

2. Simulations of Rotating Brushless AC Excitation System with Controlled Thyristor Bridge Rectifier for Hydropower Generators Available at : [www.diva-portal.org/smash/get/diva2:476290/fulltext02](http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:476290/fulltext02) (accessed 15 September 2019).
3. Maintenance Free Exciter Available at : [www.voith.com/corp-en/VH\\_Product\\_Brochure\\_Automation\\_Maintenance-free-exciter\\_15\\_vvk\\_t3404e\\_en.pdf](http://www.voith.com/corp-en/VH_Product_Brochure_Automation_Maintenance-free-exciter_15_vvk_t3404e_en.pdf) (accessed 5 August 2019).
4. DGC Brushless Excitation – Emerson Process Management Available at : [www.yumpu.com/en/document/view/11400516/dgc-brushless-excitation-emerson-process-management](http://www.yumpu.com/en/document/view/11400516/dgc-brushless-excitation-emerson-process-management) (accessed 5 August 2019).
5. Brushless Excitation System Series Diode Redundancy for 2-pole Generators 265-700 kW at 3,000-3,600 rpm Available at : [www.electrimachinery.com/files/Brushless\\_Exciters/Series\\_Diode\\_Redundancy.pdf](http://www.electrimachinery.com/files/Brushless_Exciters/Series_Diode_Redundancy.pdf) (accessed 30 June 2019).
6. Thyristor Excitation System, Voith Available at : [www.voith.com/br/t3387\\_e\\_Thyristor\\_screen.pdf](http://www.voith.com/br/t3387_e_Thyristor_screen.pdf) (accessed 25 September 2019).

Рецензент: С.В. Гулаков  
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 19.10.2019

УДК 621.791.03, 621.314.2, 621.316.727

doi: 10.31498/2225-6733.39.2019.201068

© Поднебенна С.К.\*

## МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ МАШИНИ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ

У статті досліджена робота електротехнічного комплексу машини контактного зварювання з тиристорним регулюванням струму. Модель процесу контактного зварювання представлена у вигляді об'єкту керування з відомими вхідними параметрами, вихідними параметрами та зовнішніми збуреннями. Проаналізовано вплив збурюючих факторів на процес зварювання та підтверджено, що для забезпечення якісного зварного з'єднання необхідно стабілізувати енергію, що виділяється у зварювальному контакті. Розроблено модель, яка імітує зміну опору зварювального кола впродовж зварювального циклу. Розроблено модель підсистеми стабілізації енергії, що обчислює енергію, яка виділяється в зварювальному контакті, та при досягненні нею заданого значення відключає машину. Для розрахунку необхідної енергії використано рівняння теплового балансу, що враховує як корисну енергію, що витрачається на створення зварного з'єднання, так і втрати енергії на тепловідвід у електроди, у деталі, що зварюються, та конвективний теплообмін (яким зазвичай нехтують). Отримані результати розрахунку корисної енергії враховують приховану теплоту плавлення. В результаті імітаційного моделювання показано, що забезпечення виділення необхідної кількості енергії призводить до збільшення тривалості зварювання: при врахуванні зміни опору під час зварювання – до 20%, при врахуванні коливань напруги (-15%) – до 30%. При дії обох збурюючих факторів тривалість зварювання може в межі зростати до 60% за умови забезпечення необхідної якості зварювання. Таким чином, показано, що окрім величини зварювального струму можна регулювати тривалість зварювання, забезпечуючи потрібну енергію у зварювальному контакті (з урахуванням обмежень на тривалість струму).

**Ключові слова:** машина контактного зварювання, джерело живлення, енергія, коливання напруги, зміна опору, тривалість зварювання.

\* канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [podsvet@gmail.com](mailto:podsvet@gmail.com)

*Поднебенная С.К. Моделирование системы питания электротехнического комплекса машины контактной сварки. В статье исследована работа электротехнического комплекса машины контактной сварки с тиристорным регулированием тока. Модель процесса контактной сварки представлена в виде объекта управления с известными входными параметрами, выходными параметрами и внешними возмущениями. Проанализировано влияние возмущающих факторов на процесс сварки и подтверждено, что для обеспечения качественного сварного соединения необходимо стабилизировать энергию, выделяющуюся в сварочном контакте. Разработана модель, которая имитирует изменение сопротивления сварочной цепи в течение сварочного цикла. Разработанная модель подсистемы стабилизации энергии вычисляет энергию, которая выделяется в сварочном контакте, и при достижении им заданного значения отключает машину. Для расчета необходимой энергии использовано уравнение теплового баланса, учитывающее как полезную энергию, расходуемую на создание сварного соединения, так и потери энергии на теплоотвод в электроды, в свариваемые детали, и конвективный теплообмен (которым обычно пренебрегают). Полученные результаты расчета полезной энергии учитывают скрытую теплоту плавления. В результате имитационного моделирования показано, что обеспечение выделения необходимого количества энергии приводит при заданном сварочном токе к увеличению продолжительности сварки: при учете изменения сопротивления при сварке – до 20%, при учете колебаний напряжения (-15%) – до 30%. При действии обоих возмущающих факторов продолжительность сварки может в пределе возрасти до 60% при условии обеспечения необходимого качества сварки. Таким образом, показано, что кроме величины сварочного тока можно регулировать продолжительность сварки, обеспечивая нужную энергию в сварочном контакте (с учетом ограничений на продолжительность тока).*

**Ключевые слова:** машина контактной сварки, источник питания, энергия, колебания напряжения, изменение сопротивления, продолжительность сварки.

*S.K. Podnebenna. Modelling the power system of a resistance welding machine electrical complex. The article has investigated the operation of the electrical complex of a resistance welding machine with thyristor current regulation. The model of the resistance welding process is presented as a control object with known input parameters, output parameters and external disturbances. The input parameters are the following: the preset welding current, a mode parameter (hard, soft), the prearranged welding time, the preset compression force, etc. The output parameters related to welding quality are the following: welding current, electrodes voltage, welding energy, resistance of the section «electrode-the part-electrode». The output parameters related to the indicators of ensuring electromagnetic compatibility of the electrotechnical complex with the electrical network are the following: the current consumed from the electrical network, reactive power consumed from the network, PF (power factor), THDI (current's total harmonic distortion), load asymmetry coefficient. The external disturbing factors, the effect of which leads to the deterioration of the quality of welded joints are the following: fluctuations of the supply voltage, change of resistance of the welding circuit caused by the ferromagnetic masses, change of the welding circuit resistance due to its heating and/or wear, wear of the electrodes, change of the state of the welding parts surfaces, welding current bypass. The influence of disturbing factors on the welding process has been analyzed and it has been confirmed that in order to ensure a high-quality welded joint, it is necessary to stabilize the energy released in the welding contact. A model has been developed that simulates a change in the resistance of the welding circuit during the welding cycle. A model of the energy stabilization subsystem has been developed; it calculates the energy that is released in the welding contact and, when it reaches the preset value, the machine is turned off. To calculate the required energy, the heat balance equation was used, that takes into account both the useful energy, spent on the creation of the welded joint and the energy losses due to heat removal to the electrodes, to the welded parts, and convective heat transfer (which is usually neglected).*

*The obtained results of the useful energy calculation take into account the latent heat of fusion. As a result of the simulation, it has been shown that the release of the necessary amount of energy, given welding current, results in an increase in the welding duration: taking into account the changes in resistance during welding, the welding duration grows up to 20%, taking into account the voltage fluctuations (-15%) the welding duration grows up to 30%. Under the influence of both disturbing factors, the welding duration can increase up to 60%, provided that the necessary welding quality is ensured. Thus, it has been shown that besides the magnitude of the welding current, it is possible to adjust the duration of welding, providing the necessary energy in the welding contact (taking into account the restrictions on the duration of current).*

**Keywords:** resistance welding machine, power supply, energy, voltage fluctuations, resistance change, welding duration.

**Постановка проблеми.** Підвищення енергоефективності будь-якого виробництва або технологічного процесу на сьогоднішній день є актуальним. Одним із таких енергоємних технологічних процесів є процес зварювання, який знайшов широке застосування у багатьох галузях промисловості, зокрема, машинобудуванні, автомобілебудуванні, суднобудуванні тощо. Серед різноманіття зварювальних процесів особливе місце посідає процес контактного зварювання. За даними прогнозу ВВС, світовий ринок машин контактного зварювання (МКЗ) може досягти 1,7 мільярда доларів до 2024 року з 1,1 мільйонів доларів у 2019 році при складеному річному темпі зростання (CAGR) на рівні 7,5% [1]. Точкове зварювання було найбільшим і найбільш швидко зростаючим типом контактного зварювання в 2017 році і, ймовірно, до 2023 року ємність цього сегменту ринку досягне 299,4 млн. доларів [1].

Машини контактного зварювання представляють собою складні електротехнологічні установки, котрі складаються із взаємопов'язаного комплексу електротехнічних пристроїв (джерел живлення, зварювальних трансформаторів, вимірювального обладнання тощо), систем керування ними, засобів підвищення енергетичної ефективності та продуктивності та елементів споживання, які представляють собою неактивне, нелінійне навантаження (зварювальне коло, електроди, вироби тощо).

Установки контактного зварювання відносяться до потужних нелінійних споживачів електроенергії, негативно впливають на якість електроенергії, а технологічний процес зварювання в значній мірі залежить від напруги мережі, від якої відбувається живлення, та багатьох інших зовнішніх збудуючих факторів. До множини цих факторів  $Y_i = f(\{a_i\})$ , дія яких призводить до погіршення якості зварних з'єднань при контактному зварюванні, окрім зміни активного опору зварювального кола при зварюванні, відносяться коливання напруги живлення  $\Delta U_m$ , зміна опору зварювального кола, що викликана внесенням феромагнітних мас до нього  $\Delta X_2$ , тощо. Для уникнення їх впливу треба стабілізувати енергію, яка виділяється в зоні зварювання [2, 3], що є актуальною науковою проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Представимо модель електротехнічного комплексу МКЗ у вигляді об'єкту керування з відомими входними параметрами, вихідними параметрами та зовнішніми збуреннями [4, 5]. То ж модель процесу контактного зварювання буде виглядати наступним чином:

$$E = f(X_i, Y_i), \quad (1)$$

де  $E = \{W_i, Q_j\}$  – результат дії системи, вихідні параметри, при цьому  $W_i = \{I_{3\phi}, U_{ee}, Q_{ee}, R_{ee}, F_{3\phi}\}$  – вихідні параметри, що стосуються якості зварювання: зварювальний струм  $I_{3\phi}$ , напруга на електродах  $U_{ee}$ ,  $Q_{ee}$  – енергія зварювання,  $R_{ee}$  – опір ділянки «електрод-деталь-електрод»,  $F_{3\phi}$  – зусилля стиснення;  $Q_j = \{I_{ex}, Q, PF, THD_I, kU_2\}$  – вихідні параметри, що стосуються показників забезпечення електромагнітної сумісності електротехнічного комплексу з електричною мережею: струм, що споживається від електричної мережі  $I_{ex}$ ,  $Q$  – реактивна потужність, що споживається від мережі,  $PF$  – коефіцієнт потужності,  $THD_I$  – коефіцієнт несинусоїдності споживаного струму;  $k_{2U}$  – коефіцієнт несиметрії навантаження;

$X_i = \{I_{3e}^*, U_{ee}^*, k^*, t_{3e}^*, F^*\}$  – змінні і параметри, якими можна управляти: задані зварювальний струм  $I_{3e}^*$ , напруга на електродах  $U_{ee}^*$ , параметр режиму  $k^*$  (жорсткий, м'який),  $t_{3e}^*$  – тривалість зварювання,  $F^*$  – зусилля стиснення;

$Y_i = f(\{a_i\})$ , де  $\{a_i\} = \{\Delta U_M, \Delta X_2, \Delta R_2, \Delta R_{e-e}, \Delta I_{3e}, \Delta F_{3e} \dots\}$ ,  $i \in (1..n)$  – множина зовнішніх збурюючих факторів, дія яких призводить до погіршення якості зварних з'єднань [2, 3], – змінних і параметрів, якими не можна управляти: коливання напруги живлення  $\Delta U_M$ ; зміна опору зварювального кола, викликана внесенням феромагнітних мас до нього,  $\Delta X_2$ ; зміна опору зварювального кола внаслідок його нагрівання, та/або зношування  $\Delta R_2$ ; зношування електродів; зміна стану поверхонь деталей, що зварюються,  $\Delta R_{e-e}$ ; шунтування зварювального струму  $\Delta I_{3e}$ .

Ступінь впливу та вірогідність виникнення факторів, що негативно впливають на процес контактного зварювання, варіюються та можуть по-різному впливати на якість зварювання в залежності від режимів, умов зварювання, ступеню зносу обладнання та ін. [6]. При цьому показник якості зварних з'єднань (міцність, розміри литого ядра) є функцією багатьох змінних  $f(W_i)$ , де  $W_i$  – параметри режиму зварювання та величини, що характеризують збурюючі впливи [6]. Одночасний вплив кількох збурюючих факторів змінює показник якості зварних з'єднань на величину

$$\Delta f \approx \frac{\partial f}{\partial W_1} \Delta W_1 + \frac{\partial f}{\partial W_2} \Delta W_2 + \frac{\partial f}{\partial W_3} \Delta W_3 + \dots + \frac{\partial f}{\partial W_n} \Delta W_n, \quad (2)$$

і таким чином, навіть при малих  $\Delta W_i$  їх одночасний вплив може суттєво погіршити якість зварних з'єднань [2, 3]. Згідно з [3] найбільшого впливу на якість формування ядра при контактному зварюванні завдає зміна енергії  $Q_{ee}$ , а найменшого – зміна величини зварювального зусилля стиснення  $F_{3e}$ .

Як було відзначено, змінні і параметри, якими можна керувати для забезпечення технологічного процесу контактного зварювання, – це задані зварювальний струм  $I_{3e}^*$ , напруга на електродах  $U_{ee}^*$ , параметр режиму  $k^*$  (жорсткий, м'який),  $t_{3e}^*$  – тривалість зварювання,  $F^*$  – зусилля стиснення. При цьому параметр режиму  $k^*$ , по суті, нормує співвідношення між заданим зварювальним струмом  $I_{3e}^*$ , напругою на електродах  $U_{ee}^*$  та тривалістю зварювання  $t_{3e}^*$ . В загальному вигляді енергія, яка виділяється в зоні зварювання, розраховується як:

$$W_{3e} = \int u_k(t) i_2(t) dt, \quad (3)$$

де  $u_k(t)$  – миттєва напруга на зварювальному контакті, В;  $i_2(t)$  – миттєвий зварювальний струм, А. З іншого боку, для визначення енергії, що має виділятися у зварювальному контакті для створення якісного зварного з'єднання, зручно скористатись рівнянням теплового балансу [7, 8]:

$$\begin{aligned} Q_{EE} &= Q_{кор} + Q_M + Q_E + Q_K; \\ Q_{кор} &= V_M \cdot c_M \cdot \gamma_M \cdot T_{пл}; \\ Q_M &= V_K \cdot K_1 \cdot c_M \cdot \gamma_M \cdot 0,25 \cdot T_{пл}; \\ Q_E &= 2V_E \cdot K_2 \cdot c_E \cdot \gamma_E \cdot 0,125 \cdot T_{пл}, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $V_M = 2s \frac{\pi d_e^2}{4}$  – об'єм умовного стовпчика металу деталей, що зварюються, який нагрівається до температури, близької до температури його плавлення, причому  $d_e$  – діаметр електроду,  $2s$  – товщина деталей, що зварюються. В [7] зазначається, що корисна енергія  $Q_{кор}$ , розрахована таким чином, витрачається на нагрів до температури плавлення об'єму металу більшого, ніж об'єм ядра, що дає можливість урахувати приховану теплоту плавлення;

$V_K = 2s \frac{\pi x_2 (d_e + x_2)}{4}$  – об'єм умовного кільця металу деталей, що зварюються, яке оточує вказаний стовпчик і нагрівається до температури близько  $0,25T_{пл}$  при тепловідводі. Враховується, що помітне збільшення температури спостерігається на відстані  $x_2 = 1,2\sqrt{t_{3e}}$  від ядра (для низьковуглецевих сталей) [7];

$$2V_E = 2 \frac{\pi d_e^2}{4} x_3 - \text{сумарний об'єм умовних стовпчиків металу двох однакових електродів,}$$

що нагріваються до температури близько  $0,125T_{пл}$  при тепловідводі, причому  $x_3 = 4\sqrt{a_e t_{зв}}$  – довжина ділянки електродів, що зварюються,  $a_e$  – температуропровідність електродів;

$K_1$  – коефіцієнт урахування нерівномірності нагріву кільця металу деталей, що зварюються за об'ємом,  $K_1 = 0,8$ ;

$K_2$  – коефіцієнт обліку форми контактної поверхні електродів (для циліндричних електродів  $K_2 = 1$ , для конічних  $K_2 = 1,5$ , для сферичних  $K_2 = 2$ );

$c_M, c_E$  – питома теплоємність металу деталей, що зварюються, і електродів, відповідно;

$\gamma_M, \gamma_E$  – щільність металу деталей, що зварюються, і електродів, відповідно;

$Q_K$  – енергія, що витрачається на конвективний теплообмін металу з навколишнім середовищем (зазвичай нехтують, зважаючи на малу величину).

Зварювальний струм (у першому наближенні) розрахуємо з наступного виразу [7]:

$$I_{зв} = \sqrt{\frac{Q_{EE}}{m_r \cdot 2r_{дк} \cdot t_{зв}}}, \quad (5)$$

$$\text{де } 2r_{дк} = \frac{4Ak_p s_1 (\rho_1 + \rho_2)}{\pi d_e^2} - \text{опір деталей в кінці їх нагрівання, причому для деталей товщиною } 0,8-3 \text{ мм } A = (0,8 \dots 1), k_p = 0,85 - \text{для низьковуглецевих сталей, коефіцієнт, що враховує нерівномірність нагріву деталей; питомі опори } \rho_1, \text{ та } \rho_2 \text{ визначають, відповідно, для температур } 1200^\circ\text{C та } 1500^\circ\text{C} - \text{для низьковуглецевих сталей [2, 7, 8].}$$

У [3] розглянуті існуючі способи стабілізації тепловиділення при контактному зварюванні, реалізовані в тиристорних джерелах живлення. В [9] запропоновано спосіб управління перетворювачем, який здійснює контроль енергії, що виділяється в зварювальному контакті. При цьому враховуються реальні параметри трансформатора і зварювального кола. Тож джерело живлення у складі електротехнічного комплексу має виконувати наступне – формувати такі струм та напругу впродовж заданого часу, щоб енергії, яка виділиться в зварювальному контакті, було достатньо для формування якісного зварного з'єднання. Однак при цьому бракує якісних досліджень процесів, що протікають у первинному та вторинному колах зварювального трансформатора.

**Мета статті** – розробити модель та провести моделювання системи живлення електротехнічного комплексу машини контактного зварювання, в якій реалізований запропонований спосіб стабілізації енергії у зварювальному контакті.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо вплив зміни опору у зварювальному контакті на вихідні струм та напругу джерела. Для цього розглянемо більш детально роботу джерела живлення (ДЖ) МКЗ з тиристорним регулюванням (рис. 1, а). На рис. 1, б наведена його схема зміщення [10].

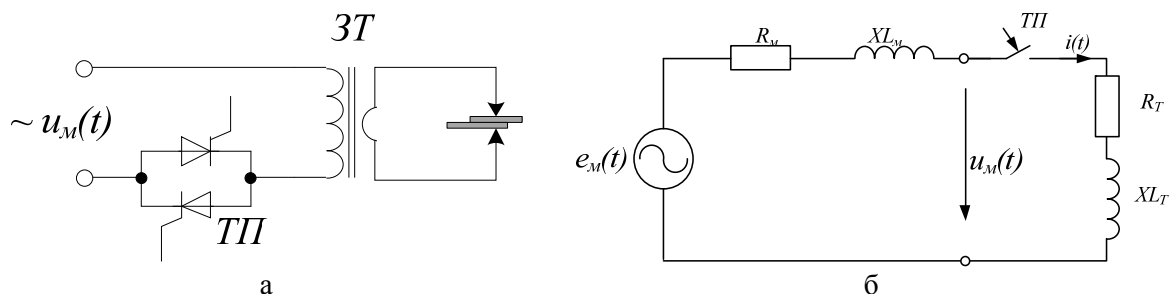


Рис. 1 – Спрощена схема тиристорного ДЖ (а) та його схема зміщення (б)

Якщо ЕРС мережі  $e_m(t)$  синусоїдна і дорівнює

$$e_m(t) = E_m \sin(2\pi ft), \quad (6)$$

де  $E_m$  – амплітуда змінної ЕРС мережі, В;  $f$  – частота мережі, Гц,

то при замиканні ключа ТП (відкриття тиристора) струм в колі (рис. 2) описується наступним виразом:

$$i(t) = \frac{E_m \cdot \left( \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \alpha - \varphi_T) - \sin(\alpha - \varphi_T) \cdot e^{-\frac{R_m + R_T}{L_m + L_T} t} \right)}{\sqrt{(R_m + R_T)^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_m + L_T))^2}}, \quad (7)$$

де  $\alpha$  – кут відкриття тиристорів;  $\varphi_T$  – зсув фази;  $R_m$  – активний опір мережі, Ом;  $L_m$  – індуктивність мережі, Гн;  $R_T$  – активний опір трансформатора, приведений до первинної обмотки, Ом;  $L_T$  – індуктивність трансформатора, приведена до первинної обмотки, Гн,

а напруга на затискачах зварювального ДЖ дорівнює:

$$u_m(t) = e_m(t) - i(t) \cdot R_m - L_m \frac{di(t)}{dt}. \quad (8)$$

Наведений математичний опис дозволяє оцінити поведінку джерела у сталому режимі, не враховуючи зміну опору зварювального контакту у процесі зварювання та дії зовнішніх збурюючих факторів. Для дослідження перехідних процесів та впливу зміни опору зварювального контакту зручно використати пакет імітаційного моделювання.

На рис. 2 наведена імітаційна модель електротехнічного комплексу машини контактного зварювання. Первинна обмотка зварювального трансформатора підключається до двох фаз мережі, що моделюється блоком «GRID». Керування тиристорним джерелом живлення (два зустрічно-паралельно включені тиристири «Thyristor» та «Thyristor1») відбувається зміною кутів відкриття тиристорів, що моделюється у блоках «Pulse Generator» та «Pulse Generator1». Вторинна обмотка зварювального трансформатора, що має лише один виток, навантажена на зварювальне коло, що моделюється послідовно включеними індуктивністю  $L$  та нелінійним опором  $R_{var}$ , який змінюється за експоненційним законом згідно [7].

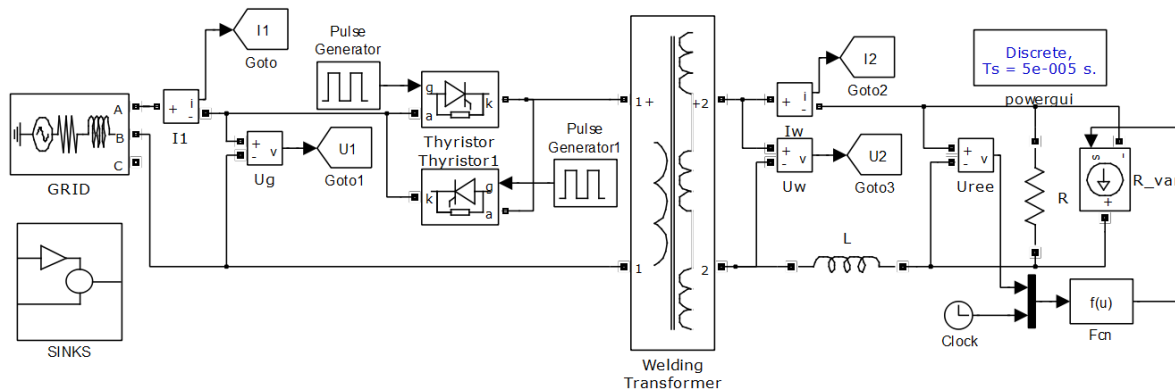


Рис. 2 – Модель досліджуваного електротехнічного комплексу МКЗ з урахуванням нелінійності опору зварювального контакту

На рис. 3 наведений отриманий в результаті моделювання зварювальний струм, де видно його зростання впродовж зварювального процесу до того моменту, коли зміна зварювального опору стає неістотною. Напруга при цьому змінюється неістотно, тож енергія, що виділяється у місці зварювання, є меншою за необхідну для формування якісного з'єднання. Окрім струму та напруги величину енергії, що виділяється в зварювальному контакті, можна коригувати зміною тривалості зварювального процесу.

Для забезпечення стабілізації енергії у зварювальному контакті до імітаційної моделі електротехнічного комплексу МКЗ додано підсистему стабілізації енергії у зварювальному контакті «Control System of Thyristor's Power Supply» (рис. 4).

Отримана імітаційна модель наведена на рис. 5, керування кутами відкриття тиристорів відбувається підсистемою (рис. 5) у блоці «Control System of Thyristor's Power Supply».

В режимі реального часу така система розраховує енергію, що виділяється в зоні зварювання, і при досягненні нею заданого значення відключає машину (процес зварювання закінчу-

ється). Дослідження при коливаннях напруги мережі та одночасній зміні опору зварювального кола показали, що при нормуванні енергії час зварювання треба визначати по факту досягнення енергією заданого значення.

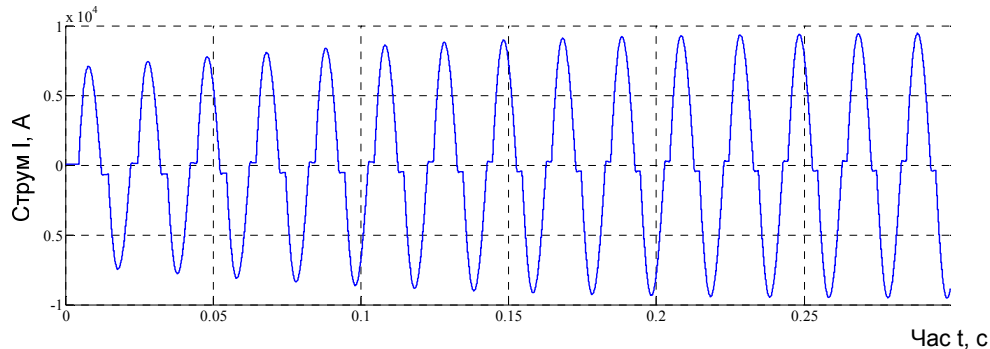


Рис. 3 – Якісна оцінка впливу зміни опору зварювального кола на зварювальний струм

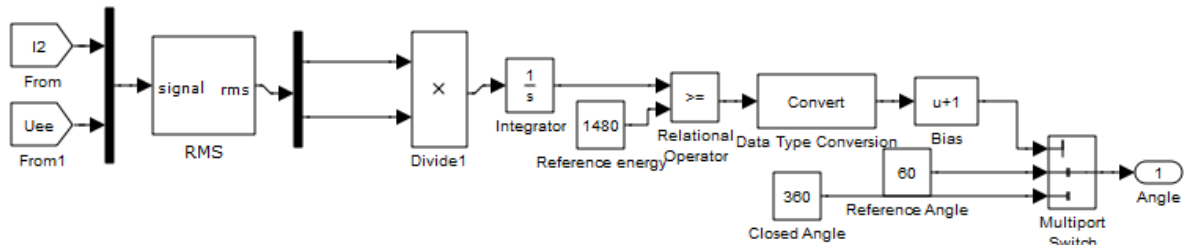


Рис. 4 – Підсистема стабілізації енергії у зварювальному контакті

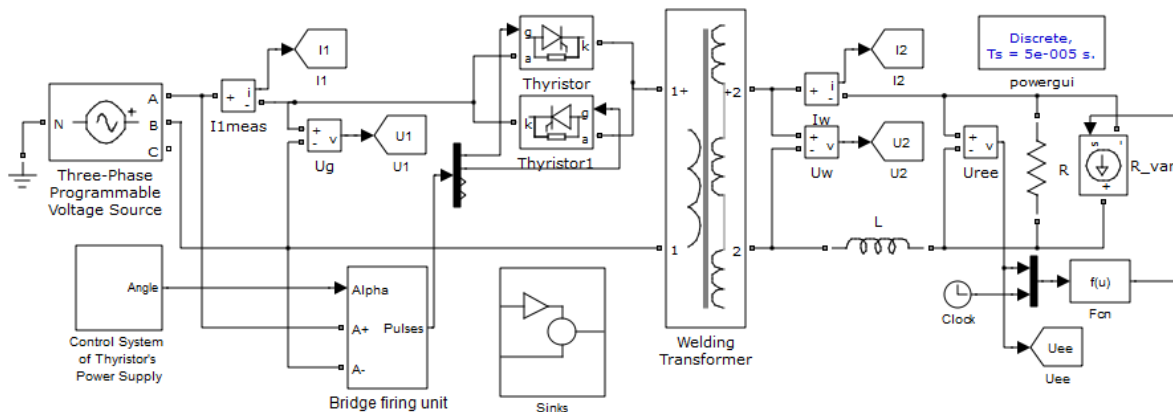


Рис. 5 – Імітаційна модель комплексу МКЗ зі стабілізацією енергії

Рахуючи довжину електродів, що нагріваються до температури близько  $0,125T_{пл}$ , такою, що дорівнює їх діаметру (для спрощення), для зварювання деталей з низьковуглецевої сталі Ст3 мідними електродами діаметром 10 мм для розрахунку потрібного струму та тривалості зварювання можна використати наступні часо-струмові залежності (рис. 6).

Величина енергії, що має виділитися у зварювальному контакті, для зварювання сталі Ст3 0,5+0,5 мм, розрахована згідно з рівнянням теплового балансу [7, 8] та становить 1480 Вт·с. Згідно з рис. 6 заданий струм (середньоквадратичний) складає 7,4 кА, тривалість зварювання – 0,95 с. Експериментальна перевірка у лабораторних умовах показала, що такий режим зварювання дає можливість отримати зварне з'єднання, діаметр ядра якого складає 8 мм, поперечний переріз – близько  $50 \text{ мм}^2$  і розрахункова щільність струму складає близько  $150 \text{ А/мм}^2$ , що добре

узгоджується з [2, 7, 8]. Для цих даних проведено імітаційне моделювання з урахуванням зміни опору зварювального кола та напруги живлення. При врахуванні зміни опору зварювального кола під впливом температури тривалість зварювання становила 1,0 с, середнє значення струму – 7,4 кА (середньоквадратичне, сталий режим). При цьому за наявності ще й коливань напруги (мінус 10% від номінальної) тривалість зварювання становила 1,24 с, середнє значення струму – 7,2 кА (середньоквадратичне, сталий режим). Таким чином, тривалість зварювального процесу при врахуванні тільки зміни опору внаслідок нагрівання у порівнянні з розрахунковим збільшилась на 20%. Урахування коливань напруги (до мінус 15 %) показало збільшення тривалості зварювального процесу до 30%. За наявності обох збуджуючих факторів збільшення тривалості зварювання для забезпечення виділення потрібної енергії в межі може сягати до 50 %.

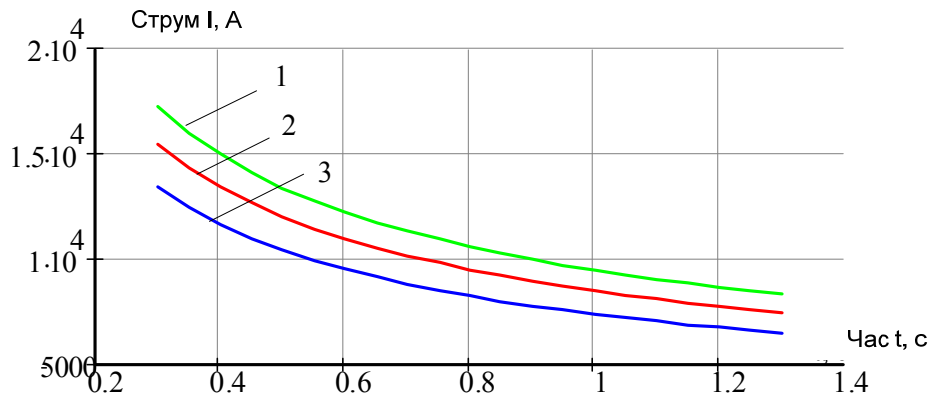


Рис. 6 – Часо-струмові залежності для розрахунку режиму зварювання для зварювання деталей: 1 – 1,5+1,5 мм; 2 – 1,0+1,0 мм; 3 – 0,5+0,5 мм

### Висновки

Розроблена модель, що враховує зміну опору зварювального кола та коливання напруги живлення. На підставі результатів моделювання показано, що неврахування цих параметрів призводить до недовиділення енергії в зварювальному контакті, що призводить до зниження якості зварних з'єднань. Доведено, що для забезпечення якісного контактного зварювання треба нормувати енергію у зварювальному контакті. Показано, що окрім величини зварювального струму можна регулювати тривалість зварювання, забезпечуючи потрібну енергію у зварювальному контакті (з урахуванням обмежень на тривалість струму).

### Подяка

Публікація містить результати досліджень, проведених за грантом Президента України за конкурсним проектом Ф82 «Розробка високоефективних джерел живлення для машин контактного зварювання», № держреєстрації 0119U103276.

### Перелік використаних джерел:

1. Resistance Welding Machine Market 2019 Industry Research, Share, Trend, Global Industry Size, Price, Future Analysis, Regional Outlook to 2024 Research Report [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [www.marketwatch.com/press-release/resistance-welding-machine-market-2019-industry-research-share-trend-global-industry-size-price-future-analysis-regional-outlook-to-2024-research-report-2019-05-20](http://www.marketwatch.com/press-release/resistance-welding-machine-market-2019-industry-research-share-trend-global-industry-size-price-future-analysis-regional-outlook-to-2024-research-report-2019-05-20).
2. Вагин Г.Я. Режимы электросварочных машин / Г.Я. Вагин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 192 с.
3. Климов А.С. Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества / А.С. Климов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 216 с.
4. Моделювання електромеханічних систем : підручник / О.П. Чорний, Д.Й. Родькін, А.В. Луговой, Г.Ю. Сисюк, А.В. Садовой. – Кременчук, 2001. – 374 с.
5. Островерхов М.Я. Системи і методи ідентифікації електротехнічних об'єктів : монографія / М.Я. Островерхов, А.М. Сільвестров, О.М. Скринник ; Нац. авіац. ун-т. – Київ : НАУ, 2016.



– 323 с.

6. Kimchi M. Resistance Spot Welding: Fundamentals and Applications for the Automotive Industry / M. Kimchi, D.H. Phillips // *Synthesis Lectures on Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 1, № 2. – 115 p. – Mode of access: DOI: [10.2200/S00792ED1V01Y201707MEC005](https://doi.org/10.2200/S00792ED1V01Y201707MEC005).
7. Катаев Р.Ф. Теория и технология контактной сварки : учебное пособие / Р.Ф. Катаев, В.С. Милютин, М.Г. Близник. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 144 с.
8. Поляков А.Ю. Снижение энергоемкости процессов контактной рельефной сварки : монография / А.Ю. Поляков. – Могилёв : Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – 209 с.
9. Поднебенная С.К. Автоматизированная система управления источником питания машины контактной сварки / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // *Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ»*. – Маріуполь, 2016. – Вип. 33. – С. 131-141. – (Серія : Технічні науки).
10. Поднебенная С.К. К вопросу повышения коэффициента мощности однофазных источников питания машин контактной сварки / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. – К. : ІЕД НАНУ, 2017. – Вип. 46. – С. 126-133. – Mode of access: DOI: [10.15407/publishing2017.46.126](https://doi.org/10.15407/publishing2017.46.126).

#### References:

1. Resistance Welding Machine Market 2019 Industry Research, Share, Trend, Global Industry Size, Price, Future Analysis, Regional Outlook to 2024 Research Report Available at: [www.marketwatch.com/press-release/resistance-welding-machine-market-2019-industry-research-share-trend-global-industry-size-price-future-analysis-regional-outlook-to-2024-research-report-2019-05-20](http://www.marketwatch.com/press-release/resistance-welding-machine-market-2019-industry-research-share-trend-global-industry-size-price-future-analysis-regional-outlook-to-2024-research-report-2019-05-20) (accessed 15 September 2019).
2. Vagin G.Ia. *Rezhimy elektrosvarochnykh mashin* [Modes of electric welding machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 192 p. (Rus.)
3. Klimov A.S. *Kontaktnaia svarka. Voprosy upravleniia i povysheniia stabil'nosti kachestva* [Contact welding. Management issues and improving quality stability]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2011. 216 p. (Rus.)
4. Chornii O.P., Rod'kin D.I., Lugovoi A.V., Sisiuk G.Iu., Sadovoi A.V. *Modeliuvannia elektromekhanichnikh sistem: pidruchnik* [Modeling of electromechanical printing systems: textbook]. Kremenchuk, 2001. 374 p. (Ukr.)
5. Ostroverkhov M.Ia., Sil'vestrov A.M., Skrinnik O.M. *Sistemi i metodi identifikatsii elektrotekhnichnikh ob'ektiv : monografiia* [Systems and methods for identifying electrical engineering objects : monograph]. Kiïv, NAU Publ., 2016. 323 p. (Ukr.)
6. Kimchi M., Phillips D.H. Resistance Spot Welding: Fundamentals and Applications for the Automotive Industry. *Synthesis Lectures on Mechanical Engineering*, 2017, vol. 1, no. 2. 115 p. doi: [10.2200/S00792ED1V01Y201707MEC005](https://doi.org/10.2200/S00792ED1V01Y201707MEC005).
7. Kataev R.F., Miliutin V.S., Bliznik M.G. *Teoriia i tekhnologiia kontaktnoi svarki: uchebnoe posobie* [Theory and technology of resistance welding: a training manual]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural. un-ta Publ., 2015. 144 p. (Rus.)
8. Poliakov A.Iu. *Snizhenie energoemkosti protsessov kontaktnoi rel'efnoi svarki: monografiia* [Reducing the energy intensity of contact relief welding processes: monograph]. Mogilev, 2019. 209 p.
9. Podnebennaia S.K., Burlaka V.V., Gulakov S.V. Avtomatizirovannaia sistema upravleniia istochnikom pitaniia mashiny kontaktnoi svarki [Automatic Control System of Power Supply for Resistance Welding Machine]. *Visnik Priazov'skogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2016, vol. 33, pp. 131-141. (Rus.)
10. Podnebennaia S.K., Burlaka V.V., Gulakov S.V. K voprosu povysheniia koeffitsienta moshchnosti odnofaznykh istochnikov pitaniia mashin kontaktnoi svarki [On the issue of increasing the power factor of single-phase power sources of resistance welding machines]. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*, 2017, vol. 46, pp. 126-133. doi: [10.15407/publishing2017.46.126](https://doi.org/10.15407/publishing2017.46.126). (Rus.)

Рецензент: С.В. Гулаков

д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 19.10.2019