

УДК 621.791

В.В. Самотий, В.І. Білобородченко

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра “Зварювальне виробництво, діагностика та відновлення металоконструкцій”**МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗРАХУНКУ РОЗГАЛУЖЕНОГО  
РОЗРЯДНОГО КОНТУРУ КОНДЕНСАТОРНИХ ЗВАРЮВАЛЬНИХ  
КОНТАКТНИХ МАШИН З МОДУЛЯЦІЄЮ СТРУМУ**

© Самотий В.В., Білобородченко В.І., 2002

**Запропоновано математичне забезпечення (модель) для розрахунку розгалужених розрядних ланцюгів конденсаторних накопичувачів енергії трансформаторних контактних зварювальних машин, що ґрунтується на чотирьох базових рівняннях логічних змінних стану вентиляльних елементів та їх доповнень у вигляді алгебро-диференціальних рівнянь зміни електромагнітних параметрів контуру.**

**The software (model) for account of the digit ramified circuits of condenser sources of energy of contact welding machines is offered. The mathematical model is based on four base equations of a logic variable condition of semi-conductor elements and their additions as a complex of the algebraic and differential equations of change of electromagnetic parameters of a contour.**

Стабільна якість контактного точкового мікрозварювання забезпечується узгодженням принципів саморегулювання процесу розряду батареї конденсаторів з підтриманням напруги певного рівня на електродах. Останнє досягається на дозувальниках енергії з регульованою зовнішньою характеристикою в режимі джерела напруги [1], що значною мірою забезпечується з решта рівних умов, обраною схемою розрядного контуру та перекомутацією його ланцюгів в часі протікання розрядного струму.

Існуючі прикладні моделі розрахунку розрядних контурів ємнісних накопичувачів енергії [2, 3] орієнтовані на його спрощену конфігурацію і принципово не уможливають описання перехідних процесів, відповідних умовам формування модульованого за фронтом зростання імпульсу зварювального струму.

Розрядний силовий контур (рис. 1, а) для розробленої серії мікроконтактних машин М-1500 [4, 5] задовольняє, в певних межах, вищенаведене.

Він складається з набору робочих  $C_p$  та прохідних  $C_n$  ємностей, навантажених на зварювальний трансформатор з повітряним проміжком. Дозвіл на розряд робочої ємності задається тиристором VS2, модуляція фронту струму – тиристором VS1. Некеровані вентиля VD1, VD2 забезпечують заряд ємності  $C_p$ , зміщення з метою перекомутації струмів розряду та шунтування частини первинної обмотки зварювального трансформатора Тр.

Робота контуру пояснюється рівняннями його динаміки, які, при інтегруванні числовими методами, дають можливість описання перехідних процесів [6–9].

У такому випадку чільним є вибір моделі напівпровідникового вентиля з двома протилежними підходами щодо описання: а) заміна вентиля деяким RCL-ланцюжком; б) робота в режимі ідеального ключа [6, 9]. У першому випадку наявні недоліки: при від’ємній напрузі на вентилі підбір RCL-параметрів має забезпечити його надійне вимкнення, що

можливо тільки при різкому зростанні активного опору. Останнє приводить до появи жорстко обмежених диференціальних рівнянь, які можна розв'язати тільки неявними методами чисельного інтегрування [8, 9]. Такі методи дають принципово дискретні розв'язки, що вимагає знаходження кореня функції струму вентиля  $i_B(t) = 0$ . Другий підхід не має вказаних недоліків, проте вимагає змінної структури електричного ланцюга, тобто кожна комбінація відкритих та зачинених вентилів апроксимується власною системою диференціальних рівнянь. Реально схема має 4 вентиля в двох логічних станах ( $0 \leftrightarrow 1$ ), що становить 16 комбінацій (таблиця).

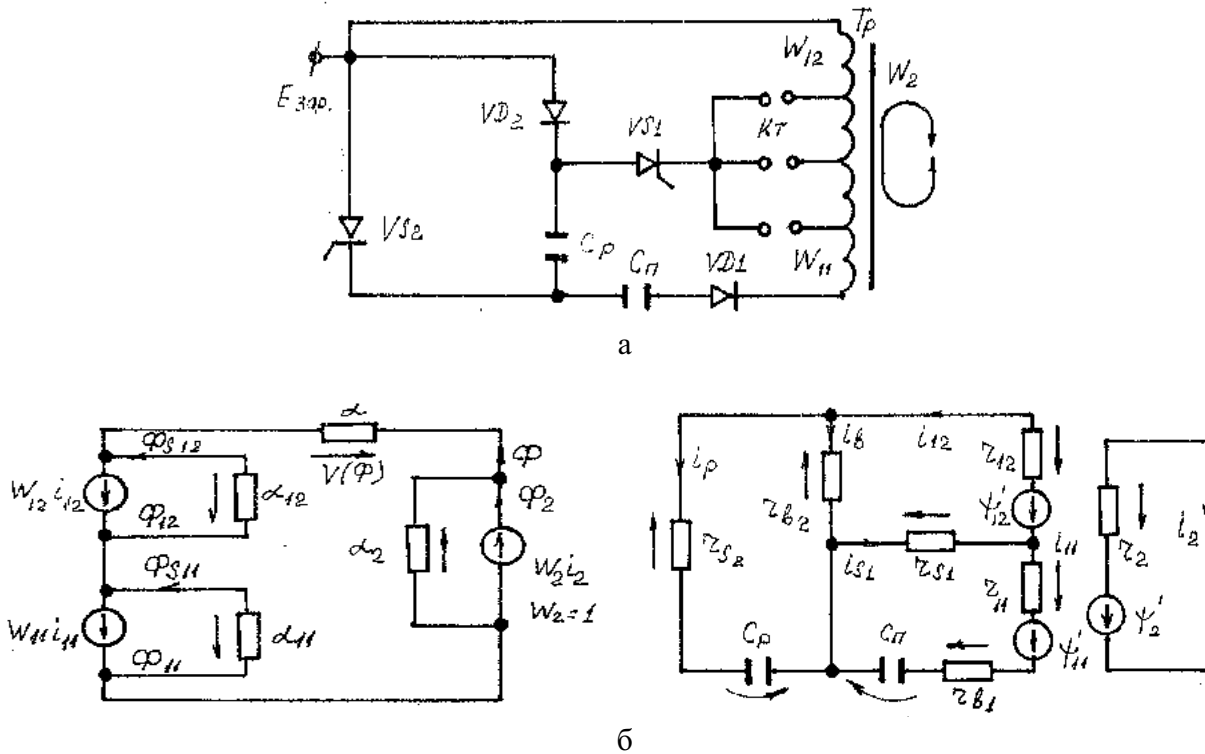


Рис. 1. Схема електрична принципова (а) та розрахункові схеми електричного та магнітного ланцюгів (б) розгалуженого розрядного контуру (комбінація 4, таблиця)

### Матриця стану вентилів розрядного контуру

| Вентиль | Комбінація |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|---------|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
|         | 1          | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| VS2     | 0          | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| VS1     | 0          | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  |
| VD2     | 0          | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| VD1     | 1          | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |

Розрахункова схема для комбінації 4 (таблиця), коли всі вентиля відкриті, показана на рис. 1, б. Позначення прийняті в схемі:  $r_{Si}$ ,  $r_{Bi}$  ( $i = 1, 2$ ) – активні опори вентилів у відкритому стані;  $r_{11}$ ,  $r_{12}$ ,  $r_2$  – активні опори числа витків  $W_{11}$ ,  $W_{12}$ ,  $W_2$  первинної та вторинної обмоток трансформатора;  $C_p, C_n$  – ємність конденсаторів;  $U_p, U_n$  – відповідний ім

спад напруги;  $i_{11}, i_{12}, i_2$  – струми обмоток трансформатора;  $i_{S1}, i_B, i_p$  – струми відповідно вентилів VS1, VD2, VS2;  $\Phi_{S11}, \Phi_{S12}, \Phi_{S2}$  – повні магнітні потоки розсіювання;  $\Phi_{11}, \Phi_{12}, \Phi_2$  – повне потокозчеплення обмоток;  $\Phi_{11}, \Phi_{12}, \Phi_2$  – повні магнітні потоки обмоток;  $\Phi$  – повний магнітний потік;  $\alpha_{S11}, \alpha_{S12}, \alpha_{S2}$  – зворотні індуктивності розсіювання;  $V(\Phi)$  – спад магнітної напруги в магнітопроводі трансформатора;  $\alpha$  – статичний магнітний опір магнітопроводу.

Для комбінації 4 (таблиця) рівняння електричних контурів та струмів:

$$\begin{cases} \Phi_{11}^* = r_{S1} i_{S1} - (r_{11} + r_{B1}) i_{11} - U_n; \\ \Phi_{12}^* = -r_{12} i_{12} - r_{S1} i_{S1} - r_{B2} i_B; \\ \Phi_2^* = -r_2 i_2; \\ U_p = r_{S2} i_p - r_{B2} i_B. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_B = i_{12} - i_p; \\ i_{S1} = i_{12} - i_{11}. \end{cases} \quad (2)$$

Сумісний розв'язок (1, 2) відносно повних потокозчеплень обмоток становить:

$$\begin{cases} \Phi_{11}^* = -U_n - (r_{11} + r_{B1} + r_{S1}) i_{11} + r_{S1} i_{12}; \\ \Phi_{12}^* = \frac{r_{B2}}{r_{S2} + r_{B2}} U_p + r_{S1} i_{11} - \left( r_{12} + r_{S1} + \frac{r_{B2} r_{S2}}{r_{B2} + r_{S2}} \right) i_{12}; \\ \Phi_2^* = -r_2 i_2. \end{cases} \quad (3)$$

Струми вентилів, представлені через струми обмоток та напругу на ємності  $C_p$ :

$$\begin{cases} i_B = \left[ r_{S2} / (r_{S2} + r_{B2}) \right] i_{12} - \left[ 1 / (r_{S2} + r_{B2}) \right] U_p; \\ i_p = \left[ r_{B2} / (r_{S2} + r_{B2}) \right] i_{12} + \left[ 1 / (r_{S2} + r_{B2}) \right] U_p; \\ i_{S1} = i_{12} - i_{11}. \end{cases} \quad (4)$$

Рівняння напруг конденсаторів та стану контурів магнітного ланцюга:

$$\begin{cases} U_p^* = - \left\{ \left[ r_{B2} / (r_{S2} + r_{B2}) \right] i_{12} + \left[ 1 / (r_{S2} + r_{B2}) \right] U_p \right\} / C_p; \\ U_n^* = i_{11} / C_n. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{S11} \alpha_{11} &= W_{11} i_{11}; \Phi_{12} \alpha_{12} = W_{12} i_{12}; \Phi_{S2} \alpha_2 = i_2; \alpha \Phi = W_{11} i_{11} + W_{12} i_{12} + i_2; \\ \alpha &= V(\Phi) / \Phi; \Phi_{11} = \Phi + \Phi_{S11}; \Phi_{12} = \Phi + \Phi_{S12}; \Phi_2 = \Phi + \Phi_{S2}. \end{aligned} \quad (6)-(8)$$

Розв'язок (6)–(8) для струмів обмоток при  $\psi_{11} = W_{11} \Phi_{11}$ ,  $\psi_{12} = W_{12} \Phi_{12}$ ,  $\psi_2 = \Phi_2$ :

$$i_{11} = (\alpha_{11} / W_{11}^2) \cdot (\Phi_{11} - W_{11} \Phi); i_{12} = (\alpha_{12} / W_{12}^2) \cdot (\Phi_{12} - W_{12} \Phi); i_2 = \alpha_2 (\Phi_2 - \Phi). \quad (9)$$

Підстановка (9) в (6)–(8) дає узагальнене рівняння магнітного ланцюга:

$$(\alpha_{11} / W_{11}) \cdot (\Phi_{11} - W_{11} \Phi) + (\alpha_{12} / W_{12}) \cdot (\Phi_{12} - W_{12} \Phi) + \alpha_2 (\Phi_2 - \Phi) = \alpha \Phi. \quad (10)$$

Звідки, поклавши  $\alpha_c = \frac{\partial V(\Phi)}{\partial \Phi} + \alpha_{11} + \alpha_{12} + \alpha_2$ , отримаємо

$$\Phi^* = (\alpha_{11} / \alpha_c W_{11}) \Phi_{11}^* + (\alpha_{12} / \alpha_c W_{12}) \Phi_{12}^* + \alpha_2 / \alpha_c \Phi_2^*. \quad (11)$$

Диференціювання комплексу (9) по часу розряду:

$$i_{11}^* = (\alpha_{11} / W_{11}^2) \cdot (\Phi_{11}^* - W_{11} \Phi^*); i_{12}^* = (\alpha_{12} / W_{12}^2) \cdot (\Phi_{12}^* - W_{12} \Phi^*); i_2^* = 0. \quad (12)$$

Диференціальні рівняння струмів у витках  $W_{11}$ ,  $W_{12}$  первинної обмотки:

$$i_{11}^* = a_{11}\Phi_{11}^* + a_{12}\Phi_{12}^* + a_{13}\Phi_2^*; i_{12}^* = a_{21}\Phi_{11}^* + a_{22}\Phi_{12}^* + a_{23}\Phi_2^*, \quad (13)$$

$$a_{11} = \alpha_{11}(\alpha_c - \alpha_{11})/(\alpha_c W_{11}^2); a_{12} = -\alpha_{11}\alpha_{12}/(W_{11}W_{12}\alpha_c); a_{13} = -\alpha_{11}\alpha_2/(W_{11}\alpha_c);$$

$$a_{21} = -\alpha_{11}\alpha_{12}/(W_{11}W_{12}\alpha_c); a_{22} = \alpha_{12}(\alpha_c - \alpha_{12})/(W_{12}^2\alpha_c); a_{23} = -\alpha_{12}\alpha_2/(W_{12}\alpha_c).$$

$$i_2 = \alpha\Phi - W_{11}i_{11} - W_{12}i_{12}. \quad (14)$$

Комплекс (3, 5, 11, 13, 14) становить повну систему алгебро-диференціальних рівнянь, що описують роботу схеми розряду комбінації 4. Комбінації 1,10...12 адекватні комбінації 9 (таблиця), коли всі вентиля відповідають умові “лог.0”, оскільки жодна з них, у первинному ланцюгу не становить замкнутий контур, тобто всі струми відсутні

$$\begin{cases} i_{11} = i_{12} = i_{S1} = i_p = 0; \Phi^* = (\alpha_2/\alpha_c)\Phi_2^*; \\ i_2 = \alpha\Phi; \varphi_2^* = -r_2i_2; \alpha_c = \alpha^* + \alpha_2; \\ U_p^* = U_n^* = 0; i_{11}^* = i_{12}^* = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Введення в рівняння динаміки додаткових логічних змінних скорочує загальну кількість рівнянь, а в деяких випадках [7, 8] зводить їх до однієї системи. Для визначення умов переходу вентилів в інший стан введемо додаткові логічні змінні: KSR-вентиль  $VS_2$ , KSV-вентиль  $VD_2$ , KSP- $VS_1$ , KSC- $VD_1$ . Якщо вентиль закритий, то його логічна змінна дорівнює “лог.0”, якщо відкритий – “лог.1”. Тоді комбінація 4 в світлі логічних змінних описується умовою

$$KSR = KSV = KSP = KSC = 1. \quad (16)$$

Перехід до непровідного стану вентилів визначається струмами

$$\text{if } \begin{cases} i_p \leq 0 \rightarrow KSR = 0; i_B \leq 0 \rightarrow KSV = 0; \\ i_{S1} \leq 0 \rightarrow KSP = 0; i_{11} \leq 0 \rightarrow KSC = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Тоді, наприклад, логіка дев'ятої комбінації становить

$$KSR = KSV = KSP = KSC = 0. \quad (18)$$

В такому випадку з аналізу знаків напруг  $U_p$ ,  $U_n$  впливає, що вентиля  $VD_2$ ,  $VD_1$  будуть закритими, перейти у провідний стан одночасно можуть тільки  $VS_1$ ,  $VS_2$  (утворення замкнутого контуру). Умовою їх відкриття, крім сигналу керування, має бути

$$U_p - W_{12}\Phi^* \geq 0. \quad (19)$$

При виконанні (19) реалізується комбінація 14:  $KSR = KSP = 1$ ;  $KSC = KSV = 0$ .

Узагальнення, таким чином, через логічні змінні матриці стану (таблиця), зводить її до чотирох базових комбінацій з проміжними KS, KK – логічними змінними

$$1) KSR + KSP + KSV > 1; KSC = 0; i_{11} = U_n^*,$$

$$KS = KSR \cdot KSP \cdot KSC \cdot KSV; KK = KSR \cdot KSP \cdot KSV, \quad (20)$$

$$dU_p/dt = U_p^* = \left\{ \left[ KS(U_p + r_{12}i_{12}) / (r_{B2} + r_{S2}) \right] + \left[ i_{12} / (1 - KSV) \right] \right\} / C_p.$$

Тоді рівняння (11, 13) можуть бути приведені до вигляду:

$$\begin{cases} \Phi^* = g_{12}\Phi_{12}^* + g_2\Phi_2^*; \\ i_{12}^* = a_{12}\Phi_{12}^* + a_{22}\Phi_2^*. \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{aligned}\varphi_2^* &= -r_2 i_2; & i_2 &= \alpha \Phi - W_{12} i_{12}; & g_2 &= \alpha_2 / (\alpha + W_{12}^2 \alpha_{12} + \alpha_2); \\ a_{22} &= -W_{12} \alpha_{12} g_2; & a_{12} &= \alpha_{12} (1 - W_{12} g_{12}); & g_{12} &= W_{12} \alpha_{12} / (\alpha + W_{12}^2 \alpha_{12} + \alpha_2); \\ \varphi_{12}^* &= U_p (1 - KSV) - [r_{12} + r_{S1} + r_{S2} (1 - KSV) + r_{B2} (1 - KSR)] i_{12} - r_{B2} (i_{12} - i_p) KK.\end{aligned}$$

$$2) KSR + KSP + KSV \neq 1; \quad KSC = 1; \quad (22)$$

$$\begin{cases} \varphi_{11}^* = -U_n - [(r_{11} + r_{B1} + r_{S1}) i_{11} - r_{S1} i_{12}] KSP; \\ \varphi_{12}^* = -U_{12} + U_{11} + U_{rv} KSR, \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{aligned}U_{12} &= [r_{S1} + r_{12} + r_{S2} (1 - KSV) + r_{B2} (1 - KSR) + r_{B2} r_{S2} KSV \cdot KSR (r_{S2} + r_{B2})] i_{12} KSP; \\ U_{rv} &= U_p (1 - KSV) + [r_{B2} U_p KSV / (r_{S2} + r_{B2})]; \quad U_{11} = r_{S1} i_{11} KSP.\end{aligned}$$

Зміна напруг на конденсаторах відповідно описується у вигляді рівнянь

$$\begin{cases} U_p^* = -i_{12} KSR - [(r_{S2} i_{12} - U_p) KSV \cdot KSR / (r_{S2} + r_{B2})]; \\ U_n^* = i_{11} KSP / C_n, \end{cases} \quad (24)$$

а зміна магнітного потоку (11) в логічних змінних набуває вигляду:

$$\Phi^* = g_{11} \varphi_{11}^* + g_{12} \varphi_{12}^* + g_2 \varphi_2^*, \quad (25)$$

$$\begin{aligned}\varphi_2^* &= -r_2 i_2; \quad i_2 = \alpha \Phi - (W_{11} i_{11} + W_{12} i_{12}) KSP; \quad g_{11} = W_{11} \alpha_{11} KSP / \alpha_c; \\ g_2 &= \alpha_2 / \alpha_c; \quad \alpha_c = \alpha + (W_{11}^2 \alpha_{11} + W_{12}^2 \alpha_{12}) KSP + \alpha_2; \quad g_{12} = W_{12} \alpha_{12} KSP / \alpha_c.\end{aligned}$$

Відповідні коефіцієнти системи (13) набувають вигляду:

$$a_{11} = \alpha_{11} KSP (1 - W_{11} g_{11}); \quad a_{12} = -W_{11} \alpha_{11} KSP g_{12}; \quad a_{13} = -W_{11} \alpha_{11} KSP g_2; \quad (26)$$

$$a_{21} = -W_{12} \alpha_{12} KSP g_{11}; \quad a_{22} = \alpha_{12} KSP (1 - W_{12} g_{12}); \quad a_{23} = -W_{12} \alpha_{12} KSP g_2. \\ ) KSR = KSV = 0; \quad KSC = KSP = 1. \quad (27)$$

Рівняння конденсаторів, струмів та магнітного потоку:

$$U_p^* = 0; \quad U_n^* = i_{11} / C_n; \quad i_{12} = i_{12}^* = 0; \quad i_{11}^* = a_{11} \varphi_{11}^* + a_{13} \varphi_2^*; \quad \Phi^* = g_{11} \varphi_{11}^* + g_2 \varphi_2^*, \quad (28)$$

$$\begin{aligned}\varphi_{11}^* &= -U_n - (r_{S1} + r_{11} + r_{B1}) i_{11}; \quad \varphi_2 = -r_2 i_2; \quad i_2 = \alpha \Phi - W_{11} i_{11}; \quad g_{11} = W_{11} \alpha_{11} / \alpha_c; \\ g_2 &= \alpha_2 / \alpha_c; \quad \alpha_c = \alpha + W_{11}^2 \alpha_{11} + \alpha_2; \quad a_{11} = \alpha_{11} (1 - W_{11} g_{11}); \quad a_{13} = -W_{11} \alpha_{11} g_2.\end{aligned}$$

$$4) KSR + KSV = 1; \quad KSC = 1; \quad KSP = 0. \quad (29)$$

Рівняння напруг і струмів конденсаторів:

$$U_p^* = -i_p / C_p; \quad U_n^* = i_{11} / C_p; \quad i_p = i_{11} (1 - KSV) - [(r_{S2} i_{11} - U_p) KSR \cdot RSV / (r_{B2} + r_{S2})]. \quad (30)$$

Комплекс (28) для комбінації 4 набуває вигляду:

$$\Phi^* = g_1 \varphi_1^* + g_2 \varphi_2^*; \quad i_{11}^* = a_1 \varphi_1^* + a_2 \varphi_2^*; \quad i_{12} = i_{11}, \quad (31)$$

$$\varphi_1^* = -U_n + U_p (1 - KSV) - [r_1 + r_{S2} (1 - KSV) + r_{B2} KSV (1 - KSR)] i_{11}; \quad r_1 = r_{11} + r_{12} + r_{B1};$$

$$\begin{aligned}\varphi_2^* &= -r_2 i_2; \quad i_2 = \alpha \Phi - (W_{11} + W_{12}) i_{11}; \quad g_2 = \alpha_2 / \alpha_c; \quad g_1 = (W_{11} + W_{12}) \alpha_1 / \alpha_c; \\ a_1 &= \alpha_1 [1 - (W_{11} + W_{12}) g_1]; \quad a_2 = -(W_{11} + W_{12}) \alpha_1 g_2; \quad \alpha_1 = \alpha_{11} \alpha_{12} / (\alpha_{11} + \alpha_{12}); \\ \alpha_c &= \alpha + (W_{11} + W_{12})^2 \alpha_1 + \alpha_2.\end{aligned}$$

Система 4-несучих логічних рівнянь (20), (22), (27), (29) та їх алгебро-диференціальних розкриттів є математичною моделлю розрядного контуру, що суворо описує фізичні процеси: керуючий імпульс від блока завдання напруг заряду робочих ємностей  $C_p$  на тиристор  $VS2$  переводить останній в стан "лог.1". Розряд відбувається по контуру  $C_p$ - $C_{II}$ - $VD2$ -( $W_{11}+W_{12}$ )- $VS2$ ; робоча та прохідна ємності з'єднані послідовно, величина енергії модульованої частини імпульсу струму визначається передусім ємністю  $C_{II}$  (рис. 2).

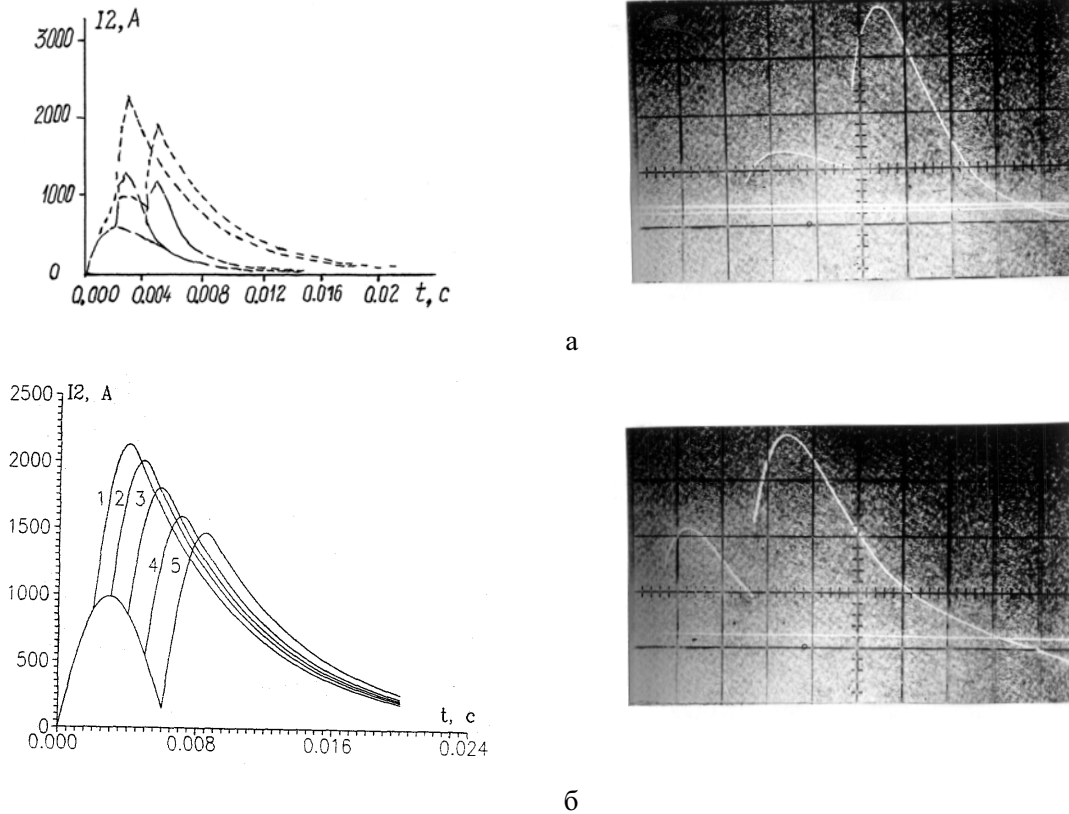


Рис. 2. Вплив установчих параметрів розрядного контуру на розподіл вторинного струму  $I_2$  зварювального трансформатора при (а,б) ----- незмінній величині опору навантаження (зона зварювання)  $R_{\text{конт.}} = \text{const.}$  та умовно лінійній його зміні

Після відроблення часу імпульсу затримки ( $t_k$ ) включається тиристор  $VS1$ , що призводить до появи напруги зміщення на некерованому вентилі  $VD1$ , останній закривається. Подальша комутація розрядного струму продовжується через ланцюг  $C_p$ - $VS1$ - $W_{12}$ - $VS2$ . Тепер ємності включені паралельно,  $C_{II}$  підтримує в точці з'єднання сталий рівень напруги, чим сприяє відробці схемою програмованого (значеннями  $C_{II}$ ,  $t_k$ ) квазіджерела напруги. При досягненні умови  $U_p < U_{II}$  вмикається прямозміщений ventиль  $VD2$ , протікає процес штучної комутації тиристора  $VS2$ , чим жорстко регламентується час дії розрядного імпульсу.

Послідовне з'єднання  $C_{II}$  з трансформатором дає змогу змінювати зовнішню характеристику джерела (рис. 3), підтримуючи її на квазісталому рівні за весь час дії розрядного струму.

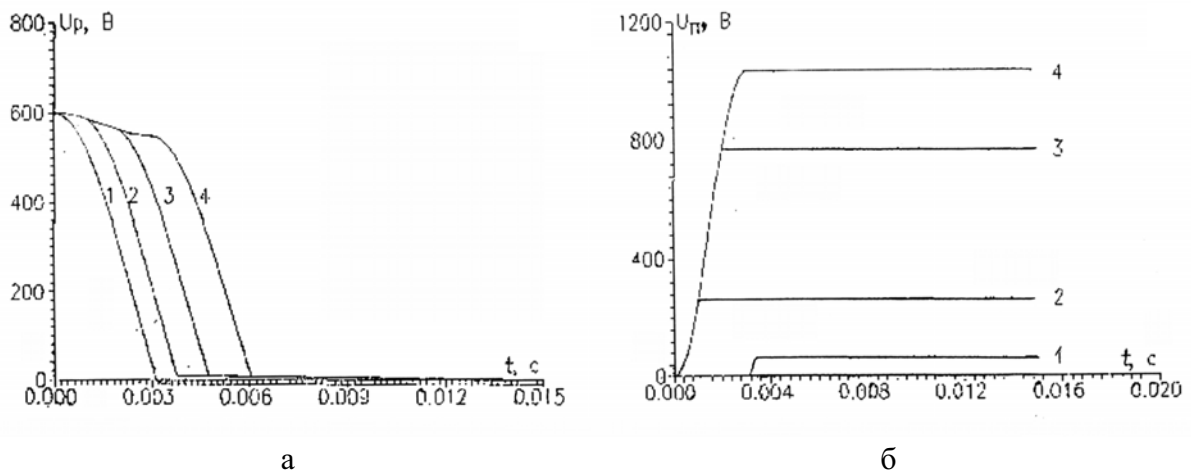


Рис. 3. Зовнішні характеристики навантаженого конденсаторного джерела при різних термінах затримки комутації прохідної ємності:  
 а – зміна напруги робочої ємності; б – відповідно прохідної ємності

## ВИСНОВКИ

1. Запропоновано математичне забезпечення (модель) для розрахунку розгалужених розрядних ланцюгів конденсаторних накопичувачів енергії трансформаторних контактних зварювальних машин, що ґрунтується на чотирьох базових рівняннях логічних змінних стану вентильних елементів та їх доповнень у вигляді алгебро-диференціальних рівнянь зміни електромагнітних параметрів контуру.

2. Математичне моделювання та практична реалізація розробленого контуру підтверджують роботу обладнання в режимі квазіджерела напруги з регульованою зовнішньою характеристикою та ефективним проявом саморегулювання за струмом. Сталість часу розряду в процесі саморегулювання забезпечується комутацією залишкової енергії робочої ємності через розрядний тиристор за ланцюгом, який шунтує первинну обмотку зварювального трансформатора.

1. Арский В.Н. Контактная точечная сварка деталей в электронной промышленности // *Электроника*. – 1973. – № 7 (95). – С. 73. 2. Пентегов И.В. Электромагнитные процессы при разряде батареи конденсаторов на сварочный трансформатор в конденсаторных сварочных машинах // *Сварка специальных металлов и сплавов*. – К., 1963. 3. Комарчев А.И. Особенности инженерного расчета разрядной цепи конденсаторных машин для контактной сварки // *Электропромышленность. Сер. Электросварка*. – 1971. № 8. – С. 16–19. 4. Декларацийний пат. №30514А. Пристрій для точкового конденсаторного зварювання переважно тугоплавких металів / В.І. Білобородченко, В.В. Самотий. ПВ. 6-П.2000. 5. Декларацийний пат. 37553А. Пристрій для точкового конденсаторного зварювання переважно тугоплавких металів металів / В.І. Білобородченко, В.В. Самотий. ПВ. 4.2001. 6. Плахтина Е.Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем. – Львов, 1986. 7. Самотий В.В., Лабяк А.С. Ускоренный поиск периодических режимов мостового выпрямителя методом Ньютона // *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. – 1994. – № 9. – С. 74–77. 8. Самотий В.В. Аналіз усталених режимів однофазного тиристорного помножувача частоти // *Техническая электродинамика*. – 1995. – № 3. – С. 22–24. 9. Крайчик Ю.С., Мазуров М.И. Представление вентиль при моделировании на ЦВМ мощных преобразователей // *Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника*. – 1976. – № 7. – С. 10–12.