

# КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ, ІНФОРМАЦІЙНІ І ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

УДК 681.791.76

**В.І. Білобородченко**  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра зварювального виробництва, діагностики і відновлення металоконструкцій

## КЕРОВАНІСТЬ ТА СТІЙКІСТЬ КОНДЕНСАТОРНИХ МАШИН

© Білобородченко В.І., 2008

**Розглянуто питання забезпечення надійності роботи механізму подавання зварювального дроту на зварювальних машинах в середовищі захисних газів, завдяки застосуванню систем керування.**

**The questions of providing of reliability of work of mechanism of serve of welding wire are considered for options of the mechanized welding in the environment of protective gases. The charts of work of block of management are Resulted and sewn up engine from the overload.**

**Постановка проблеми.** Істотним недоліком конденсаторних машин є обмежена можливість керування струмом розряду під час зварювання; дискретне задавання електричних установочних параметрів режиму, обмежене регулювання зовнішньою характеристикою, втрата керованості установочними параметрами за технологічно обмежених струмів. Проте маса серійного обладнання малої потужності призначена для роботи на струмах, більших 5кА і зусиллях стискання від 3–5 КН. Це обмежує їхні технологічні можливості: вимушені м'які режими зварювання (критерій жорсткості  $F_0 > 0,5$ ), відтворювання заданого рівня якості зварних з'єднань характерне для товщин не менше 300 мкм [1].

Так якісне зварювання виводів (товщина нікелю 100 мкм) з анодною сіткою (завтовшки 50мкм) на конденсаторних машинах загального призначення з регулюванням переднього фронту імпульсу струму (ТКМ15, ТКМ17) обмежується достатньо вузькою областю поля установочних параметрів режиму, тобто заданому значенню відповідає єдиний режим зварювання з конкретними значеннями складових, незмінних за відтворенням. Об'єктивна вимога жорсткішого часу імпульсу ( $t_n \leq 1,5$  мс) і практичних зусиль стискання  $P_e=1+0,5$  ДаН, різко зміщує якість процесу в зону формування виплеску, або в разі надмірності ефекту саморегулювання в область малого провару. Останнє пояснюється підвищеними швидкостями тепловідведення ( $V_n=170-860 \cdot 10^3$  °С/мм) за мінімального фазового зсуву між полем густини струму імпульсу і полем теплових генераторів у зоні зварювання. Одночасно звужується діапазон регулювання установочними параметрами режиму, які, з рештою рівних умов, визначають часовий розподіл струму імпульсу ( $di/dt$ ).

**Метою роботи** є визначення принципів керованості та стійкості конденсаторних машин для зварювання товщин, менших за 100 мкм.

Мікроконтактне зварювання опором є типовим Т<sup>0</sup>Р(t)-А;-процесом, термодформаційний цикл якого забезпечується електромеханічною системою машин. З рештою інших рівних умов система повинна своїми параметрами гарантувати стійкість процесу, компенсувати збурення, які дестабілізують вимогу еквівалентності тепла формування зварної точки і складових тепла, що виділяється в зоні зварювання ( $Q_{ск}=Q_{зс}$ ).

Здійснення цієї вимоги можна оцінити аналізом простору змінних стану системи:  $V_1, \dots, V_m$  – вхідні змінні, що характеризують зовнішній вплив на входи системи (технологічні параметри режиму),  $X_1, \dots, X_n$  – змінні складові (внутрішні, проміжні), сукупність яких повністю характеризує властивості системи (показники електричних і механічних процесів у контурі машини),  $Y_1, \dots, Y_2$  – вихідні параметри, що описують реакцію системи на зовнішній вплив ( зміни у зоні зварювання).

Загальне рівняння стану неперервної детермінованої лінійно-нестационарної системи становить [2]

$$\frac{dx(t)}{dt} = A(t)x(t) + B(t)V(T), \quad (1)$$

де  $A$  –  $n$ -го порядку матриця систем,  $B$  – розміру  $n \cdot m$  матриця управління.

В загальних змінних режиму (1) можна зобразити у вигляді

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} R_1 + L_1 \frac{d^2 i_1}{dt^2} + \left[ u_c(0) - \frac{1}{c_p} \int_0^t i_1 dt \right] - \frac{du_c}{dt} = 0 \\ \frac{di_2}{dt} R_2 + L_2 \frac{d^2 i_2}{dt^2} + \left[ u_c(0) - \frac{1}{c_p} \int_0^t i_2 dt \right] = 0 \\ \frac{d\Delta}{dt} \frac{ip(T^0)}{ip(T^0)} = 0, \quad \frac{\partial T^0}{\partial t} a \nabla^2 T + \frac{0,24 j^8}{c \gamma} \end{cases} \quad (2)$$

де  $i_1, i_2$  – миттєві значення струмів у контурах машини;  $U_c(0)$  – початкове і миттєве значення напруги робочої ємності  $C_p$ ,  $R_i, L_i$  – активні опори і індуктивності складових контурів,  $\Delta p^{(T)}$  – змінні в статично невизначеній системі механізму стискання машини і її силового контуру.

Система (1) є керованою лише у тому разі, якщо всі змінні стану  $X$  не містять вільних (некерованих) компонентів, тобто в матриці управління  $B$  відсутній нульовий рядок. На сучасних конденсаторних машинах ці умови не виконуються, оскільки ряд параметрів електромеханічних контурів: перехідні опори, стан поверхні, її геометрія в контактах, люфти переміщень тощо можуть підтримуватись тільки на певному, повністю не відтворюваному рівні, але не керуються у циклі зварювання. Крім цього додаткові обмеження накладаються дійсною нелінійністю системи, що обумовлене нелінійними залежностями між параметрами на її вході і виході

$$I_r, I_a \approx \frac{1}{a^{1/2}}; I_a = k_{tp} \cdot U_c \cdot \sqrt{c_p}; t_u = \frac{k \delta^2}{a} + k \delta; t_u = \frac{\sqrt{c_p}}{KT}; t_c \approx \delta^2, \quad (3)$$

де  $I_i$  – амплітудне значення струму підігрівання і зварювання,  $t_u, t_c$  – загальний час імпульсу і досягнення амплітудного значення струму,  $k=1-7$  – коефіцієнт пропорційності,  $a, \delta$  – товщина і температуропровідність зварювальних матеріалів,  $K_{tr}$  – коефіцієнт трансформації,  $U_c, C_p$  – відповідно напруга заряду і величина робочої ємності нагромаджувачів.

Іншим важливим показником системи є її стійкість (в загальному вигляді)

$$|x_i(0)| < \delta, \text{ то } |y_i(t)| < \varepsilon, (i = 1, \dots, n; t \geq 0), \quad (4)$$

Тобто за будь-яких початкових значень  $X_i(0)$ , менших за модулем числа  $\delta$  (точність задавання установчих параметрів режиму), змінні стану  $X_i(t)$  у весь час дії імпульсу ( $t \geq 0$ ) по модулю залишаються меншими від числа  $\varepsilon$  (точність відтворення плинних параметрів процесу – форма та часовий розподіл струму, зміна зусилля стискання, варіація опорів зони зварювання – узагальнено-термодеформаційний цикл зварювання).

Для оцінювання стійкості можна використовувати алгебраїчний критерій Рауса-Гурвіца, що вимагає невід'ємності визначників  $D_1, \dots, D_n$ , елементами яких є координати характеристичного многочлена  $\Delta(\lambda)$ .

Перевірка стійкості процесу зварювання на універсальних конденсаторних машинах типу ТКМ-15,-17 за поліномами, що описують динаміку зміни миттєвих значень зварювального струму, демонструє

$$\Delta(\lambda)_1 = \frac{di}{dt} = 0,8 - 0,1438\lambda_1 - 0,0581\lambda_1^2 + 0,006\lambda_1^3, \text{ (композиція сталь+нікель)} \quad (5)$$

$$\Delta(\lambda)_2 = \frac{di}{dt} = 0,8 - 0,1438\lambda_2^3 - 0,0581\lambda_2^2 + 0,006\lambda_2 - 0,684, \text{ (композиція мідь+нікель)}$$

У першому випадку  $D_2 = 3,55 \cdot 10^{-3}$ ;  $D_1 = 0,05814$ ; для другого поліному відповідно  $D_2 = -16,935$ ;  $D_1 = -3,702$ . Отже, під час переходу на малі перерізи деталей конденсаторні машини загального призначення принципово забезпечують або лише обмежену стійкість процесу ( $D_2 > 0$ ), або практично не гарантують відтворення результатів зварювання ( $D_1, D_2 < 0$ ). Останнє характерне під час зварювання технологічно малими струмами. Отримані результати узгоджуються з загальними даними за рівнем дефектності зварних з'єднань, виконаних мікроточковим зварюванням; 50 % загальної кількості факторів, що зумовлюють брак, пов'язані з надійністю і незмінністю робочих характеристик обладнання (змінні стану системи): коливання за амплітудою і часом миттєвих значень струму ( $I(t)$ ) і зусилля стискання ( $Pe(t)$ ), загалом часу зварювального циклу ( $t_n$ ), проявом інерційності механічного приводу  $Pe$ , зміною опору контуру ( $R_2(t)$ ), перенесення на деталі матеріалу робочих частин електродів тощо. Частотність прояву впливу змінних стану системи за дефектами зварювання становить 1, а за вхідними змінними – опір контуру  $R_2$ , інерційність приводу переміщення електродів не нижче 0,5 [3].

Підтримання стійкості або зміни за заданим законом змінних забезпечує адекватність електромеханічних процесів у контурі конденсаторних машин термодеоформаційним явищам у зоні зварювання деталей різного перерізу. Мірою адекватності можуть слугувати П-критерії подібності і їх похідні [4]. Зі зменшенням масогабаритів деталей і зростанням впливу топології контактних зон, які не мають критеріального опису, а також жорсткістю режимів зварювання, втрачається навіть приблизна схожість стану і опору холодного контакту  $R_0$ , опору  $Z$ , короткого замикання машин, маси  $m$  рухомих частин машин, деформації деталей від прикладеного зусилля стискання  $Pe$ .

У зв'язку з цим складові конструктивні елементи конденсаторних машин: силовий електричний блок ( $I_{св}$ ), механічний блок ( $Pe$ ) і блок керування мають забезпечувати формування імпульсу струму за оптимальною (близькою) до нього формою температурної кривої і відповідати умові  $I_{св}/Pe \rightarrow \text{const}$ . та завбачати компенсацію збурень або ж блоком  $Pe$ , або блоком  $I_{св}$ .

Дійсний розподіл зусилля стискання в технологічному циклі зварювання становить

$$Pe(t) = [Pe_0 + Pg(t)] \pm \left[ Fmp + \frac{Q}{g} \cdot a \right] - Fe \cdot g, \quad (6)$$

де  $Pe_0$  – установче зусилля стискання (точність задавання регламентована пружинними механізмами машин на рівні  $\pm 5^{+30\%}$ );  $\int_0^t Pg(t)dt \approx 2m\Delta V / t$  – динамічна складова початкового (установчого) зусилля стискання,  $m$  – приведена маса рухомих частин,  $\Delta V = V_1 - V_2$  – кінцева і початкова швидкості переміщення ланцюгів механізму;  $F_{\text{тр}}$  – тертя кінематичних пар,  $Q/g \cdot a = m \cdot a$  – інерція пар,  $Fe \cdot g$  – електродинамічний ефект струму контуру.

Оцінка впливу складових (6) серійних спеціалізованих монтажно-зварювальних столів і конденсаторних машин широкого застосування наведені у таблиці.

Для машин зі зменшеними і розведеними рухомими масами механізмів стискання (серія ТКМ) рівень впливу виникаючих дефектів на порядок нижчий. Однак за приведеної маси механізмів стискання серійних машин і зварювально-монтажних столів нових розробок  $m = 20$  г·с/м і швидкостей переміщення кожного приводу  $\Delta V = 0,01 - 0,03$  м/с рівень збурення  $Pe_0$  становить 20–60 %. Отже, залежно від маси і швидкості опускання верхнього електрода дійсне  $Pg(t)$  в експерименті перевищує статичне початкове на 60–170 %.  $Pg(t)$  регламентується на рівні 5 %  $Pe_0$ , але за цих масових показників і темпах зварювання (30–60 зв/хв), початкове зусилля стискання

$P_{e0}=1^{+0,5}$  Дан, що дасть рівень збурення від  $P_g(t)$  20–200 %. Отже, з зростанням темпів роботи зростає площа початкового контакту – формуються дефекти типу непровар, а у разі зниження темпу зменшується площа контакту – формується виплеск.

#### Складові зусилля стискання $P_e$ (анодна сітка + електродний вивід)

Тип машини	Плинні параметри			Установочні параметри				
	$P_g(t)/P_0(t)$	$(F_{mp} \cdot t/a/g \cdot a)(t)/P_0(t)$	$F_{eg} \cdot \text{Дан} \cdot 10^{-3}$	$P_{e0}, \text{Дан}$	$mnp, \text{г} \cdot \text{с}^2/\text{м}$	$\Delta V, \text{м/с}$	$t \cdot 10^{-3}, \text{с}$	$I_{св}, \text{КА}$
ССП-5	$(0,15-0,45) \cdot 10^1$	0,43	4,5	1,0	150	0,01–0,03	2–2,5	1,5
ТКМ-15(17)	$(0,014-0,041) \cdot 10^1$	0,027	$\approx 1(0,97)$	1,0	13,6	0,01–0,02	2–2,5	1,5

Можливі шляхи зниження впливу  $P_g(t)$  – зменшення маси рухомих частин, кінцевої швидкості переміщення електродів, стабілізація його на певному рівні мають часткове вирішення. Оптимальнішим є використання часу допоміжних операцій силового електричного блока (зарядка ємностей) на релаксацію динамічної складової за рахунок механічної жорсткості контуру. Підвищення динамічності приводу, з метою обмеження об'єму розплавленого металу під час зварювання (зменшення впливу збурюючих параметрів – інерційність та тертя у кінематичних парах приводу) має єдине часткове рішення – зниження рухомих мас. Останнє обмежується фізико-механічними властивостями застосованих конструкційних матеріалів. Використання прогину нижньої консолі силового механічного контуру конденсаторних машин, з метою додаткового прискорення для попередження кінцевого виплеску, призводить до появи тангенціальної складової зусилля стискання і зміщення площадок контактування деталей і перерозподілу густини струму в них. Друге часткове рішення для конденсаторних машин з постійними динамічними властивостями механізму стискання засновується на ефективності зміни інтенсивності нагрівання струмом за певним законом. Проте із зменшенням часу зварювання зусилля стискання  $P_e$  зростає за квадратичною залежністю, що може призвести до протікання імпульсного струму недостатнього для формування зварної точки заданого розміру. Рішення з запобігання впливу параметра  $F_{eg}$  за рахунок зміни геометрії електричного контуру призводить до зниження потужності машини через зростання індуктивної складової. Повна компенсація усіх виникаючих складових  $P_e$  принципово неможлива, керованість і стійкість механічної частини системи конденсаторних машин обмежені.

Зі зменшенням зварних перерізів деталей форма і діаметр імпульсу струму набуває вирішального значення для нормального режиму мікрозварювання, оскільки поля струму і температури у першому наближенні мають геометрично подібну форму.

За оптимального розкиду значень опору зварювального контуру  $R_k=(0,95-1,05) R_{k_{ном}}$  джерела живлення конденсаторних машин, під час стабілізації інших умов, забезпечують граничний рівень збурень параметрів стану: струми підігрівання і зварювання відповідно  $\pm 5-10$  і  $2-5$  %, час дії імпульсу підігрівання зварювання  $\pm 10, \pm 5$  %.

Показники імпульсу струму встановлюються вхідними параметрами системи. Оскільки більшість з них мають дискретну форму задавання, то збурення, що вносяться у систему, за інших рівних умов, компенсуються точним підтримуваним напруги заряду на рівні  $0,5-1,5$  %.

Під час зварювання різновтовщинних або різнорідних деталей осаджування металу під електродами відбувається стадійно – нагрівання з'єднання без помітної деформації, а далі значна деформація зі зменшенням густини струму. Це визначає обмежене введення енергії імпульсу в початковий момент з подальшим прискоренням, для релаксації напружень зм'яття в контакт і запобігання виплеску. Такий розподіл досягається застосуванням схем підігрівання (модуляція переднього фронту імпульсу струму), які також розв'язують задачу дискримінації розкиду контактних опорів. За малих товщин деталей цей параметр стану системи, стає домінуючим в формуванні якості зварного з'єднання.

Отже, електрична частина системи конденсаторних машин в силу своїх конструктивно-технологічних можливостей має значно вищу стійкість і керованість [1]. Питання стабілізації рівня

якості зварних з'єднань повинні вирішуватись, з рештою інших рівних умов, регулюванням електричних параметрів режиму [5, 6].

Підвищена стійкість системи конденсаторної машини (за відтворюваністю якості мікрозварних з'єднань) можлива через реалізацією напрямів: -активне втручання в процес формування, пасивне відслідковування і стабілізація процесу в заданих границях.

Активне управління задає додаткове рівняння стану системи (1) вихідній функції  $y(t)=\varphi[x(t); v(t)]$ , що дозволяє використовувати вихідне переміщення в якості зворотних зв'язків. Основні труднощі під час їх формування: а) визначальне значення, з рештою рівних умов, контактних та лінійних генераторів тепла під час роботи струму на змінних опорах зони електрод-електрод; б) геометрія контакту під час варіації взаємного розташування деталей і електродів; в) малий час зварювального імпульсу. Крім того, враховуючи подібність геометрії форми струму і температурного поля, необхідне створення нових джерел зі складно програмованими формами імпульсу. Стандартні джерела конденсаторних машин з обмеженістю, а іноді і неможливістю впливу на фронт струму під час зварювання цими способами не володіють.

Відслідковування і стабілізація процесу можливі як за механічними, так і за електричними параметрами стану системи конденсаторної машини. Так, під час мікрозварювання сітчастого аноду з виводом (геометрія одиничного контакту деталей- циліндр+площина), з метою підвищення швидкості тепловиділення на стадії осаджування без розплавлення технологічно вигідно мале зусилля стискання  $P_e$ , зростаюче за лінійним законом в кінцевій стадії для підвищення тепло-віддачі, обмеження відкритої зони плавлення, і запобігання виплеску. Заміна стандартного пружинного приводу електродинамічним дає змогу розв'язати цю задачу. Розроблений привід з використанням ефекту розштовхування котушок має високі кінематичні показники – швидкість стискання до 115 м/с (без врахування кінематичних мас і тертя); . Габаритні характеристики: розміри котушки 100×15×10мм; Хід штока приводу  $10^{+1}$  мм, струм намагнічування 10А, число витків 450. З метою усунення впливу коливання напруги мережі привід має власне джерело. Можливе живлення і від джерела машини (узгодження зусилля  $I/P_e \approx \text{const}$ ).

Відстеження і стабілізацію процесу мікрозварювання можна здійснювати електричними параметрами стану: а) жорстке програмування форми струму (за неодмінної умови стійкості інших технологічних параметрів); б) використання ефекту саморегулювання струму; в) регулювання електричними характеристиками конденсаторних машин і зони зварювання [5, 6].

Жорстке програмування форми струму достатньо просто реалізується послідовним ввімкненням зі зварювальним трансформатором дроселя з насиченням. Оптимальнішою за глибиною регулювання є схема з формуванням підігрівного імпульсу.

У разі зменшення перерізів зварюваних деталей і певної їх геометричної форми (циліндр-діаметр, циліндр-площина) коли контактний опір становить 1–10 мОм практично на всіх серійних конденсаторних машинах з опором контуру 150–700 мкОм проявляється ефект саморегулювання. Основна умова стійкості – постійність тепловиділення у разі коливань опору зони зварювання за умови

$$R'_{zc} \geq 0,8Z_k; \quad R'_{zc} = (1 \dots 1,4) Z_k; \quad (7)$$

де  $R'_{zc}$  – середнє дійсне значення сумарного опору в зоні зварювання в період імпульсу,  $Z_k$  – опір контуру машини.

Максимальна потужність конденсаторних машин оптимізується при ;  $R'_{zc} = Z_k$ , однак через вищевикладене під час мікрозварювання умова  $R'_{zc}/Z_k \neq 1$ , сталість процесу, з рештою рівних умов, має забезпечуватись таким співвідношенням  $R'_{zc}/Z_k$ , щоб за заданого струму і часу імпульсу практично залишалась незмінною рівність  $Q_{ck} = Q_{zc}$ . Вказана вимога виконується при  $Z_k/R'_{zc} < 0,2$ . У разі збільшення опору зона утворення виплеску зсувається в область вищих значень  $P_e$ , а відповідно стабільність процесу погіршується. Величина струму в контурі становить [7]

$$I_2 = E_2 / (1 + \frac{Z_k}{R'_{zc}}), \quad (8)$$

де  $E_2$  – напруга на виході трансформатора.

З (8) очевидно, що при  $Z_k \rightarrow 0$ ,  $I_2 \approx f(E_2)$ , тобто виконується умова програматора напруги. Теплова потужність, що виділяється в зоні зварювання, становить  $P \approx E_2^2$ .

У такому разі висновки, що за мінімальних часів імпульсу прояв саморегулювання зумовлює значні коливання енергії в зоні зварювання і дестабілізації якості через коливання часу розряду, підвищені швидкості теплообміну і теплову інерцію по відношенню до поля струму, значною мірою нівелюються, оскільки джерело конденсаторних машин по відношенню до зони зварювання є стабілізованим джерелом напруги. Конструктивне виконання електричної силової схеми розряду спеціалізованих конденсаторних машин, що дозволяє реалізувати принцип програматора напруги, розглянуті у [8, 9].

**Висновки.** 1. Серійні універсальні контактні машини є неповно керованими системами через невідтворюваність параметрів стану: геометрія спряження деталей під зварювання, форма імпульсу струму, стан контактних поверхонь, додаткові ступені вільності і нерегламентовані зусилля в механізмах переміщень, зношення електродів, нелінійні залежності між вхідними (установочними) параметрами і параметрами стану (технологічними параметрами режиму); 2. Зі зменшеннями перерізів зварюваних деталей і необхідного часу імпульсу контактні машини загального призначення не забезпечують виконання критерію стійкості ( $D_i > 0$ ) через дискретності і великі кроки задавання установочних параметрів машин; 3. Існуюче конструктивне виконання електричних схем розряду дозволяє, певною мірою, прояв ефекту саморегулювання під час роботи установки в режимі джерела струму. Для малих товщин саморегулювання процесу не є оптимальним через обмеження величини струму імпульсу та зростання часу його протікання; 4. Стійкість процесу зварювання принципово забезпечується лише на конденсаторних джерелах, у яких реалізується принцип програматора напруги- теплова потужність, що виділяється в зоні зварювання, становить  $P \approx E_2^2$ .

1. *Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки / В.Э. Моравский, Д.С. Ворона. – К.: Наук. думка, 1985. – 272 с.* 2. *Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. – К.: Техніка, 1975. – 758 с.* 3. *Білобородченко В.І. Критерій оцінювання дефектності при точковому конденсаторному мікрозварюванні // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2003. – № 483. – С. 12–15.* 4. *Білобородченко В.І. Критерії подібності для оцінювання початкового контактного опору при точковому конденсаторному мікрозварюванні // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2003. – № 483. – С. 6–12.* 5. *Ланкин Ю.Н. Автоматическое регулирование режима точечной сварки по электрическим параметрам // Автомат. сварка. – 1963. – № 5. – С. 21–26.* 6. *Вопросы повышения качества микросварных соединений в радио-электронике / Под ред. В.Э. Моравского. – К.: Знание, 1974. – 40 с.* 7. *Арский В.Н. Контактная точечная сварка деталей в электронной промышленности. – М.: ЦНИИ “Электроника”, 1973. – № 7(95). – 73 с.* 8. *Білобородченко В.І., Самотий В.В. Математичне забезпечення (модель) розрахунку розгалуженого розрядного контуру конденсаторних зварювальних контактних машин з модуляцією струму // X Українсько-польської конф. САПР в машинобудуванні: проблеми навчання та впровадження. – Львів, 28–29.05.02.* 9. *Білобородченко В.І. Спеціалізовані машини (КМ) для конденсаторного точкового мікрозварювання // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2007. – № 588. – С. 3–7.*