

УДК 621.314.214

**К.О.Липківський**, докт.техн.наук, **В.А.Халіков**, канд.техн.наук, **А.Г.Можаровський**, канд.техн.наук (Інститут електродинаміки НАН України, Київ)

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ**

*Наведено результати досліджень основних аспектів проблеми побудови трансформаторно-ключових виконавчих структур дискретних перетворювачів напруги, отримані під час виконання НДР "Ренап". Зокрема: проаналізовано особливості побудови робочих характеристик дискретних стабілізаторів напруги змінного струму й запропоновано нові закони їхнього формування; розроблено метод синтезу й методіку розрахунку найбільш перспективних структур з винесенням ключових елементів з кіл силового струму, обґрунтовано шляхи їхнього вдосконалення; досліджено й створено системи регулювання напруги для формування оптимальних вольтамперних характеристик джерел живлення електротехнологічного обладнання тощо.*

*Приведены результаты исследований основных аспектов проблемы построения трансформаторно-ключевых исполнительных структур дискретных преобразователей напряжения, полученные при выполнении НИР "Ренап". В частности: проанализированы особенности построения рабочих характеристик дискретных стабилизаторов напряжения переменного тока и предложены новые законы их формирования; разработан метод синтеза и методика расчета наиболее перспективных структур с вынесением ключевых элементов из цепей силового тока, обоснованы пути их совершенствования; исследованы и созданы системы регулирования напряжения для формирования оптимальных вольтамперных характеристик источников питания электротехнологического оборудования и т.д.*

**Вступ.** При опануванні та використанні електричної енергії (ЕЕ) завжди важливою і на часі є проблема узгодження параметрів ЕЕ, які вимагає споживач для функціонування взагалі та для роботи в найбільш сприйнятливих для нього умовах, і параметрів ЕЕ джерела живлення. Найбільш доцільним вирішенням цієї проблеми є встановлення між мережею та споживачем спеціальних локальних систем (пристроїв), за допомогою яких можна цілеспрямовано необхідним чином змінювати окремі параметри ЕЕ.

Один з найпоширеніших видів функціонального перетворення параметрів ЕЕ – регулювання напруги змінного струму, яке є або основним видом перетворення, або супроводжує (у переважній більшості випадків) інші види перетворення – частоти, кількості фаз, типу джерела тощо.

Ефективне регулювання та стабілізація напруги змінного струму при мінімумі негативного впливу на мережу живлення успішно вирішується при використанні як силової виконавчої структури трансформаторів, в яких виконується природня комутація виводів тиристорними ключами, – так званої "трансформаторно-ключової виконавчої структури" (ТКВС) [18].

При проектуванні перетворювачів з ТКВС з метою отримання найбільш доцільних схематичних та алгоритмічних рішень необхідно було приділити поглиблену увагу побудові адекватних математичних моделей силових структур та систем управління, використанню сучасних програмних пакетів для візуального імітаційного та структурного моделювання, розробці методів їх розрахунку та оптимізації. Саме цей комплекс питань, пов'язаних з дослідженням широкого кола дискретних систем регулювання (стабілізації) напруги змінного струму, їхньою адаптацією до використання в системах живлення електротехнологічного обладнання, зокрема дугової зварювальної апаратури, було вирішено при виконанні науково-дослідної роботи "Ренап".

Згідно з планом, зокрема, було: досліджено особливості побудови робочих характеристик дискретних стабілізаторів напруги змінного струму й запропоновано нові закони їхнього формування; прослідковано багатоваріантність ТКВС на основі множини вольтододавчих трансформаторів (ВДТ) та узгоджуючого автотрансформатора (АТ); виконано повний цикл досліджень перспективного класу двотрансформаторних ТКВС з багатофункціональним секціонованим АТ; досліджено й реалізовано системи регулювання джерел живлення електротехнологічного обладнання тощо.

**Обґрунтування вибору законів формування характеристики вхід-вихід дискретних стабілізаторів напруги (ДСН).** Ця характеристика, незалежно від вибраного типу ТКВС, повинна обов'язково знаходитися у деякій зоні, обмеженій по вертикалі заданими (припустимими) мінімальним і максимальним значеннями вихідної напруги  $U_{2cmin}$  і  $U_{2cmax}$ , а по горизонталі – заданими (можливими) мінімальним та максимальним значеннями вхідної напруги  $U_{1cmin}=U_{1н}\cdot\mu_c$  і  $U_{1cmax}=U_{1н}\cdot\rho_c$ . Цю зону (ABCD, рис. 1), яку в [21] визначено полем стабілізації (ПС), зручно характеризувати безрозмірними коефіцієнтами  $G_c=U_{1cmax}/U_{1cmin}=\rho_c/\mu_c$  та  $g_c=U_{2cmax}/U_{2cmin}=(1+\delta_c)/(1-\delta_c)$ , де  $\delta_c$  – відносна похибка стабілізації,  $\delta_c=(U_{2cmax}+U_{2cmin})/U_{2н}$ .

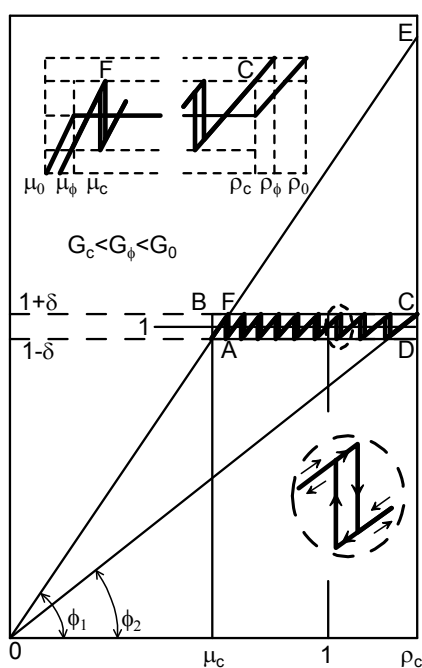


Рис. 1

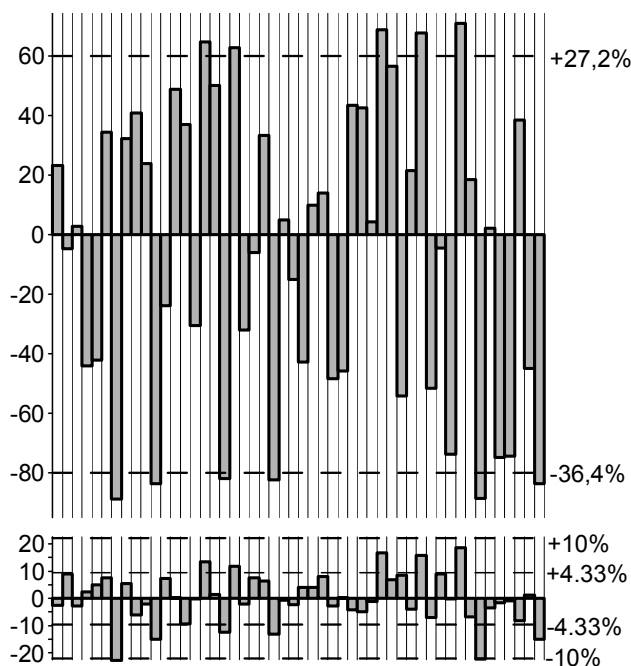


Рис. 2

Виходячи з того, що всі споживачі, навіть ті, що для комфортної ефективної тривалої роботи використовують стабілізатори напруги (СН), повинні витримувати режим з максимально припустимими для низьковольтної розподільчої мережі відхиленнями живлячої напруги від номінальної  $U_{1н}$ , які у ГОСТ 13109-97 визначені на рівні  $\delta_{max}=\pm 10\%$ , для СН введено поняття зони гарантованого функціонування споживача (ЗГФ), верхньою і нижньою межами якої є  $(1+\delta_{max})=1,1$  та  $(1-\delta_{max})=0,9$ , а лівою та правою, відповідно,  $\mu_\phi=\mu_c(1-\delta_{max})/(1-\delta_c)=0,9\mu_c/(1-\delta_c)$  та  $\rho_\phi=\rho_c(1+\delta_{max})/(1+\delta_c)=1,1\rho_c/(1+\delta_c)$ . Глибина ЗГФ при цьому визначається залежністю  $G_\phi=1,222G_c(1-\delta_c)/(1+\delta_c)$ , тобто вона більша за  $G_c$  і ця різниця зростає при зменшенні  $\delta_c$ . Так, для  $\delta_c=0,05$  (5%) –  $G_\phi=1,106G_c$ , а при  $\delta_c=0,02$  (2%) –  $G_\phi=1,174G_c$ . Отже, зменшення розрахункової помилки призводить не тільки до підвищення точності стабілізації, але й до розширення зони гарантованого функціонування.

На рис. 2 показано гістограми вхідної та вихідної напруг ДСН (розраховано на забезпечення  $\delta_c=4,06\%$  при зміні вхідної напруги  $U_1=140\div 280$  В) для деякої кінцевої множини (тут  $N=50$ ) випадкових вхідних збурень у дещо ширших межах 132 В (60%)÷286 В (130%). Видно, що при одинадцяти виходах вхідної напруги за розрахункові значення напруга на навантаженні жодного разу не виходить за максимально припустимі межі  $\pm 10\%$ . Для варіантів ДСН з підвищеною точністю кількість таких перевищень й їх величина зменшуються. Слід додати, що врахування наявності ЗГФ дозволяє також розвести значення вхідної напруги, при яких відбувається спрацювання захисту від пере- та недонапруги [11].

Все це сприяє більш коректному проектуванню ДСН та дозволяє потенційним користувачам дискретних стабілізаторів напруги змінного струму висувати менш жорсткі вимоги щодо глибини їхнього діапазону стабілізації без відчутного впливу на роботу споживачів.

Характеристика вхід-вихід ТКВС ДСН, що має  $J$  коефіцієнтів передачі (на рис. 1  $J=10$ ), складається з  $J$  відрізків, які виходять з початку координат, причому тангенс нахилу кожного з них дорівнює певному коефіцієнту передачі  $K_j$ . Необхідним є наявність  $(J-1)$  ділянок, на яких ТКВС в залежності від напрямку зміни  $U_1$ , може перебувати в одному з двох суміжних станів, тобто характеристика повинна мати петлі гістерезису, які забезпечують унормований перехід з одного стану в інший. Ширина найвужчої петлі є вирішальним фактором при виборі закону зміни  $K_j$  [12,13].

Перший (найбільший) та останній  $J$ -тий (найменший) коефіцієнти передачі визначаються виключно параметрами поля стабілізації:

$$K_1=K_{\max}=\operatorname{tg}\varphi_1=(1-\delta_c)/\mu_c; \quad K_J=K_{\min}=\operatorname{tg}\varphi_J=(1+\delta_c)/\rho_c,$$

а закон зміни інших  $(J-2)$  коефіцієнтів передачі – вибором регулювальних обмоток ЕМЕ. В разі однакової кількості витків в них вони можуть розміщуватись або на вторинному (варіант А), або на первинному (варіант В) боці трансформуючого елемента [23,24,25]:

$$K_{jA}=K_{\max}[1-(G-g)(j-1)/G(J-1)]; \quad K_{jB}=K_{\max}g/[1+j(g-1)].$$

Нами запропоновано два нових закони вибору множини коефіцієнтів передачі: з регулювальними обмотками, кількість витків яких змінюється за законом геометричної прогресії (варіант С), та близький до нього – модернізований (варіант D) [21]:

$$K_{jC}=K_{\max}\left(\frac{g}{G}\right)^{j-1}; \quad K_{jD}=K_{\max}(g^j - g)/[(g^j - G) + g^{j-1}(G - g)].$$

Побудовані за цими формулами залежності  $K_j=f(j)$  та характеристики вхід-вихід для випадку  $G=2, J=10$  показано на рис. 3 та 4, відповідно.

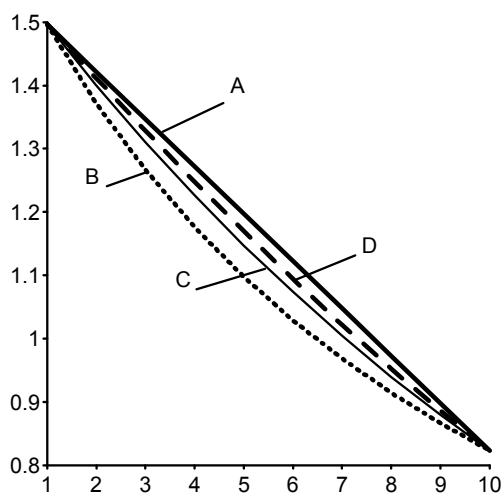


Рис. 3

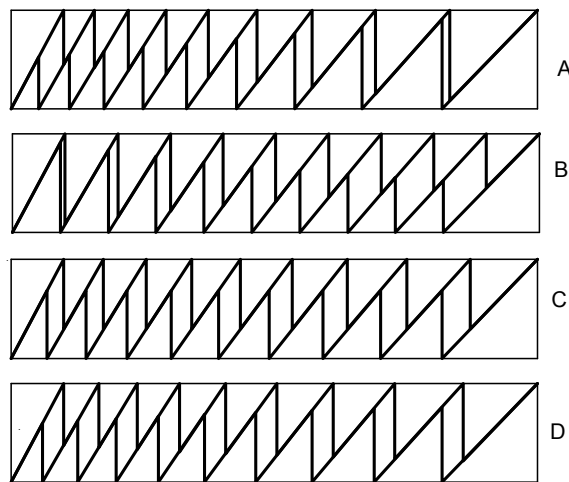


Рис. 4

Як видно, характер зміни розмірів петлі у варіанті А протилежний іншим варіантам – найвужча петля припадає на найбільшу напругу переключення.

Ширина найвужчої петлі (у варіанті В, С, Д – це перша, а у варіанті А – остання) у відносних (нормованих по  $U_{1н}$ ) одиницях визначається наступним чином:

$$\Delta U_A^* = \mu \left( \frac{g(J-1)G}{g(J-2)+G} - \frac{G}{g} \right); \quad \Delta U_B^* = \mu \frac{(g-1)^2}{g}; \quad \Delta U_C^* = \mu \left[ g - \left( \frac{G}{g} \right)^{\frac{1}{J-1}} \right]; \quad \Delta U_D^* = \mu \frac{(g-1)g^J - G}{g^J - g}.$$

Для випадку, що розглядається ( $G=2, J=10$ ), при  $U_{1н}=220\text{В}$  маємо  $\Delta U_A=2,12\text{ В}$ ;  $\Delta U_B=1,27\text{ В}$ ;  $\Delta U_C=4,38\text{ В}$ ;  $\Delta U_D=5,56\text{ В}$ . Тобто, вибір запропонованих законів зміни  $K_j$  призводить до розширення найвужчої петлі. Це в окремих випадках дає змогу зменшити  $J$  (і, відповідно, кількість КЕ). Запропоновані закони, забезпечуючи кращі умови для комутації секцій, відзначаються ще й певною варіативністю [3,7,26].

### Синтез багатоеlementних ТКВС з двообмотковим узгоджувачим автотрансформатором.

На основі аналізу ТКВС різних класів обґрунтовано доцільність широкого впровадження структур з винесенням ключових елементів з кіл силового струму, які відзначаються значно кращими масогабаритними та вартісними показниками КЕ. Простіші структури цього класу мають кілька регульовальних блоків (РБ), кожен з яких складається з мостового комутатора та вольтододавчого трансформатора (ВДТ), а також узгоджувачого автотрансформатора (УАТ). Зазвичай можна обмежитись двома РБ – більш "грубим" (РБ1) і більш "точним" (РБ2) (рис. 5).

Була доведена багатоваріантність комплексування складових такої ТКВС. Зокрема проаналізовано структури з різним розміщенням УАТ (на вході, виході, між РБ) та доведено, що його доцільно розміщувати на виході ТКВС. При цьому розрахункове значення його встановленої потужності, нормоване по номінальній потужності навантаження, дорівнює

$$P_{УАТ}^* = 4g^2[1 - 0,5\mu g^4(g+1)] / (g+1)^2.$$

Синтезовано структури з різним розміщенням РБ і проаналізовано особливості процесу стабілізації при двох варіантах: спочатку "грубий" РБ1, а потім "точний" РБ2, коли  $K_{П} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_{УАТ}$  – варіант А (рис. 6, а), і, навпаки, коли  $K_{П} = K_2 \cdot K_1 \cdot K_{УАТ}$  – варіант В (рис. 6, б). Тут ламана лінія MN відповідає вихідній напрузі, а лінія ABCDEF – проміжній напрузі між РБ1 та РБ2 (РБ2 та РБ1). Внаслідок цього відрізняються і розрахункові значення встановлених потужностей окремих ВДТ:

$$\text{варіант А} - P_{ВДТ1}^* = 4g^4(g^3 - 1) / (g+1)^2 \approx g^3(g^3 - 1), \quad P_{ВДТ2}^* = 4g^2(g - 1) / (g+1)^2 \approx g(g - 1),$$

$$\text{варіант В} - P_{ВДТ1}^* = 4g^2(g^3 - 1) / (g+1)^2 \approx g(g^3 - 1), \quad P_{ВДТ2}^* = 4g^8(g - 1) / (g+1)^2 \approx g^7(g - 1),$$

хоча сумарне значення встановлених потужностей обох ВДТ практично однакове. Отже, вибір одного з двох розглянутих варіантів повністю визначається наявними типоміналами магнітопроводів.

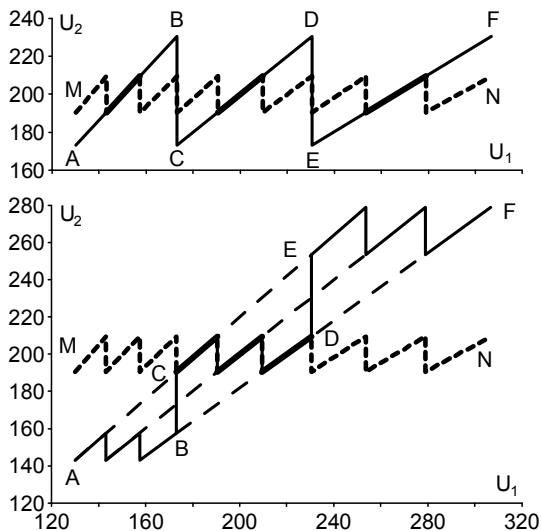


Рис. 6

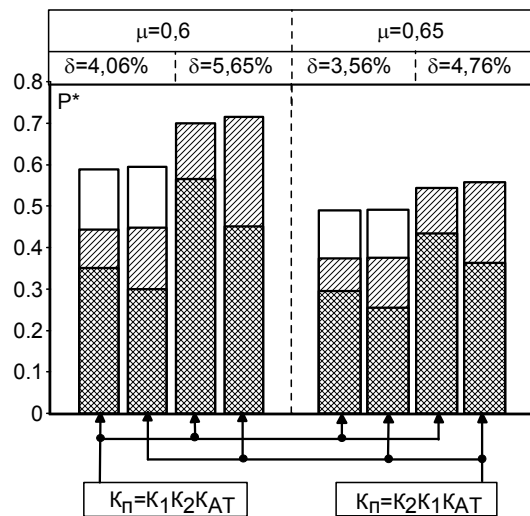


Рис. 7

У випадку відсутності УАТ потужності ВДТ значно зростають і їхня потужність суттєво перевищує сумарну всіх трьох ЕМЕ при наявності УАТ (рис. 7, де на гістограмах  $P_{ВДТ1}^*$  та  $P_{ВДТ2}^*$  відповідають ділянки з більш та менш щільним штрихуванням, а  $P_{УАТ}^*$  – незаштрихована). Крім того, введення УАТ призводить до підвищення точності стабілізації на 25÷30% при тому ж  $J=9$  [4,10 14].

Таким чином, вперше була доведена та проаналізована багатоваріантність комплексування окремих складових у ТКВС з винесенням ключових елементів із кіл силового струму та розроблено рекомендації щодо визначення найбільш доцільних варіантів.

**Синтез двотрансформаторних ТКВС з секціонованим багатофункціональним автотрансформатором.** Одним з рішень, яке найбільш прийнятне для використання як виконавчий орган (ВО) дискретних стабілізаторів напруги змінного струму, є клас структур з двома трансформаторами –

вольтододавчим (ВДТ) та автотрансформатором (АТ), що виконує декілька функцій. У таких ТКВС два ключі здійснюють реверс напруги на введеній в ланцюг силового струму вторинній обмотці ВДТ, а при замиканні одного з інших ключів змінюється величина цієї напруги, що дозволяє регулювати вихідну напругу [20,28,36].

Виконано повний цикл досліджень основних варіантів ТКВС цього класу, що відрізнялися місцем розташування ВДТ відносно АТ, способом формування секцій обмотки останнього тощо.

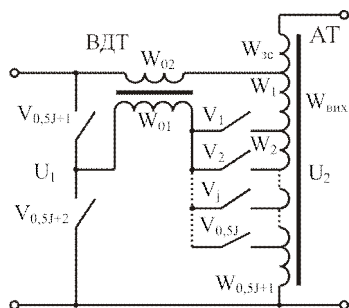


Рис. 8

На рис. 8 наведено варіант ВО з розміщенням ВДТ перед АТ. Обмотку АТ, до якої приєднується вивід вторинної обмотки ВДТ з коефіцієнтом трансформації  $\alpha = W_{02}/W_{01}$ , названо вхідною  $W_{вх}$ ; узгодження вхідного та вихідного діапазонів виконує обмотка зсуву  $W_{зс}$ , а напруга знімається з вихідної обмотки  $W_{вих} = \beta W_{вх}$ . При аналізі використовувалися відносні величини чисел витків секцій обмоток АТ, які пронумеровані по  $W_{вх}$  ( $W'_i = W_i/W_{вх}$ ).

Досліджено можливість застосування такої структури для формування характеристики вхід-вихід ДС з  $J$  коефіцієнтів передачі  $K_j$ , що задовольняють закону геометричної прогресії [18]. Аналіз математичної моделі поведінки ТКВС довів, що це можливо лише тоді, коли коефіцієнт трансформації ВДТ дорівнює  $\alpha = (\sqrt{G} - 1)$ . За цієї умови отримано вирази для відносних значень секцій обмоток АТ (та, відповідно, напруг на них): першої  $W'_1 = \frac{\sqrt{G}}{\sqrt{G}-1} \left( 1 - \frac{\sqrt{G}}{\gamma} \cdot \frac{\beta}{K_1} \right)$ , останньої  $W'_{0,5J+1} = \frac{\sqrt{G}}{\sqrt{G}-1} \left( \frac{\beta}{K_1} - \frac{1}{\sqrt{G}} \right)$

й інших  $W'_i = \frac{\beta}{K_1} \frac{\gamma-1}{\sqrt{G}-1} \gamma^{J-i}$ . Значення  $K_1$ ,  $\gamma$  і  $G$  знаходимо з параметрів ПС, а  $\beta$  – з умови мінімізації встановленої потужності ВДТ, якій відповідає рівність напруг на його первинній обмотці на границях діапазону стабілізації –  $\beta = 2\gamma K_1 / (\gamma + G)$ . Отримані співвідношення однозначно дозволяють визначити топологію ВО; на їхній основі розроблено метод синтезу ТКВС даного класу.

За допомогою методу індукції знайдено узагальнюючий вираз [16,22] для визначення струму в  $i$ -тій обмотці АТ в  $j$ -тому стані при будь-яких комбінаціях параметрів  $G$ ,  $\mu$ ,  $\gamma$  і  $J$ :

$$I_{W_{ij}}^* = \begin{cases} \frac{1}{\mu\gamma^{(j-1)}} \cdot \frac{1}{\gamma^{0,5J}} - \frac{\gamma+1}{2} & j=1 \div 0,5J, \\ & i=1 \div (0,5J+1-j); \\ \frac{1}{\mu\gamma^{(j-1)}} - \frac{\gamma+1}{2} & j=1 \div 0,5J, \\ & i=(0,5J+2-j) \div (0,5J+1) \quad \text{та} \quad j=(0,5J+1) \div J, \\ & i=1 \div (J+1-j); \\ \frac{1}{\mu\gamma^{(j-1)}} \cdot \gamma^{0,5J} - \frac{\gamma+1}{2} & j=(0,5J+1) \div J, \\ & i=(J+2-j) \div (0,5J+1). \end{cases}$$

Для обох електромагнітних елементів знайдено і прослідковано залежності від параметрів ПС величини їхньої нормованої встановленої потужності (відповідно,  $P_{АТ}^*$  та  $P_{ВДТ}^*$ ), яку звичайно розраховують як напівсуму добутків найбільшого струму, що протікає в кожній обмотці, на найбільшу напругу на ній. Отримані дані для конкретного випадку параметрів ПС:  $U_{1\min}=140$  В,  $U_{1\max}=280$  В,  $U_{2\text{ном}}=220$  В та різних  $J$  зведено в табл. 1. З результатів розрахунку явно видно, що збільшення точності стабілізації вихідної напруги при незмінності його номінального значення й вхідного діапазону призводить до зростання сумарної встановленої потужності ЕМЕ  $P_{\Sigma}^*$ , причому, в основному, за рахунок  $P_{АТ}^*$ .

Таблиця 1

J	8	10	12	14	16	%
$P_{АТ}^*$	0,155	0,168	0,177	0,185	0,190	25
$P_{ВДТ}^*$	0,322	0,328	0,333	0,336	0,338	5
$P_{\Sigma}^*$	0,477	0,496	0,510	0,520	0,528	11

Запропоновано шляхи можливого зменшення встановленої потужності АТ, яка визначає його масогабаритні показники [6,16]. Перший стосується формування крайніх секцій АТ [19]. Це зумовлено тим, що при певній комбінації параметрів ПС для АТ у деяких варіантах ТКВС значення крайніх секцій витків може мати від'ємний знак (тобто їх

фазування протилежне обмотці, прийнятій за "позитивну" – обмотка  $W_{(n+1)}$  рис. 9, б), а в інших секціях він позитивний.

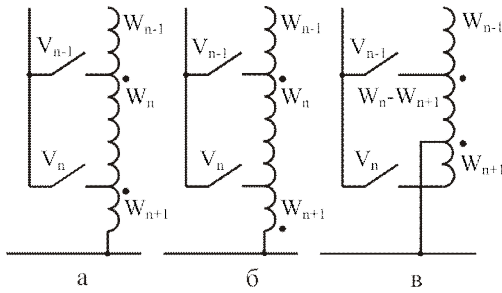


Рис. 9

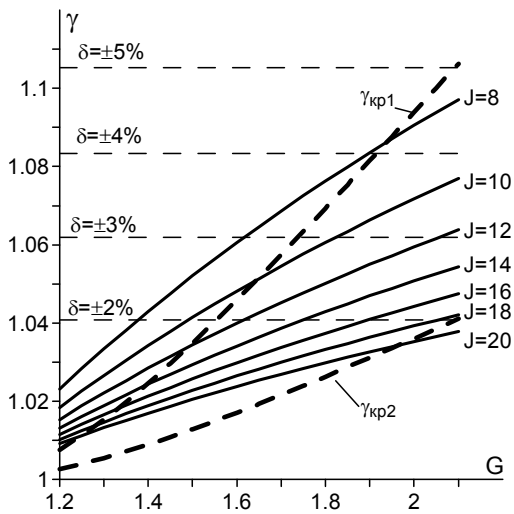


Рис. 10

го обмоток по струму в різних станах [5,27], що видно з табл. 2, де ці струми пронормовано по номінальному струму навантаження. Наслідком цього є те, що відносна встановлена потужність АТ у кожному зі станів  $P_{AT(j)}^*$ , яка визначається як напівсума добутків відносного значення струму в секції обмотки в  $j$ -тому стані на максимальну відносну напругу на ній (це та потужність АТ, на яку він би розраховувався, якби працював тільки в цьому  $j$ -тому стані), також є різною. Результати розрахунків для певних параметрів ПС і  $J=8, 12$  та  $16$  показано на рис. 11. По осі абсцис для кожного  $J$  зазначено номер стану  $j$ , по осі ординат відкладено  $P_{AT(j)}^*/P_{AT(j)\max}^*$ , де  $P_{AT(j)\max}^*$  – максимальна відносна встановлена потужність АТ, яка для кожного  $J$  приймається за 100% (штрихова горизонтальна лінія). Як

Таблиця 2

$j$	1 (7)	2 (8)	3 (9)	4 (10)	5 (11)	6 (12)
$I_{W_{1H}}$	41,3	9,7	20,2	48,4	74,9	100
$I_{W_2}$	55,1	12,9	26,9	64,5	100	99,8
$I_{W_3}$	37,4	8,8	18,3	43,9	100	67,8
$I_{W_4}$	27,9	6,5	13,6	100	74,6	50,6
$I_{W_5}$	22,0	5,2	100	78,8	58,7	39,8
$I_{W_6}$	17,9	100	81,7	64,3	48,0	32,5
$I_{W_7}$	100	83,8	68,4	53,8	40,2	27,2
$I_{W_{01}}$	100	94,4	89,1	84,1	79,4	74,9

На рис. 9 показано фрагменти схем ВО: якщо  $\gamma > \gamma_{кр1} = G/(2\sqrt{G}-1)$ , то  $W_{(n+1)}^* > 0$  (рис. 9, а), якщо  $\gamma < \gamma_{кр1}$ , то  $W_{(n+1)}^* < 0$  (рис. 9, б). При зниженні  $\gamma$  відносно  $\gamma_{кр1}$  число витків "від'ємної" секції збільшується й при деякому  $\gamma = \gamma_{кр2}$ , стане рівним числу витків передостанньої секції обмотки. На рис. 10 показано залежності  $\gamma_{кр1} = f(G)$ ,  $\gamma_{кр2} = f(G)$  і  $\gamma = G^{1/J}$  для різних  $J$ . Тут також позначено  $\gamma$ , яким відповідають конкретні значення рівнів нестабільності вихідної напруги  $\delta U_2$ . Як видно, зі зростанням  $J$  розширюються границі діапазону зміни вхідної напруги  $G$ , коли з'являється "від'ємна" обмотка. При цьому  $\delta U_2$  знаходиться в межах, які звичайно використовують на практиці (2÷5%).

Визначено величину встановленої потужності останніх секцій АТ –  $P_{W_n}^*$  і  $P_{W_{(n+1)}}^*$ . З метою їх зменшення, а, відповідно, й зниження величини встановленої потужності АТ у цілому, запропоновано реалізувати останню "від'ємну" секцію не як окрему секцію обмотки, а за рахунок частини передостанньої "позитивної" секції, так як це показано на рис. 9, в. В результаті досягається економія по цьому показнику, яка зростає від 1% при  $J=8$  до 10,5% при  $J=16$ . Таким чином доведено, що застосування для певних варіантів ТКВС запропонованого способу – виконання "від'ємної" обмотки з використанням сусідньої секції – призводить до зменшення встановленої потужності АТ.

Другий шлях зниження  $P_{AT}^*$  ґрунтується на вперше визначеному факті неоднаковості завантаження секцій його обмоток по струму в різних станах [5,27], що видно з табл. 2, де ці струми пронормовано по номінальному струму навантаження. Наслідком цього є те, що відносна встановлена потужність АТ у кожному зі станів  $P_{AT(j)}^*$ , яка визначається як напівсума добутків відносного значення струму в секції обмотки в  $j$ -тому стані на максимальну відносну напругу на ній (це та потужність АТ, на яку він би розраховувався, якби працював тільки в цьому  $j$ -тому стані), також є різною. Результати розрахунків для певних параметрів ПС і  $J=8, 12$  та  $16$  показано на рис. 11. По осі абсцис для кожного  $J$  зазначено номер стану  $j$ , по осі ординат відкладено  $P_{AT(j)}^*/P_{AT(j)\max}^*$ , де  $P_{AT(j)\max}^*$  – максимальна відносна встановлена потужність АТ, яка для кожного  $J$  приймається за 100% (штрихова горизонтальна лінія). Як видно,  $P_{AT(j)}^*$  в різних станах неоднакова, причому вона завжди менше  $P_{AT(j)\max}^*$ .

Отже доведено, що у виконавчому органі на основі ТКВС через наявність неоднаковості завантаження по струму в окремих станах реальна встановлена потужність у найбільш завантаженому режимі менша, ніж розрахована за традиційною методикою.

Проведено порівняння структур, що досліджувались, з однотрансформаторними з ключами, які розміщено в колі силового струму (РАТ). Показано, що по встановленій потужності ЕМЕ ці структури відрізняються несуттєво.

Виконано порівняння розглянутих типів ТКВС по вартісних показниках. Для прикладу, на рис. 12 показано результати порівняння для споживача потужністю 7,5 кВт у вигляді гістограм, де

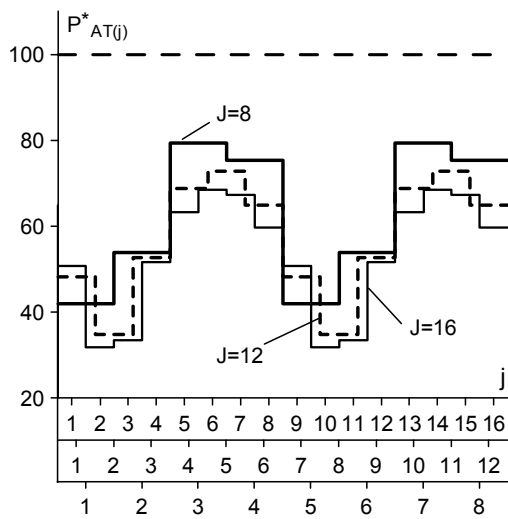


Рис. 11

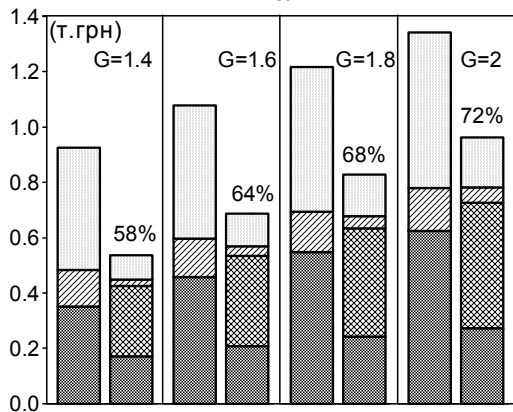


Рис. 12

наведена ціна основних елементів ВО (ліворуч – для одно-, а праворуч – для двотрансформаторних ТКВС. Більш темним фоном показана ціна АТ (РАТ), подвійним штрихуванням – ВДТ, одинарним – радіатора, а світлий фон відповідає ключам. З діаграм видно, що двотрансформаторні ВО дешевше однострансформаторних. Так, найменший вигреш – у випадку найширшого вхідного діапазону ( $G=2$ ) – дорівнює 28%. Для більш вузького діапазону ( $G=1,4$ ) він збільшується й становить 42%, причому на цю різницю найбільше впливає ціна ключів, і зі збільшенням потужності вона росте, а вартість трансформаторів відрізняється мало.

Таким чином, визначено й обґрунтовано, що двотрансформаторні ТКВС по сукупності характеристик переважають однострансформаторні й їх рекомендується застосовувати як ВО дискретних стабілізаторів змінної напруги.

На основі проведених досліджень розроблено методику розрахунку виконавчих органів дискретних стабілізаторів змінної напруги, що містять двотрансформаторні ТКВС з винесеними з кола силового струму ключами, яка дозволяє максимально ефективно використовувати електромагнітні елементи.

**Дослідження процесів регулювання в системах живлення електротехнологічного обладнання.** Регулювання параметрів електроенергії, зокрема напруги та струму, є широко розповсюдженим видом функціонального перетворення в системах живлення електротехнологічного обладнання, серед яких чільне місце займає електрозварювальна апаратура.

Основним оціночним показником зварювальних установок була і залишається вольтамперна характеристика (ВАХ) джерела живлення дуги. Тому було проведено детальне і наочне візуальне імітаційне моделювання поведінки сімейства ВАХ для електродугової установки в рамках пакету MATLAB з метою досягнення оптимальності їхньої форми. Вибір цього програмного продукту пов'язаний із належним розвитком розділу дослідження систем силової електроніки, SimPowerSystems, та відповідних його підрозділів [31]. В першу чергу це – Power Electronics та Extra Library/Three-Phase Library, що включають моделі електронних та електротехнічних компонентів, елементів та вузлів. Як правило, кожна модель має можливість внутрішньої варіативності. Наприклад, у блоці Universal Bridge є можливість вибору шести варіантів схем – від простої трифазної 6-діодної до схеми з IGBT-транзисторами із зворотними діодами. Якщо мати на увазі властивість дуальності роботи цих схем, то кількість пристроїв, доступних для моделювання, збільшиться до дванадцяти. Це ж стосується і вузлів управління для цього типу силового модуля. Тобто в цілому, наяву значний вибір макромоделей як силових вузлів так і блоків їхнього керування.

Була достатньо детально пророблена методологія моделювання та дослідження поведінки електротехнологічних систем на прикладі повністю керованого випрямляча за схемою Ларіонова [35], спрямована на використання в установках електродугового зварювання.

Як правило, джерело струму дуги в першу чергу повинно забезпечити незмінність струму при варіаціях напруги на дуговому проміжку. Показано, що ця задача досягається простими засобами при композиції зворотних зв'язків по струму у дуговому проміжку та напрузі на ньому. На рис. 13 показано модель системи із трифазним випрямлячем, на якій виконувалися перші етапи дослідження.

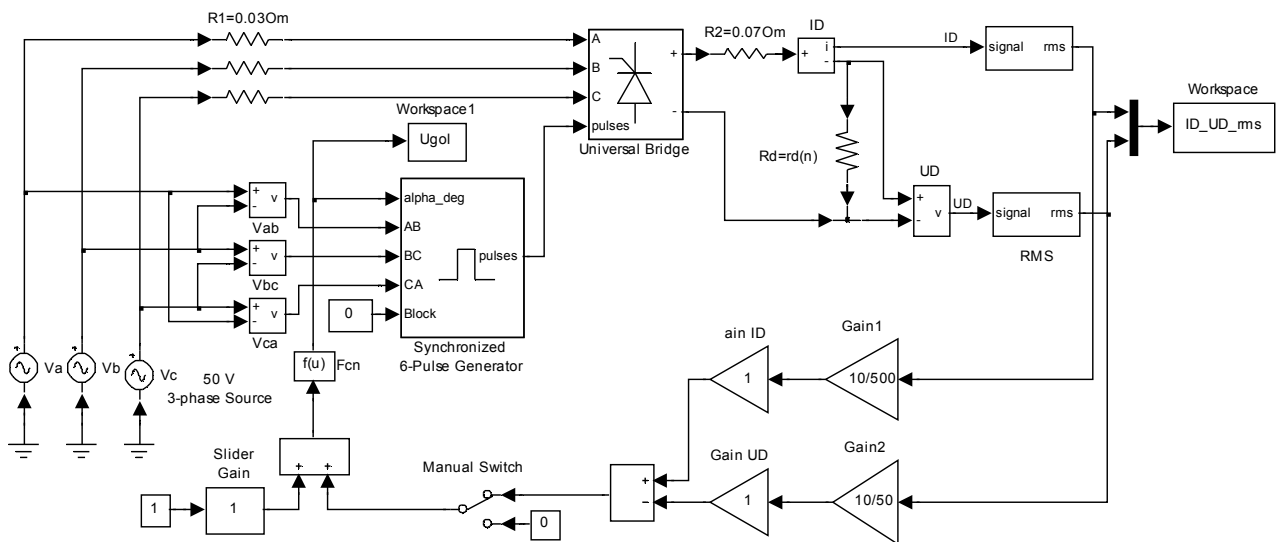


Рис. 13

Доведено, що при відповідному виборі значень коефіцієнтів підсилення по струму та напрузі отримуємо так звану "штикову" ВАХ, для якої характерні максимальна крутизна на ділянці стабільного струму і максимально високе значення напруги холостого ходу за межами цієї ділянки. Реалізація такої ВАХ сприяє стабільності збудження та горіння дуги. Констатовано, що, у подібних системах є три варіативні параметри – задаюча (опорна) величина та два рівні зворотного зв'язку – по струму (ЗЗС) та напрузі (ЗЗН). При цьому визначено їх раціональне функціональне призначення. Відповідна установка першого параметра є оперативною, тобто визначається користувачем, і повинна задавати струм дуги. Рівень зворотного зв'язку по струму дуги має по своєму значенню обмеження: він повинен бути таким, щоб його величина забезпечувала при максимальному значенні опорного параметра номінальне значення робочого струму установки. Тобто залишається ще один параметр, яким можливо впливати на форму ВАХ установки, – це рівень зворотного зв'язку по напрузі на дуговому проміжку. Наочно показано, що відповідна зміна цього параметра і є достатньо ефективним засобом формування та корекції ВАХ.

Обґрунтовано, що за деяких обставин неможливо установити рівень ЗЗН незмінним раз і назавжди. Так можливо діяти, наприклад, при використанні як джерела струму дуги трифазного випрямляча, коли приблизно на 80% діапазону регулювання струму зберігається режим стабілізації струму дуги, значення якого відповідно було задано опорним параметром. Проте, якщо ми перейдемо на роботу, що відповідає краям діапазону, а особливо в області струмів, близьких до номінального, то наяву буде погіршення режиму стабілізації струму. Було задано напрямки виправлення такого стану – адже це посильна задача імітаційного моделювання ВАХ. Якщо ж побудувати залежність рівня ЗЗН від задаючого параметра за умови збереження режиму стабілізації струму дуги у всьому діапазоні, то виникає нелінійна "сідлоподібна" характеристика, що має незмінну прямолінійну форму в середині діапазону і підвищену по його краях.

Визначено ряд параметрів, пов'язаних з такою її поведінкою. Основний параметр – це нелінійність регульованих характеристик (РХ) власне джерел струму. Наприклад, при фазовому регулюванні напруги впливає сама форма напруги живлення. Проте, навіть при прямокутній її формі або імпульсному регулюванні постійного струму нелінійність регульованої характеристики присутня. Адже для зварювальних установок актуальна теплова дія струму, пов'язана із діючим значенням напруги, і тому навіть при лінійній РХ для середніх значень вихідної напруги та ж характеристика для діючих значень буде суттєво відрізнитись і вже матиме нелінійну форму. Якщо мова іде про регулювання змінного струму, то задача одержання "штикової" ВАХ ще більше ускладнюється, оскільки на поведінку РХ суттєво впливає характер струму, тобто різниця фаз струму і напруги на навантаженні. Якщо при постійному струмі дуги можна синхронно із зміною ОП і досить однозначно (при невеликих змінах форми напруги) задавати рівень ЗЗН, забезпечуючи таким чином режим стабілізації струму у всьому його діапазоні, то при змінному струмі дуги треба вносити ще одне додаткове коригування.



Показано, як відповідним вибором значення рівня ЗЗН досягається прямовисність, опуклість чи вигнутість падаючої ділянки ВАХ. Також розроблено принципи роботи коригуючих ланок системи.

Проте, за технологічними умовами часто необхідно реалізовувати більш складну форму ВАХ джерела струму. Це, в першу чергу, стосується крапельно-дугового перенесення матеріалу електроду в зону шва, коли процес зварювання проходить із епізодичними, проте досить частими, короткими замиканнями дугового проміжку. При цьому гасне дуга, змінюється режим теплопередачі, що викликає так зване "залипання" електроду, тобто створює некомфортні умови роботи зварювальника, знижує продуктивність праці, сприяє появі браку. Усунення цього ефекту можна досягти відповідним збільшенням величини струму в момент замикання дугового проміжку із подальшим, за рахунок цього, його відновленням. Таким чином, ВАХ на вертикальній ділянці повинна мати в області малих напруг ступінь, ширина якого дорівнює приросту струму, необхідному для відновлення дугового проміжку (рис. 14, а). У раціональній системі з ВАХ такого роду реалізується проста зміна значення коефіцієнта підсилення ЗЗН, що відбувається стрибком при зниженні напруги в зоні зварювання нижче деякого значення, яке ідентифікується із замиканням дугового проміжку. В певних випадках перевага надається системам із плавним, а не ступінчастим, наростанням струму (рис. 14, б). При цьому технологічні процеси мають більш м'який характер за рахунок плавного наростання струму навантаження. Це зменшує розбризкування металу із зони зварювання, оскільки різке ступінчасте наростання струму сприяє вибухоподібному його виносенню за межі шва, знижує динамічне навантаження на обмотки силового трансформатора і т.п. Досліджувалися моделі систем із таким принципом функціонування, який хоча і дещо складніший, проте його схемотехнічна реалізація не викликала особливих труднощів. Було обґрунтовано, яким чином одержати, наприклад, рівність ступінців ВАХ у всьому діапазоні струмів і вирішено ряд інших супутніх питань.

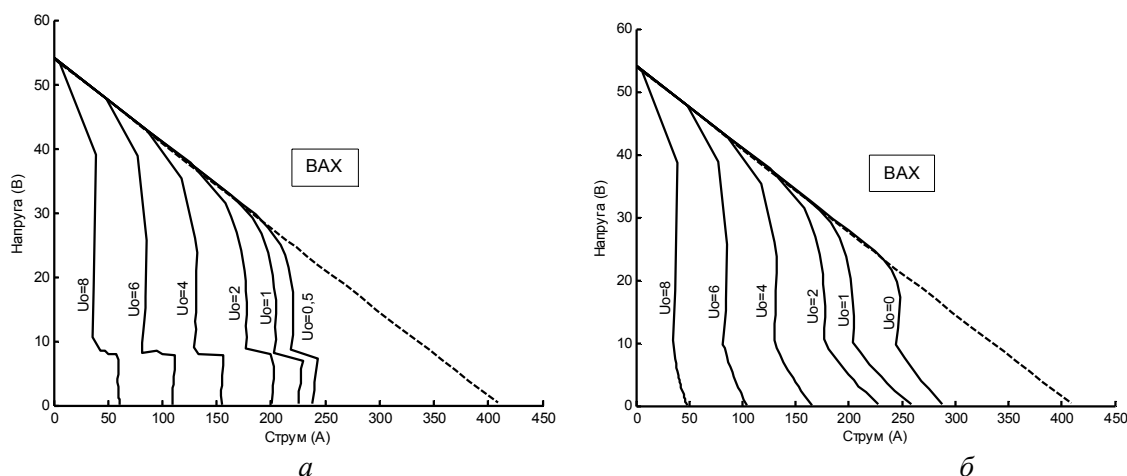


Рис. 14

Безумовно, застосування програмного пакету MATLAB корисне тільки на етапі розробки ідей та принципів роботи. При переході до практичної схемотехніки застосовувалися інші пакети – для моделювання вже конкретної схеми з не абстрактними, а реальними елементами, програми розробки друкованих плат і т.п. Застосування нових як елементної бази, так і програмних продуктів врешті решт виправдано більш якісними результатами.

На розроблених принципах були виготовлені і серійно застосовуються відповідні системи управління. В першу чергу – це контролер для повністю керованого трифазного дугового випрямляча по схемі Ларіонова, який повністю сумісний і для схем із урівнюючим дроселем та забезпечує перехід установки в один із трьох режимів зварювання: ручним електродом (ММА); у середовищі вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ); у середовищі інертних та активних газів (MIG/MAG). Також у цьому блоці реалізовано режим низькочастотної модуляції зварювального струму та можливість відповідного регулювання ВАХ та інших параметрів. Незважаючи на досить велику кількість компонентів, система реалізована на одній друкованій платі розміром 126,0x95,0 мм, чим вигідно і суттєво відрізняється (у декілька разів) від систем аналогічного призначення. Такий блок є основою системи управління багатofункціональних універсальних зварювальних дугових випрямлячів ВДУ-250, ВДУ-350 та ВДУ-505 (НВП "Плазма", Ростов-на-Дону).

Після установок з режимом ручного зварювання (ММА) друге місце за поширенням і застосуванням займають пристрої дугового зварювання в середовищі інертних (MIG) або активних (MAG) газів. Із-за більш складного комплексного їх функціонування в них не тільки виправдано, а і необхідно використання мікропрограмних компонентів, оскільки при цьому вони можуть забезпечити вищі рівні якості, комфортні умови праці тощо. Тому при розробці електронних систем управління цього призначення використовувалися мікроконтролери, що є характерним для сучасного етапу розвитку техніки. Перевага надавалася тим із них, що забезпечували внутрішньосистемне програмування, тобто для них власне програмування та корекцію програми роботи пристрою можливо проводити у вже повністю зібраному блоці. Такі компоненти входять у ціннову категорію звичайних цифрових мікросхем, проте при незрівнянно більших функціональних можливостях. Розповсюджений 8-розрядний мікроконтролер фірми "Atmel" ATmega48 (при вартості співставній 3–5 компонентам цифрової логіки загального призначення) має у своєму складі три окремі таймери, орієнтовані на реалізацію ШПМ, аналого-цифровий перетворювач із можливістю мультиплексування його входу на 8 окремих виводів мікроконтролера, термостабільний тактовий генератор із можливістю варіації частоти і т.п. Його використання дозволяє суттєво поліпшити можливості електротехнологічних установок без апаратного ускладнення, проте, звичайно, на етапі розробки зусилля перекладається на реалізацію та відладку відповідних мікропрограм [29,30,32,33,34].

Найбільш поширеним джерелом струму таких установок є знижувальний трансформатор, що працює на частоті струму мережі живлення у повторно-короткочасному режимі комутації. Проте жоден із способів її організації не може бути прийнятним, чи то по цінovому критерію, чи то по характеру електромагнітних процесів. Тому була розроблена концепція відмови від електромагнітного комутатора і використання замість нього пари зустрічно-паралельно включених тиристорів або одного триака, що може бути ефективним і в технічному, і в цінovому плані. Ефект досягався комутацією однофазного трансформатора при нульовому залишковому магнітному потоці в його осерді, тобто тоді, коли підключення до мережі живлення проходило без перехідного режиму. Було вирішено питання визначення величини залишкового магнітного потоку осердя трансформатора на момент кожного його наступного підключення і показано, що сам алгоритм роботи установки сприяє тому, що трансформатор на момент відключення знаходиться в стані, близькому до нульового значення магнітного потоку осердя, що і є необхідним.

Іншим найбільш складним і відповідальним вузлом установки є механізм подачі електроду. Як правило, це електропривод постійного струму (напруга – 12...36 В) із черв'ячним редуктором потужністю 20...120 Вт, який повинен забезпечувати регульовану швидкість подачі електроду 0...16 м/хв. та динамічне гальмування. Установка належної швидкості подачі досягається регулюванням напруги живлення двигуна електроприводу. Як регулятори були апробовані тиристори із напівперіодним фазовим регулюванням випрямленої змінної напруги і польові транзистори із застосуванням широтно-імпульсної модуляції частотою 10...18 кГц.

Запропонована організація пускового режиму роботи приводу без екстремальних кидків пускового струму, що дає можливість вибору транзисторів нижчого класу по їх струму. Крім того, плавне наростання швидкості подачі електроду в момент ініціалізації робочого режиму також сприяє швидшому і надійнішому запаленню дуги. Важливими є і інші моменти роботи установок, що поліпшилися за рахунок застосування мікропроцесорного керування.

Також розроблено контролери для установок дугового зварювання в середовищі інертних та активних газів, що представлені рядом блоків: РА-в4.0 (розмір – 78,7x92,2 мм), РА-в5.1 (102,0x78,7 мм), РА-в5.2 (93,8x78,7 мм), РА-в5.3 (111,5x78,7 мм) і т.п. Така різноманітність пояснюється різною потужністю електроприводу, функціональністю і т. п. Ними оснащуються автономні установки напівавтоматичного зварювання ПДГУ-125 та ПДГУ-150, а також чисто подавальні пристрої для комплектації згаданих універсальних зварювальних випрямлячів серії ВДУ. Перші і серійні зразки цих установок демонструвалися на різних виставках, у тому числі і на відомій і регулярній світовій виставці зварювального обладнання у м. Ессен, ФРН.

Крім вирішення теоретичних і практичних задач створення нової генерації перетворювачів напруги під час виконання НДР "Ренап" досліджувалися і питання загального плану у цьому важливому напрямку електротехніки. Зокрема, стан розвитку та перспективи вдосконалення систем нормалізації параметрів електроенергії [2,8,9,17], їхнє місце у галузі силової електроніки [15,37] у контексті введення в Україні нових гармонізованих стандартів якості ЕЕ [1] тощо.

Зауважимо, що виконані роботи, попри їх вагомість, не вичерпали всієї проблеми, вони повинні слугувати передумовою й підґрунтям нових досліджень для вирішення науково-технічних питань, що будуть висуватися практикою на наступних рівнях розвитку перетворювальної техніки як важливого й необхідного напрямку сучасної електротехніки. Зокрема, чекають свого вирішення важливі питання унормованої комутації секцій обмоток трансформаторів, особливо у силових виконавчих структурах з кількома електромагнітними елементами, а також у багатофазних системах; стабілізація вихідної напруги змінного струму з одночасним покращенням гармонічного складу вхідного (мережевого) струму для навантажень з імпульсним споживанням енергії тощо.

**Висновки.** Виконані дослідження є важливим кроком у розвитку теорії регулювання параметрів електроенергії. Розширення номенклатури та сфер застосування нової генерації перетворювачів напруги, крім внеску у вирішення наукових проблем та задач енерго-та ресурсозбереження, буде сприяти зміщенню акцентів у електротехнічній промисловості в бік наукоємних технологій.

1. *Липківський К.О.* Деяко про "гармонізовані" стандарти // Техн. електродинаміка. – Тем. вип. "Силовa електроніка та енергоефективність". – Ч.2. – 2006. – С. 40–42.
2. *Липківський К.О.* Нормалізація параметрів електроенергії як запорука успішної роботи електроприймачів. – Матеріали МНТК "Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми й перспективи". – Тернопіль, ТДТУ ім. Ів. Пулюя. – 2005. – С. 18–19.
3. *Липківський К.О.* Оптимізація розрахункових характеристик виконавчих структур дискретних стабілізаторів напруги // Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2006. – №2 (14). – С. 98–99.
4. *Липківський К.О.* Особливості комплексування регульовальних блоків дискретних стабілізаторів напруги змінного струму // Техн. електродинаміка. – 2008. – №6. – С. 29–36.
5. *Липківський К.О.* Особливості розрахунку одиночних секціонованих автотрансформаторів з різними режимами роботи // Техн. електродинаміка. – 2008. – №4. – С. 39–42.
6. *Липківський К.О.* Особливості розрахунку секціонованого автотрансформатора у складі ТКВС дискретного стабілізатора напруги // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – № 20. – С. 70.
7. *Липківський К.О.* Порівняльна оцінка основних варіантів побудови розрахункових характеристик виконавчих структур дискретних стабілізаторів напруги змінного струму // Техн. електродинаміка. – 2005. – №5. – С. 28–31.
8. *Липківський К.О.* Порівняльна оцінка та перспективи вдосконалення дискретних стабілізаторів напруги змінного струму // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2005. – №2 (11). – С. 72–73.
9. *Липківський К.О.* Стан розвитку та перспективи вдосконалення трансформаторно-ключових виконавчих структур дискретних стабілізаторів напруги змінного струму // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – №1 (16). – Ч.2. – С. 86–91.
10. *Липківський К.О., Мартинов В.В., Руденко Ю.В., Халіков В.А., Можаровський А.Г., Лебедєв Б.Б.* Дослідження та розробка напівпровідниково-трансформаторних перетворювачів для живлення електротехнологічного обладнання // Праці Інституту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць. – К.: ІЕД НАНУ. – 2009. – Вип. 23. – С. 72–82.
11. *Липківський К.О., Можаровський А.Г.* Дискретні стабілізатори напруги змінного струму – зони стабілізації та зони гарантованого функціонування споживачів // Техн. електродинаміка. – Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – Ч.2. – 2008. – С. 87–88.
12. *Липківський К.О., Можаровський А.Г.* Аналіз вхідних та вихідних характеристик дискретних стабілізаторів напруги змінного струму // Техн. електродинаміка. – 2005. – №4. – С. 38–42.
13. *Липковський К.А.* Влияние параметров питающей сети на рабочую характеристику исполнительного органа дискретного стабилизатора напряжения переменного тока // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – Ч.5. – 2006. – С. 74–76.
14. *Липковський К.А.* Исполнительный орган дискретного стабилизатора напряжения переменного тока с декомпозицией ключевых элементов коммутатора // Техн. електродинаміка. – 2006. – №2. – С. 35–41.
15. *Липковський К.А.* Наши первые конференции по преобразовательной технике. Краткий исторический экскурс и комментарии // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силовa електроніка та енергоефективність". – Ч.2. – 2009. – С. 26–29.
16. *Липковський К.А.* Предпосылки коррекции методики расчета секционированного автотрансформатора в силовой исполнительной структуре дискретного стабилизатора напряжения переменного тока // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2006. – №3 (15). – С. 53–55.

17. *Липковский К.А.* Состояние и перспективы развития теоретических и практических аспектов проблемы регулирования напряжения переменного тока // Техн. електродинаміка. – Тем. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність". – Ч.1. – 2006. – С. 8–10.
18. *Липковский К.А.* Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – Киев: Наук, думка, 1983. – 216 с.
19. *Липковский К.А.* Уменьшение установленной мощности секционированного автотрансформатора дискретного стабилизатора напряжения за счет переформатирования крайних секций // Техн. електродинаміка. – 2007. – №4. – С. 46–49.
20. *Липковский К.А., Можаровский А.Г.* Исполнительные структуры стабилизаторов напряжения с двумя электромагнитными элементами // Техн. електродинаміка. – 2006. – №1. – С. 31–38.
21. *Липковский К.А., Можаровский А.Г.* Модернизация закона выбора коэффициентов передачи трансформаторно-ключевой исполнительной структуры дискретного стабилизатора напряжения переменного тока // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2005. – Ч.1. – С. 69–72.
22. *Липковский К.А., Можаровский А.Г.* Обобщенные зависимости токов в обмотках секционированного автотрансформатора дискретного стабилизатора напряжения от параметров поля стабилизации // Техн. електродинаміка. – 2007. – №2. – С. 20–24.
23. *Липковский К.А., Руденко Ю.В.* Особенности внешней характеристики секционированного стабилизированного источника электропитания // Техн. електродинаміка. – 2009. – №4. – С. 7–11.
24. *Липковский К.А., Руденко Ю.В.* Пути повышения точности стабилизации выходного напряжения секционированных источников вторичного электропитания // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2009. – Вип. 22. – С. 49–52.
25. *Липковский К.А., Руденко Ю.В.* Стабилизация выходного напряжения высоковольтных источников электропитания // Техн. електродинаміка. – 2009. – №2. – С. 36–41.
26. *Липковский К.А., Руденко Ю.В.* Установленная мощность трансформаторов в дискретных стабилизаторах напряжения переменного тока // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2009. – Вип. 24. – С. 55–59.
27. *Липковский К.А., Халиков В.А., Можаровский А.Г.* Двухтрансформаторная ТКИС – эффективный исполнительный орган дискретных стабилизаторов переменного напряжения // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч.4. – С. 59–63.
28. *Можаровський А.Г.* Дискретні стабілізатори напруги змінного струму з двотрансформаторними виконавчими структурами: автореф. дис. канд.техн.наук: спец. 05.09.12 "Напівпровідникові перетворювачі електроенергії" – Київ, 2009. – 19 с.
29. *Халіков В.А.* Ефективне управління установками дугового зварювання // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – №1(16). – С. 48–49.
30. *Халіков В.А.* Ефективне формування та корекція вольтамперних характеристик установок дугового зварювання // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2006. – №2(16). – С. 172–174.
31. *Халіков В.А.* Ефективні установки дугового зварювання та їх розробка за допомогою сучасних програмних пакетів // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2005. – №2(11). – Ч.2. – С. 39–40.
32. *Халіков В.А.* Перехідні процеси при комутації трансформаторів і можливості їх уникнення // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН У: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип.20. – С. 46–47.
33. *Халіков В.А., Липківський К.О., Шатан О.Ф.* Шляхи та засоби вдосконалення установок електродугового зварювання // Техн. електродинаміка. – 2009. – №1. – С. 77–80.
34. *Халіков В.А., Можаровський А.Г., Шатан О.Ф., Паханьян В.М.* Контролери установок електродугового зварювання в середовищі захисних газів // Техн. електродинаміка. – 2008. – №5. – С. 68–75.
35. *Халіков В.А., Паханьян В.М., Шатан О.Ф.* Імітаційне моделювання та корекція вольтамперних характеристик джерел струму зварювальної дуги // Техн. електродинаміка. – 2006. – №3. – С. 18–25.
36. *Халіков В.А., Можаровський А.Г.* Расчет установленной мощности двухтрансформаторных стабилизаторов напряжения дискретного действия // Техн. електродинаміка. – 2006. – №4. – С. 35–40.
37. *Шидловський А.К., Липківський К.О.* Розвиток досліджень по перетворенню та стабілізації параметрів електромагнітної енергії в Інституті електродинаміки НАН України // Техн. електродинаміка. – 2007. – №3. – С. 11–26.

Надійшла 13.10.2009