

УДК 621.791.763.26

*С. М. Фурманов, А. Ю. Поляков, Д. Н. Юманов, А. Н. Кухарев*

## О ФАЗОВОМ РЕГУЛИРОВАНИИ МОЩНОСТИ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЯ В МЕЖЭЛЕКТРОДНУЮ ЗОНУ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

UDC 621.791.763.26

*S. M. Furmanov, A. Y. Polyakov, D. N. Yumanov, A. N. Kukharev*

## ON PHASE CONTROL OF HEAT INPUT IN THE INTERELECTRODE SPACE DURING RESISTANCE WELDING

### Аннотация

Разработан математический аппарат, позволяющий с помощью высокопроизводительных вычислительных средств осуществлять фазовое регулирование действующего значения мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке путем изменения длительности открытого состояния одного из включенных встречно-параллельно тиристоров в течение полупериода сетевого напряжения. Предложена методика расчета коэффициента регулирования мощности тепловложения на сварочном участке «электрод-электрод» в последующем периоде сетевого напряжения на основании расчета действующих значений вторичного тока и напряжения на электродах, активного сопротивления участка «электрод-электрод» и коэффициента мощности  $\cos\varphi$  контактной сварочной машины в течение предыдущего периода.

### Ключевые слова:

контактная точечная и рельефная сварка, фазовое управление действующим значением мощности тепловложения, коэффициент регулирования мощности тепловложения, параметры машины для контактной сварки, коэффициент мощности.

### Abstract

A mathematical tool was developed that allows the use of high-performance computing to perform phase control of the effective value of heat input in the interelectrode space in resistance welding process by means of changing the duration of the conducting state of one of inverse-parallel connected thyristors during one half-cycle of the mains voltage. A procedure is proposed for calculating the heat input control coefficient in the interelectrode space in the subsequent cycle of the mains voltage based on the calculation of effective values of the secondary current and the electrode voltage, the ohmic resistance in the interelectrode space, and the power factor  $\cos\varphi$  of the resistance welding machine during the previous cycle.

### Key words:

resistance spot and projection welding, phase control of effective value of heat input, heat input control coefficient, resistance welding machine parameters, power factor.

В большинстве случаев системы автоматического управления процессом контактной точечной и рельефной сварки являются стабилизирующими, при этом стабилизируемым параметром выступает действующее значение сварочного тока. Однако практический интерес имеют регистрация и измерение мощности, выделяющейся в свариваемом соединении. Для измерения этого

параметра недостаточно только информации о сварочном токе, необходимо знать, каково значение сопротивления участка «электрод-электрод» и каково падение напряжения на этом участке. Мощность тепловложения в свариваемые детали достаточно полно характеризует протекание процесса сварки и позволяет прогнозировать качество выполняемого соединения.



При активном контроле процесс контактной рельефной сварки прекращается по достижении определенным параметром изначально заданного значения. Таким параметром может быть, например, количество вложенной энергии в зону сварки [1] или достигнутое перемещение подвижного электрода.

В корректирующих системах процесс управления осуществляется таким образом, чтобы изменение во времени контролируемого параметра соответствовало некоторой «идеальной» кривой, которую снимают в эталонных условиях сварки. При этом наиболее эффективными будут те системы, которые адаптируются к различным ситуациям и способны изменять параметры закона управления в ходе процесса [2].

В качестве такой корректирующей системы авторами предложена система автоматического регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной точечной и рельефной сварке (рис. 1). Измеренная с помощью блока вычислений БВ, датчика тока ДТ и датчика напряжения ДН

мощность  $P_{ЭЭ,ИЗМ}$  сравнивается с заданной  $P'_{ЭЭ,ЗАД}$ , по результатам сравнения производится коррекция воздействия на тиристорный контактор КТ через фазосдвигающее устройство ФСУ. Датчик перемещения подвижного электрода ДП служит для измерения деформации рельефа при рельефной сварке или для определения величины внедрения электродов в детали при точечной сварке, что является необходимым для определения момента выключения сварочного тока. Датчик ДП с помощью преобразователя сигнала перемещения ПСП воздействует на заданное значение мощности тепловложения  $P_{ЭЭ,ЗАД}$  через коэффициент  $K_{ДП}$  датчика перемещения. Значение угла управления тиристорами  $\alpha$  корректируется в каждом периоде сетевого напряжения с учетом заданной циклограммы мощности  $P_{ЭЭ}$  и энергии  $Q_{ЭЭ}$  тепловложения. Значение энергии тепловложения  $Q_{ЭЭ,ИЗМ}$  определяется также с помощью блока вычислений БВ.

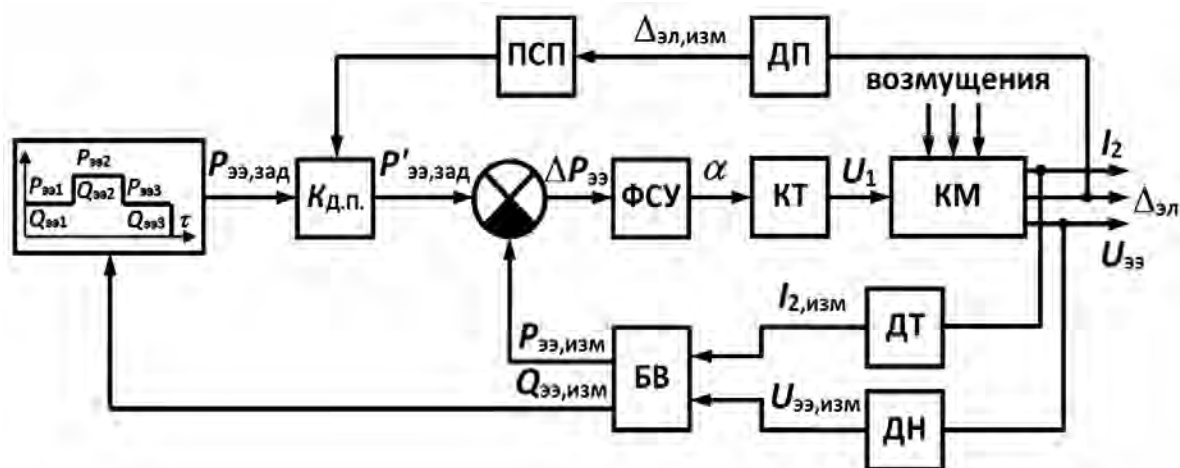


Рис. 1. Система автоматического регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке

Фазовое регулирование переменного напряжения при контактной сварке базируется на управлении действующим значением переменного напряже-

ния на нагрузке путем изменения длительности открытого состояния одного из включенных встречно-параллельно тиристоров в течение полупериода



частоты сети (рис. 2, а).

Для вычисления тепловыделения на сварочном участке «электрод-электрод» необходимо иметь информацию о действующем значении вторичного тока  $I_2$  и сопротивлении  $R_{ЭЭ}$  участка «электрод-электрод». Полное сопротивление  $Z_2$  контактной машины, являющееся суммой активного и индуктивного

сопротивлений вторичного контура  $R_2$  и  $X_2$  и приведенных к вторичному витку активного и индуктивного сопротивлений первичной обмотки  $R'_1$  и  $X'_1$ , определяет ток  $i_2$  во вторичном контуре в соответствии с известной схемой замещения сварочного трансформатора (рис. 2, б) [2, 3].

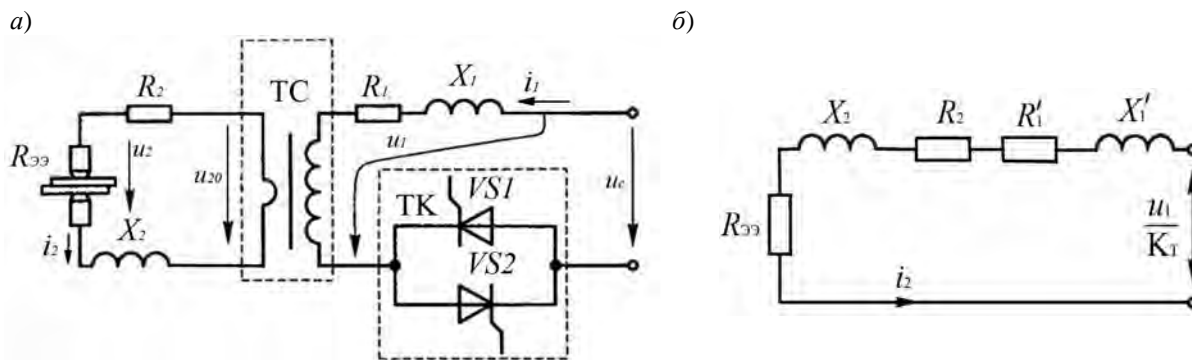


Рис. 2. Электрическая схема контактной сварочной машины (а) и схема её замещения (б)

Фазовое управление действующим значением мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке должно опираться на математический аппарат, позволяющий с помощью высокопроизводительных вычислительных средств осуществлять расчет параметров регулирования (угла  $\alpha$  открытия тиристорov, времени  $t_{св}$  протекания сварочного тока) на основании измерения параметров машины для контактной сварки (сетевое напряжение  $u_c$ , коэффициента трансформации  $K_T$  на выбранной ступени, активного и индуктивного сопротивлений сварочного контура  $R_{2K} = R'_1 + R_2$  и  $X_{2K} = X'_1 + X_2$  (см. рис. 2, б), активного сопротивления  $R_{ЭЭ}$  сварочного участка) и параметров режима сварки (тока сварки  $I_2$ , длительности включенного состояния тиристорov  $\lambda$ , напряжения на электродах  $U_2$ , мощности  $P_2$  и энергии  $Q_{ЭЭ}$  тепловложения).

Для упрощения расчетов за начало отсчета времени  $t = 0$  принимаем мо-

мент включения тиристорov контактора (рис. 3). Тогда напряжение  $u_1$ , подаваемое на первичную обмотку сварочного трансформатора (см. рис. 2, а), будет задаваться как

$$u_1(t) \approx u_c(t) \text{ при } 0 \leq \omega t \leq \lambda. \quad (1)$$

При этом нужно учитывать, что напряжение  $u_1$  будет несколько ниже напряжения сети  $u_c$  в связи с падением напряжения на входных сетевых кабелях и на тиристорном контакторе. Поэтому напряжение  $u_1$  будем измерять непосредственно на входных клеммах первичной обмотки трансформатора.

На выводы схемы замещения контактной машины в режиме холостого хода подается переменное синусоидальное напряжение  $u_{20}$ , равное ЭДС вторичной обмотки трансформатора  $e_2$  (см. рис. 2, б):

$$u_{20} = e_2 = u_1 / K_T. \quad (2)$$



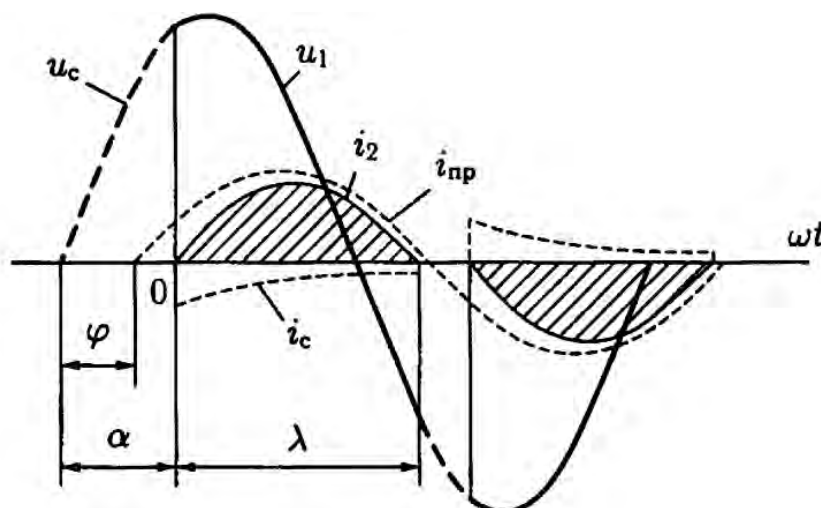


Рис. 3. Временные диаграммы тиристорного преобразователя переменного напряжения с индуктивностью в цепи нагрузки

Коэффициент регулирования действующего значения напряжения холостого хода определяется по формуле

$$k_U = \frac{U_{20}}{U_{20П}} = \sqrt{\frac{2\lambda + \sin(2\alpha) - \sin(2\alpha + 2\lambda)}{2\pi}}, \quad (3)$$

где  $U_{20}$  – действующее значение напряжения холостого хода на вторичной обмотке трансформатора;  $U_{20П}$  – действующее значение напряжения холостого хода на вторичной обмотке трансформатора при его полнофазном включении [4].

При сварке полное сопротивление  $Z_2$  сварочного контура контактной машины включает в себя также электрическое сопротивление деталей  $R_{ЭЭ}$  (см. рис. 3):

$$Z_2 = \sqrt{(R_{2К} + R_{ЭЭ})^2 + X_{2К}^2}. \quad (4)$$

После замыкания педали сварочной машины реальный ток  $i_2$  во вторичном контуре будет складываться из принужденного  $i_{ПР}$  и свободного  $i_c$  токов,  $i_2 = i_{ПР} + i_c$  (см. рис. 3) [2–5]. Принужденный ток  $i_{ПР}$  – это установившийся полнофазный ток. Свободный ток  $i_c$

обусловлен изменением энергии магнитного поля индуктивного элемента. Действующее значение полнофазного сварочного тока  $I_{2П}$  рассчитывается в зависимости от полнофазного напряжения холостого хода  $U_{20П}$  сварочного трансформатора:

$$I_{2П} = U_{20П} / Z_2. \quad (5)$$

Момент естественного прекращения протекания тока ( $i_2 = 0$ ) и продолжительность  $\lambda$  его включения определяются равенством абсолютных величин токов  $i_{ПР}$  и  $i_c$  (см. рис. 3). При этом длительность включения тиристорных находят как первый ненулевой корень уравнения  $i_2(\omega t) = 0$ , т. е.

$$\begin{aligned} \sin(\lambda + \alpha - \varphi) / \sin(\alpha - \varphi) &= \\ &= \exp(-\lambda \cdot \operatorname{ctg} \varphi), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\alpha, \lambda, \varphi$  – углы в радианах.

При включении контактной сварочной машины через тиристорный контактор с углом включения тиристорных  $\alpha > \varphi$  (см. рис. 4) действующие значения реального тока  $I_2$  и полнофазного тока  $I_{2П}$  связаны между собой через коэффициент  $k_1$  регулирования



сварочного тока [2–5]

$$k_I = \frac{I_2}{I_{2П}} = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} - \frac{\sin\lambda}{\pi \cos\varphi}} \cdot \cos(2\alpha + \varphi + \lambda). \quad (7)$$

Значение коэффициента мощности  $\cos\varphi$  изменяется при варьировании активного и индуктивного сопротивлений сварочного контура  $R_{2К}$  и  $X_{2К}$  и активного сопротивления  $R_{ЭЭ}$  участка «электрод-электрод». Поэтому при построении систем автоматического управления требуется отслеживать изменение  $\cos\varphi$  в реальном времени с помощью высокопроизводительных вычислительных средств.

Для построения системы автоматического регулирования процесса контактной сварки необходимо знать зависимости мощности, потребляемой машиной из сети, от сварочного тока и сопротивления деталей. Коэффициент  $k_S$  регулирования полной мощности, потребляемой сварочной машиной из сети, можно определить из (3) и (7) по сле-

дующему выражению:

$$k_S = k_U \cdot k_I = \frac{U_{20}}{U_{20П}} \cdot \frac{I_2}{I_{2П}} = \sqrt{\frac{2\lambda + \sin(2\alpha) - \sin(2\alpha + 2\lambda)}{2\pi}} \times \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} - \frac{\sin\lambda}{\pi \cos\varphi}} \cdot \cos(2\alpha + \varphi + \lambda). \quad (8)$$

Расчеты по формуле (8) представляют собой зависимость коэффициента  $k_S$  от параметров фазового регулирования  $\alpha$  при заданном  $\cos\varphi$  (табл. 1, рис. 4).

Функция  $k_S = f(\alpha)$  может быть аппроксимирована нелинейной зависимостью

$$k_S = f(\alpha) = A_3 \cdot \alpha^3 + A_2 \cdot \alpha^2 + A_1 \cdot \alpha + A_0, \quad (9)$$

где  $A_0, A_1, A_2, A_3$  – коэффициенты, зависящие от коэффициента мощности  $\cos\varphi$ .

Табл. 1. Значения коэффициента  $k_S$  регулирования полной мощности в зависимости от параметров фазового регулирования  $\alpha$  при заданном  $\cos\varphi$

cosφ	Коэффициент регулирования полной мощности $k_S$						
	Угол открытия тиристорov α, град						
	60	70	80	90	100	110	120
0,2	–	–	0,962	0,729	0,520	0,344	0,208
0,3	–	–	0,845	0,646	0,465	0,311	0,190
0,4	–	0,937	0,757	0,583	0,423	0,286	0,177
0,5	1,000	0,848	0,690	0,535	0,392	0,267	0,167
0,6	0,915	0,781	0,639	0,499	0,367	0,252	0,159
0,7	0,851	0,730	0,601	0,471	0,350	0,243	0,154
0,8	0,805	0,694	0,574	0,454	0,339	0,237	0,153



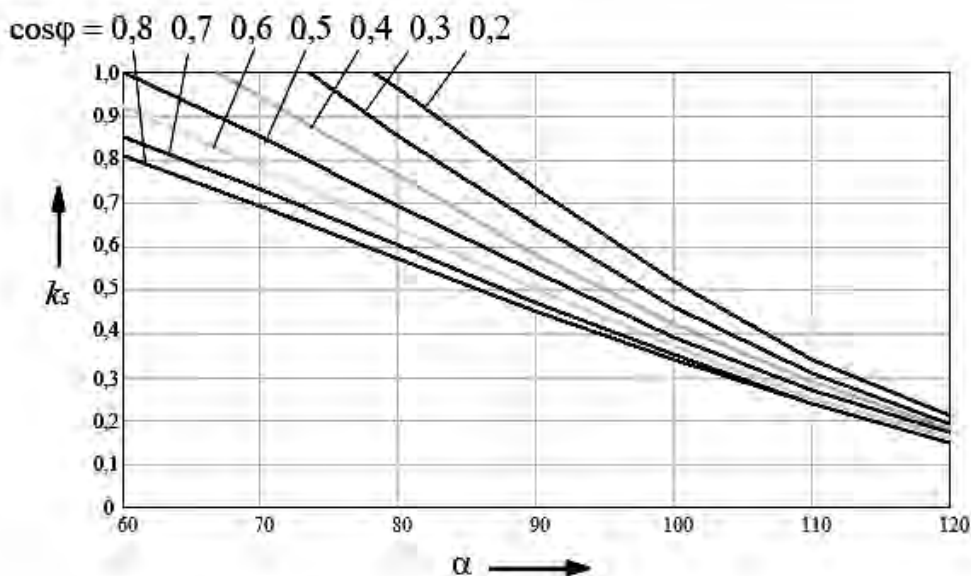


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $k_s$  регулирования полной мощности от параметров фазового регулирования  $\alpha$  при заданном  $\cos\varphi$

Использование сварочной машины по установленной мощности и ее производительность зависят от настройки регулятора цикла сварки на коэффициент мощности  $\cos\varphi$  цепи нагрузки. В зависимости от типа машины, диапазонов свариваемых толщин и марок материалов  $\cos\varphi$  может составлять 0,2...0,8 [6]. Кроме того, стабильный и рациональный режим работы тиристорного контактора обеспечивается при выполнении условия  $\varphi + 5^\circ < \alpha < \varphi + 60^\circ$  [2, 4].

Определим значения коэффициентов  $A_0, A_1, A_2$  и  $A_3$  для заданных значений  $\cos\varphi = 0,2...0,8$ . Каждому значению  $\cos\varphi = [0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8]$  сопоставим систему нелинейных уравнений:

$$\begin{aligned} f(\alpha_3) &= A_3 \cdot \alpha_3^3 + A_2 \cdot \alpha_3^2 + A_1 \cdot \alpha_3 + A_0; \\ f(\alpha_2) &= A_3 \cdot \alpha_2^3 + A_2 \cdot \alpha_2^2 + A_1 \cdot \alpha_2 + A_0; \\ f(\alpha_1) &= A_3 \cdot \alpha_1^3 + A_2 \cdot \alpha_1^2 + A_1 \cdot \alpha_1 + A_0; \\ f(\alpha_0) &= A_3 \cdot \alpha_0^3 + A_2 \cdot \alpha_0^2 + A_1 \cdot \alpha_0 + A_0. \end{aligned} \quad (10)$$

Для заданного диапазона изменений угла регулирования  $\alpha = 60...120^\circ$  (см. табл. 1, рис. 4) определим узлы ин-

терполяции  $\alpha_3, \alpha_2, \alpha_1$  и  $\alpha_0$ , исходя из условия минимизации погрешности интерполяции [2, 7, 8]:

$$a_m = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} \cos\left(\frac{2m+1}{2n+2}\pi\right), \quad (11)$$

где  $a, b$  – границы отрезка интерполяции  $[a; b] = [60^\circ; 120^\circ]$ ;  $n$  – максимальный номер узла интерполяции,  $n = 3$ ;  $m$  – номер узла интерполяции,  $m = 0, 1, 2, 3$ .

Результаты расчета по формуле (11) представлены в табл. 2. С учетом выбранных узлов интерполяции  $\alpha_3, \alpha_2, \alpha_1$  и  $\alpha_0$  решаем семь систем уравнений (10) и определяем значения коэффициентов  $A_3, A_2, A_1$  и  $A_0$ . Значения функций  $f(\alpha_3), f(\alpha_2), f(\alpha_1)$  и  $f(\alpha_0)$  вычисляем по формулам (6) и (8). Результаты расчета сводим в табл. 3.

Если представить значения коэффициентов  $A_3, A_2, A_1$  и  $A_0$  в виде графиков (показано на рис. 5 штриховыми линиями), то становится возможной аппроксимация этих графиков многочленами четвертой степени:

$$\begin{aligned}
 A_0 &= f_0(\cos\varphi) = B_4\cos^4\varphi + B_3\cos^3\varphi + B_2\cos^2\varphi + B_1\cos\varphi + B_0; \\
 A_1 &= f_1(\cos\varphi) = C_4\cos^4\varphi + C_3\cos^3\varphi + C_2\cos^2\varphi + C_1\cos\varphi + C_0; \\
 A_2 &= f_2(\cos\varphi) = D_4\cos^4\varphi + D_3\cos^3\varphi + D_2\cos^2\varphi + D_1\cos\varphi + D_0; \\
 A_3 &= f_3(\cos\varphi) = E_4\cos^4\varphi + E_3\cos^3\varphi + E_2\cos^2\varphi + E_1\cos\varphi + E_0.
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Табл. 2. Определение границ отрезка интерполяции [a, b] и узлов интерполяции  $\alpha_3, \alpha_2, \alpha_1, \alpha_0$  для заданных значений  $\cos\varphi$

$\cos\varphi$	a, град	b, град	$\alpha_3$ , град	$\alpha_2$ , град	$\alpha_1$ , град	$\alpha_0$ , град
0,2...0,8	60	120	117,72	101,48	78,52	62,28

Табл. 3. Вычисление семейства аппроксимирующих функций для коэффициента регулирования полной мощности  $k_{Sn} = f(\alpha)$

$\cos\varphi$	$\alpha_3$ , рад	$\alpha_2$ , рад	$\alpha_1$ , рад	$\alpha_0$ , рад	$f(\alpha_3)$	$f(\alpha_2)$	$f(\alpha_1)$	$f(\alpha_0)$	$A_3$	$A_2$	$A_1$	$A_0$
0,2	2,055	1,771	1,37	1,087	0,236	0,491	0,999	1,398	0,340	-1,230	0,064	2,344
0,3	2,055	1,771	1,37	1,087	0,215	0,441	0,876	1,211	0,286	-1,066	0,134	1,958
0,4	2,055	1,771	1,37	1,087	0,2	0,401	0,783	1,072	0,266	-1,023	0,284	1,631
0,5	2,055	1,771	1,37	1,087	0,187	0,372	0,714	0,966	0,247	-0,990	0,417	1,364
0,6	2,055	1,771	1,37	1,087	0,179	0,349	0,66	0,886	0,232	-0,948	0,474	1,192
0,7	2,055	1,771	1,37	1,087	0,173	0,333	0,62	0,825	0,217	-0,903	0,510	1,060
0,8	2,055	1,771	1,37	1,087	0,17	0,323	0,592	0,781	0,204	-0,866	0,533	0,963

На отрезке  $\cos\varphi = 0,2...0,8$  узлы интерполяции зададим, исходя из условия минимизации погрешности интерполяции [2, 7, 8]:

$$a_m = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} \cos\left(\frac{2m+1}{2n+2}\pi\right), \tag{13}$$

где  $a, b$  – границы отрезка интерполяции  $[a; b] = [0,2; 0,8]$ ;  $n$  – максимальный номер узла интерполяции,  $n = 4$ ;  $m$  – номер узла интерполяции,  $m = 0, 1, 2, 3, 4$ .

Решая уравнение (13) для  $m = 0, 1, 2, 3, 4$ , получим  $\cos\varphi = 0,79; 0,68; 0,50; 0,32; 0,21$ . С учетом выбранных узлов интерполяции из (12) получим четыре системы уравнений для получения искомого коэффициентов  $B_0-B_4, C_0-C_4, D_0-D_4$  и  $E_0-E_4$ . Результаты расчетов представлены в табл. 4. Графики аппроксимирующих функций коэффициентов  $A_0 = f_0(\cos\varphi), A_1 = f_1(\cos\varphi), A_2 = f_2(\cos\varphi), A_3 = f_3(\cos\varphi)$  показаны на рис. 5 сплошными линиями.



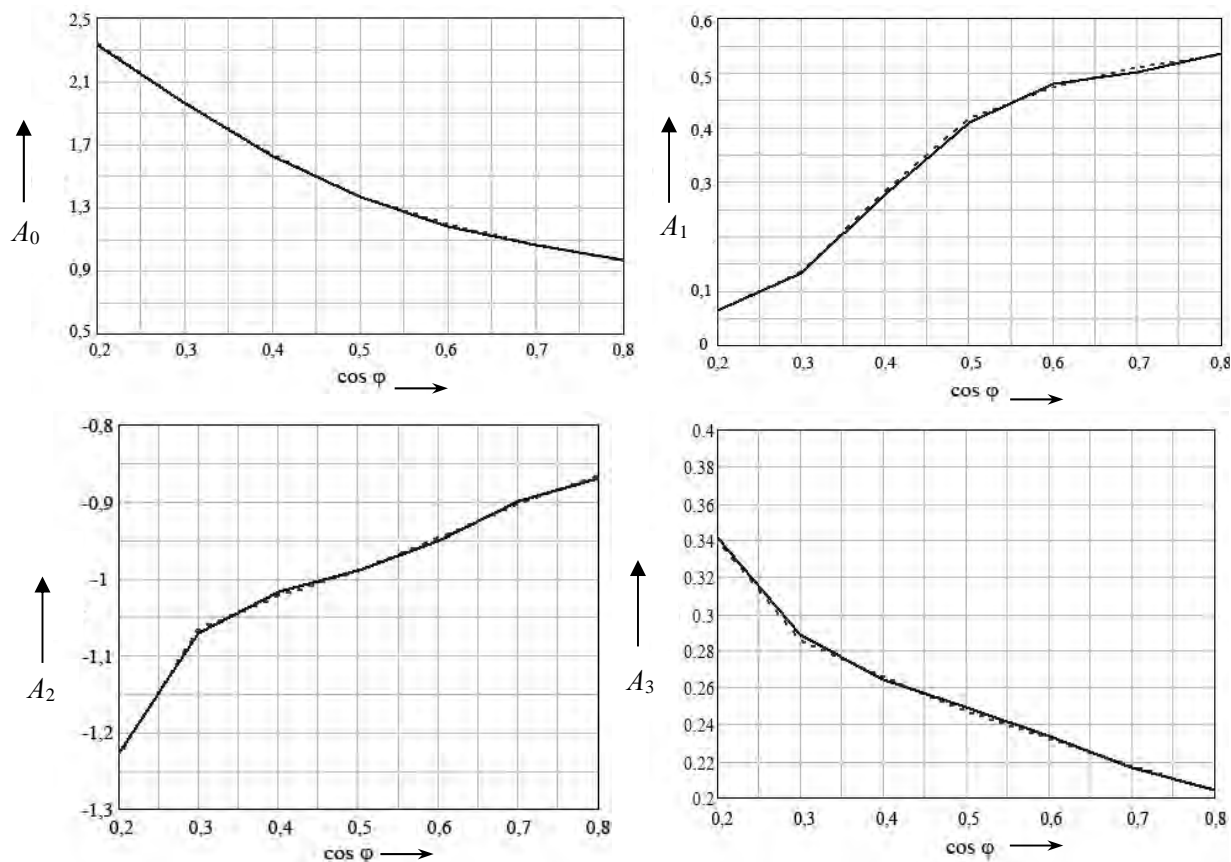


Рис. 5. Графики функций коэффициентов  $A_0 = f_0(\cos\varphi)$ ,  $A_1 = f_1(\cos\varphi)$ ,  $A_2 = f_2(\cos\varphi)$ ,  $A_3 = f_3(\cos\varphi)$ : - - - - по расчетным значениям (табл. 3); — по аппроксимирующей зависимости

Табл. 4. Расчет искомых коэффициентов  $B_0-B_3$ ,  $C_0-C_3$ ,  $D_0-D_3$  и  $E_0-E_3$

Значение функций $A_0-A_3$	Узел интерполяции $\cos\varphi$					Значение коэффициента				
	0,79	0,68	0,5	0,32	0,1	$B_4$	$B_3$	$B_2$	$B_1$	$B_0$
$A_0$	0,975	1,08	1,364	1,89	2,29	-10,482	20,631	-11,149	-1,322	2,889
						$C_4$	$C_3$	$C_2$	$C_1$	$C_0$
$A_1$	0,53	0,50	0,41	0,16	0,065	21,885	-46,53	33,79	-8,801	0,811
						$D_4$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$
$A_2$	-0,87	-0,91	-0,99	-1,055	-1,205	-15,402	34,185	-27,444	9,8	-2,339
						$E_4$	$E_3$	$E_2$	$E_1$	$E_0$
$A_3$	0,205	0,22	0,249	0,282	0,334	3,521	-8,013	6,685	-2,577	0,648





Таким образом, получаем систему уравнений для расчета приближенного

значения коэффициента  $k_S$  регулирования полной мощности:

$$k_{S,A} = f(\alpha, \cos\varphi) = A_3 \cdot \alpha^3 + A_2 \cdot \alpha^2 + A_1 \cdot \alpha + A_0;$$

$$\begin{aligned} A_0 = f_0(\cos\varphi) &= -10,842\cos^4\varphi + 20,631\cos^3\varphi - 11,149\cos^2\varphi - 1,322\cos\varphi + 2,889; \\ A_1 = f_1(\cos\varphi) &= 21,885\cos^4\varphi - 46,53\cos^3\varphi + 33,79\cos^2\varphi - 8,801\cos\varphi + 0,811; \\ A_2 = f_2(\cos\varphi) &= -15,402\cos^4\varphi + 34,185\cos^3\varphi - 27,444\cos^2\varphi + 9,8\cos\varphi - 2,339; \\ A_3 = f_3(\cos\varphi) &= 3,521\cos^4\varphi - 8,013\cos^3\varphi + 6,685\cos^2\varphi - 2,577\cos\varphi + 0,648. \end{aligned} \quad (14)$$

Относительная погрешность вычислений определялась как

$$\omega\% = \frac{k_{S,A}(\alpha, \cos\varphi) - k_S(\alpha, \cos\varphi)}{k_S(\alpha, \cos\varphi)} 100\%, \quad (15)$$

где коэффициент  $k_{S,A}(\alpha, \cos\varphi)$  вычислялся по аппроксимирующей зависимости (14), а  $k_S(\alpha, \cos\varphi)$  – по формуле (8) [2].

Для области определения коэффициента  $\cos\varphi = 0,2 \dots 0,8$  и угла регулирования  $\alpha = 60 \dots 120^\circ$  относительная погрешность аппроксимации по формуле (15)

составляет не более 3,3 % (табл. 5).

Коэффициент регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону приблизительно равен коэффициенту регулирования мощности, потребляемой сварочной машиной из сети:  $k_P \approx k_S$ .

В корректирующей системе автоматического регулирования мощности тепловложения выбор угла  $\alpha_{n+1}$  открытия тиристоров в  $(n + 1)$ -м периоде зависит от измеренных параметров в  $n$ -м периоде (рис. 6).

Табл. 5. Относительная погрешность аппроксимации  $\omega\%$  коэффициента  $k_S$

cosφ	Относительная погрешность аппроксимации ω%						
	Угол открытия тиристоров α, град						
	60	70	80	90	100	110	120
0,2	–	–	0,842	0,998	0,702	0,336	3,3
0,3	–	–	0,013	0,152	0,276	0,539	2,636
0,4	–	0,307	0,134	0,011	0,223	0,188	2,374
0,5	0,601	0,739	0,626	0,634	0,391	0,012	2,565
0,6	0,705	0,876	0,805	0,736	0,402	0,214	3,043
0,7	0,288	0,413	0,46	0,281	0,07	0,541	3,143
0,8	0,471	0,456	0,478	0,475	0,462	0,369	0,946



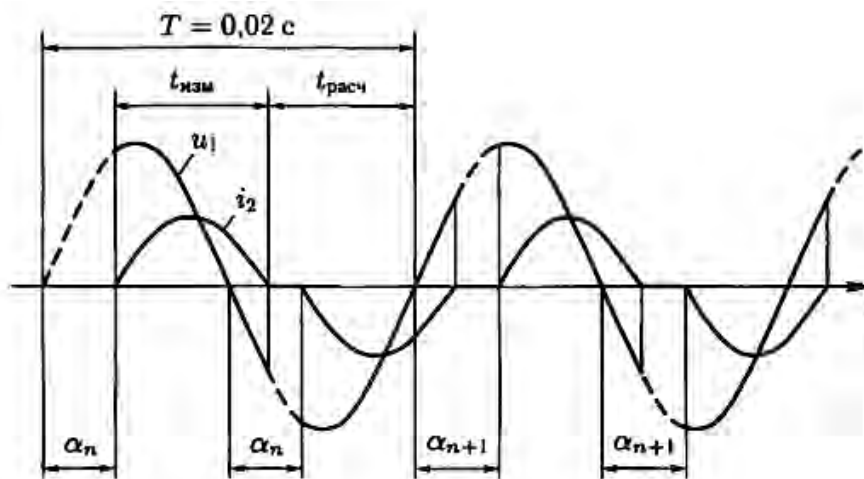


Рис. 6. Время измерения параметров  $t_{изм}$  и время расчета  $t_{расч}$  корректирующего воздействия при автоматическом регулировании процесса контактной сварки

Перед началом сварки необходимо определить коэффициент трансформации установленной ступени трансформатора, действующее значение напряжения холостого хода на вторичной обмотке трансформатора при его полнофазном включении  $U_{20П}$ , активное  $R_{2К}$  и индуктивное  $X_{2К}$  сопротивление сварочной машины в режиме короткого замыкания. Кроме того, задается требуемая мощность тепловложения  $P_{23АД}$ , которую должна обеспечить машина в  $(n + 1)$ -м периоде.

Время  $t_{изм}$  измерения выходных параметров процесса контактной рельефной сварки совпадает со временем включенного состояния тиристора  $\lambda_n$  в  $n$ -м периоде. В начале сварки ток должен устанавливаться минимальным при максимальном угле регулирования тиристорov  $\alpha_n = \alpha_{max}$ . Заданная задержка включения тиристорov  $\alpha_n$  вводится в положительном и отрицательном полупериодах. За время  $t_{изм}$  происходит измерение параметров, характеризующих процесс сварки: времени включенного состояния тиристора  $\lambda_n$ , действующих значений сварочного тока  $I_2$ , напряжения на электродах  $U_2$  и напряжения  $U_1$ , подаваемого на первичную обмотку

сварочного трансформатора.

В течение оставшегося до конца  $n$ -го периода времени  $t_{расч}$  производится вычисление задержки включения тиристорov  $\alpha_{n+1}$  для  $(n + 1)$ -го периода. Для этого последовательно вычисляется ряд параметров.

1. Мощность  $P_2 = U_2 \cdot I_2$  и энергия тепловложения  $Q_{ЭЭ} = P_2 \cdot T$  за период  $T$ .

2. Сопротивление участка «электрод-электрод»  $R_{ЭЭ} = U_2 / I_2$ .

3. Коэффициент мощности сварочной машины  $\cos\varphi_n$  в зависимости от длительности включенного состояния тиристорov  $\lambda_n$  и угла включения  $\alpha_n$  по формуле (6).

4. Коэффициент регулирования сварочного тока  $k_I$  для заданного угла включения тиристорov  $\alpha_n$  по формуле (7) в зависимости от  $\lambda_n$  и  $\cos\varphi_n$  и ток полнофазного включения  $I_{2П} = I_2 / k_I$ .

5. Мощность тепловложения при полнофазном включении с учетом сопротивления  $R_{ЭЭ}$ , рассчитанного в п. 2,  $P_{2П} = I_{2П}^2 \cdot R_{ЭЭ}$ .

6. Требуемый коэффициент регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону в  $(n + 1)$ -м периоде  $k_{P_{n+1}} = P_{23АД} / P_{2П}$ , равный коэффициенту регулирования мощности, по-



требуемой сварочной машиной из сети,  
 $k_{P_{n+1}} \approx k_{S_{n+1}}$ .

7. При известном коэффициенте  $k_{S_{n+1}}$  производится вычисление задержки включения тиристоров  $\alpha_{n+1}$  для  $(n + 1)$ -го периода по формулам (14). С учетом коэффициента мощности  $\cos\varphi_n$  (п. 3) вычисляются коэффициенты  $A_0 = f_0(\cos\varphi_n)$ ,  $A_1 = f_1(\cos\varphi_n)$ ,  $A_2 = f_2(\cos\varphi_n)$ ,  $A_3 = f_3(\cos\varphi_n)$  и затем составляется кубическое уравнение, которое нужно решить относительно  $\alpha_{n+1}$ :

$$A_3 \cdot \alpha_{n+1}^3 + A_2 \cdot \alpha_{n+1}^2 + A_1 \cdot \alpha_{n+1} + A_0 - k_{S,n+1} = 0. \quad (16)$$

Таким образом, разработанная авторами корректирующая система автоматического управления процессом контактной сварки позволяет вычислять коэффициент регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону в последующем периоде сетевого напряжения на основании измерения параметров машины для контактной сварки и параметров режима сварки в течение предыдущего периода.

## Выводы

1. Разработана корректирующая система автоматического управления процессом контактной сварки, базирующаяся на фазовом регулировании действующего значения мощности тепловложения в межэлектродную зону путем изменения длительности открытого состояния одного из включенных встречно-параллельно тиристоров в течение полупериода сетевого напряжения.

2. В теории обосновано, что мощность тепловложения в свариваемые детали на участке «электрод-электрод» достаточно полно характеризует протекание процесса сварки и позволяет прогнозировать качество выполняемого соединения.

3. Вычисление коэффициента регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону в последующем периоде сетевого напряжения осуществляется на основании измерения параметров машины для контактной сварки и параметров режима сварки в течение предыдущего периода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков, А. Ю. Система автоматического управления процессом контактной рельефной сварки / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 4. – С. 75–84.
2. Климов, А. С. Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества / А. С. Климов. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 216 с.
3. Рыськова, З. А. Трансформаторы для электрической контактной сварки / З. А. Рыськова, П. Д. Федоров, В. И. Жемерева. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1990. – 423 с.
4. Глебов, Л. В. Устройство и эксплуатация контактных машин / Л. В. Глебов, Ю. И. Филиппов, П. Л. Чулошников. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1987. – 312 с.
5. Патон, Б. Е. Электрооборудование для контактной сварки. Элементы теории / Б. Е. Патон, В. К. Лебедев. – Москва : Машиностроение, 1969. – 440 с.
6. Оборудование для контактной сварки : справочное пособие / Под ред. В. В. Смирнова. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-ние, 2000. – 848 с.
7. Амосов, А. Л. Вычислительные методы для инженеров : учебное пособие / А. Л. Амосов, Ю. Л. Дубинский, Н. В. Копченова. – Москва : Высшая школа, 1994. – 544 с.
8. Вержбицкий, В. М. Основы численных методов : учебник для вузов / В. М. Вержбицкий. – Москва : Высшая школа, 2002. – 840 с.



Статья сдана в редакцию 6 декабря 2017 года

**Сергей Михайлович Фурманов**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: [furm@mail.ru](mailto:furm@mail.ru).

**Андрей Юрьевич Поляков**, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет.  
E-mail: [mortis2008@mail.ru](mailto:mortis2008@mail.ru).

**Дмитрий Николаевич Юманов**, аспирант, Белорусско-Российский университет.  
E-mail: [oitsp.dmitriy.y@gmail.com](mailto:oitsp.dmitriy.y@gmail.com).

**Андрей Николаевич Кухарев**, студент, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-029-544-90-67.

**Sergey Mikhailovich Furmanov**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: [furm@mail.ru](mailto:furm@mail.ru).

**Andrey Yuryevich Polyakov**, PhD (Engineering), senior lecturer, Belarusian-Russian University.  
E-mail: [mortis2008@mail.ru](mailto:mortis2008@mail.ru).

**Dmitry Nikolayevich Yumanov**, PhD student, Belarusian-Russian University. E-mail: [oitsp.dmitriy.y@gmail.com](mailto:oitsp.dmitriy.y@gmail.com).

**Andrey Nikolayevich Kukharev**, student, Belarusian-Russian University. Phone: +375 29-544-90-67.

