, phase-step regulation, power factor*

Отримано 15.10.2024

Отримано у переглянutoму вигляді 13.11.2024

Прийнято 12.12.2024

## Список літератури

1. (1980) Электрошлаковая сварка и наплавка. Патон Б.Е. (ред.) Москва, Машиностроение.
2. Бондаренко О.П., Гавриш В.С., Дишленко О.Т. та ін. (1994) Автоматичне керування електрозварювальними процесами і установками. Навч. посібник. Лебедев В.К., Черныш В.П. (ред.). Київ, Вища школа.
3. Бергман Л.Дж. (1972) Система питания и управления оборудованием для электрошлакового переплава железа и стали в Швеции. Специальная электрометаллургия. Часть II. Доклады Международного симпозиума по специальной электрометаллургии. Киев, Наукова думка.
4. Медовар Л.Б., Полішко Г.О., Петренко В.Л., Стовпченко Г.П. (2020) Сучасні електрошлакові технології переплаву електроду та переробка рідкого металу (Огляд). *Теорія і практика металургії*, 2, 17–25. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.2.2020.03>
5. Билоус О.А., Иванов А.П. (2009) *Электронные преобразовательные устройства. Учеб. пособие*. Пермь, Изд-во Перм. гос. техн. ун-та.

## References

1. (1980) *Electroslag welding and surfacing*. Ed. by B.E. Paton, Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Bondarenko, O.P., Havrysh, V.S., Dyshlenko, O.T. et al. (1994) *Automatic control of electric welding processes and installations In: Manual*. Eds by V.K., Lebedev, V.P., Chernysh. Kyiv, Vyscha Shkola [in Ukrainian].
3. Bergman, L.J. (1972) *System of power supply and control of equipment for electroslag melting of iron and steel in Sweden. Special electrometallurgy. Pt II. In: Proc. of the Intern. Symp. on Special Electrometallurgy*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
4. Medovar, L., Polishko, G., Petrenko, V., Stovpchenko, G. (2020) Modern electroslag technologies of electrode remelting and processing of liquid metal (Review). *Theory and Practice of Metallurgy*, 2, 17–25. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.2.2020.03> [in Ukrainian].
5. Bilous, O.A., Ivanov, A.P. (2009) *Electronic conversion devices. Study allowance*. Perm, Publishing Perm Techn. Univ. [in Russian].

НОВА СЕРІЯ  
ЗВАРЮВАЛЬНИХ ІНВЕРТОРІВ



PATON.UA

