

УДК 621.791

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ НА МАШИНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*А. С. КЛИМОВ, А. Н. АНЦИБОРОВ*

Тольяттинский государственный университет

Тольятти, Россия

UDC 621.791

## INCREASING THE EFFICIENCY OF RESISTANCE WELDING ON AC MACHINES

*A. S. KLIMOV, A. N. ANTSIBOROV*

**Аннотация.** Предложены и апробированы методики оперативной оценки состояния питающей сети и оборудования для контактной сварки на переменном токе. Представлены алгоритмы для определения энергетических характеристик (ток, сопротивление, энерговыделение) по параметрам фазового регулирования. Приведены примеры промышленного применения.

**Ключевые слова:** контактная сварка, автоматизация, контроль и диагностика, электрические параметры.

**Abstract.** Methods for the operational assessment of the state of the supply network and equipment for resistance welding on alternating current are proposed and tested. Algorithms for determining the energy characteristics (current, resistance, energy release) by the parameters of phase control are presented. Examples of industrial applications are given.

**Keywords:** resistance welding, automation, control and diagnostics, electrical parameters.

В настоящее время отечественный производитель находится в сложнейших условиях конкуренции с иностранными (западными и азиатскими) предприятиями, повышения закупочной цены оборудования и комплектующих к нему, кадрового и финансового голода, морального и физического устаревания оборудования [1, 2].

В 2021 г. в мире введено в эксплуатацию 86 тыс. машин для контактной сварки на общую сумму 1,4 млрд долл. США. К 2035 г. планируется увеличение объемов до 2 млрд долл. США. В России же совершенствование технологий производства осложняется физическим и (тем более) моральным устареванием оборудования (порядка 40 % оборудования для контактной сварки имеет срок службы более 20 лет). Кроме того, ощущается недостаток средств, выделяемых на научно-исследовательские разработки в области сварки и кадровую подготовку производства [3, 4].

В этих условиях задача повышения качества сварки решается за счет «прорывных» решений, позволяющих кратно повысить эффективность использования оборудования без существенных затрат на его изготовление и модернизацию.

Повышение эффективности оборудования для контактной сварки без затрат

на его глубокую модернизацию достигается совершенствованием методик контроля качества и систем управления. Для этого необходимо решить задачи оперативной диагностики состояния сварочного оборудования и питающей сети, моделирования электрических процессов в системе «машина – деталь», поиска параметров обратной связи, синтеза алгоритмов диагностики и управления.

Для оценки величины паразитных параметров питающей сети (активного сопротивления  $R_c$  и индуктивности  $L_c$  сети) предложена методика расчётного определения по результатам опыта короткого замыкания в режиме однофазного включения [5]. По осциллограмме напряжения (см. рис. 1) определяют: до коммутации – действующее напряжение сети на холостом ходу  $U_{c,xx}$ ; в момент коммутации – провал напряжения  $\Delta U$ ; после коммутации – действующее напряжение сети под нагрузкой  $U_{c,св}$ . По осциллограмме тока (см. рис. 1) определяют: в момент коммутации – скорость нарастания первичного тока  $dI_1/dt$ ; после коммутации – действующий первичный ток  $I_1$  и угол  $\varphi_1$  отставания тока от напряжения.

Индуктивность сети  $L_c$  вычисляется по провалу напряжения  $\Delta U$  и скорости нарастания первичного тока  $dI_1/dt$  в момент коммутации  $t_k$ :

$$L_c = \Delta U / \frac{dI_1}{dt}. \quad (1)$$

Активное сопротивление сети  $R_c$  вычисляется как

$$R_c = \sqrt{\left(\frac{U_{c,xx}}{I_1}\right)^2 - \left(\frac{U_1}{I_1} \sin \varphi_1 + 2\pi f_c L_c\right)^2} - \frac{U_1}{I_1} \cos \varphi_1. \quad (2)$$

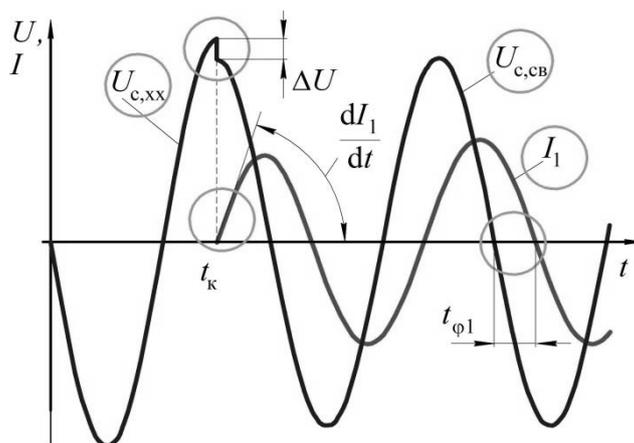


Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения при однофазном включении

По известным паразитным параметрам сети может быть оценено её текущее состояние, принято решение на проведение корректировки параметров режима и калибровки канала измерения тока в регуляторе сварки.

Для повышения точности определения действующего сварочного тока  $I_2$

при измерениях со стороны первичной обмотки трансформатора предложены способ и устройство (рис. 2), включающее датчик тока в первичном контуре 1, датчик наличия тока во вторичном контуре 2, нормирующую цепь датчика тока 3 и микроконтроллер 4 [6, 7].

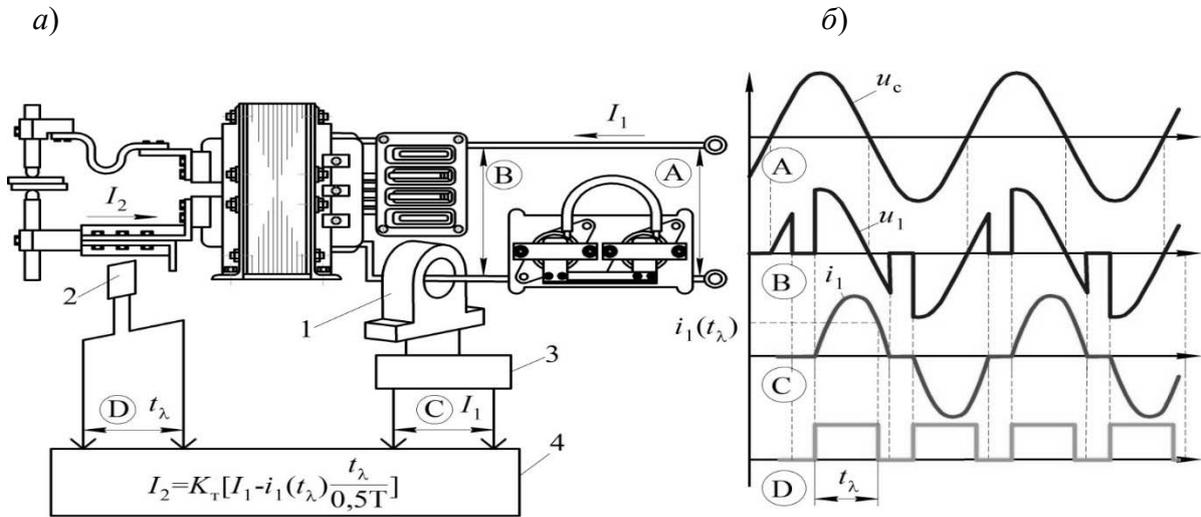


Рис. 2. Схема измерения вторичного тока (а) и диаграмма сигналов (б)

В процессе сварки измеряют действующее значение тока  $I_1$  в первичном контуре, длительность  $t_\lambda$  импульса тока во вторичном контуре, мгновенное значение  $i_1(t_\lambda)$  первичного тока  $i_1$  в момент перехода вторичного тока через ноль ( $t_\lambda$ ). Действующий вторичный ток рассчитывают как

$$I_2 = K_T \left[ I_1 - i_1(t_\lambda) \frac{t_\lambda}{0,01} \right]. \quad (3)$$

Формула (3) является эмпирической, однако эффективность её применения доказана при сварке деталей кузова на многоэлектродных машинах, конструкция которых затрудняет установку датчика вторичного тока (рис. 3). Погрешность измерения тока не превышает 3% на области наиболее распространенных значений параметров фазового регулирования.

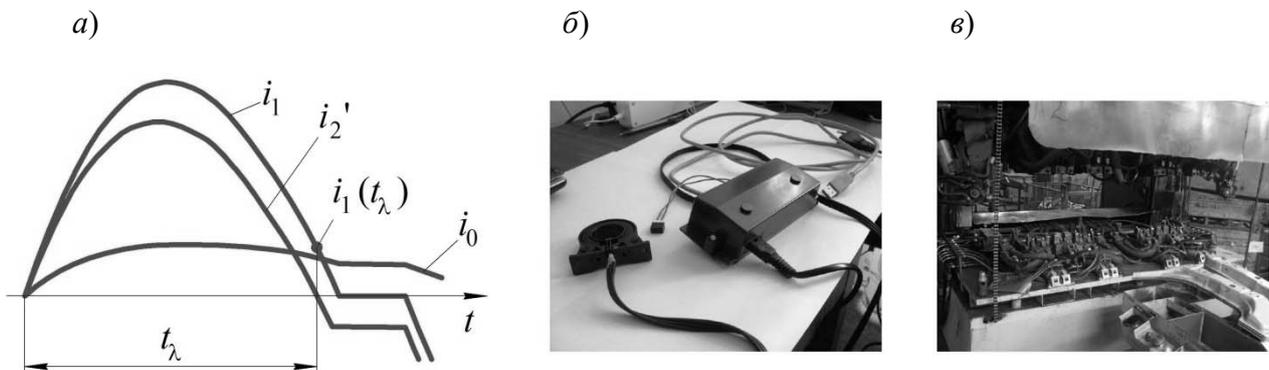


Рис. 3. Диаграммы мгновенных значений токов (а), измеритель сварочного тока (б) и контур многоэлектродной сварочной машины (в)

Для оценки состояния вторичного контура контактных машин предложена методика расчётного определения активного  $R_{2к}$  и индуктивного  $X_{2к}$  сопротивлений в режиме короткого замыкания [8, 9]. Для упрощения расчетов предложены регулировочные характеристики  $k_i \cos \varphi$  и  $k_i \sin \varphi$ , значения которых могут быть определены для заданных углов  $\alpha$  открытия и проводимости  $\lambda$  тиристоров. Для  $\alpha = 90^\circ$  эл. эти характеристики могут быть аппроксимированы линейными двучленами:

$$k_i \cos \varphi = -0,497\lambda + 1,573; \quad (4)$$

$$k_i \sin \varphi = 0,642\lambda - 1,024. \quad (5)$$

При расчетах, согласно (4) и (5), погрешность аппроксимации не превышает 1,5 % на области наиболее распространённых значений параметров фазового регулирования. Отработку предлагаемой методики выполняли на многоэлектродной сварочной машине 503.651.421, установленной в цехе 1421 сборочно-кузовного производства автомобилей на платформе Kalina (рис. 4).

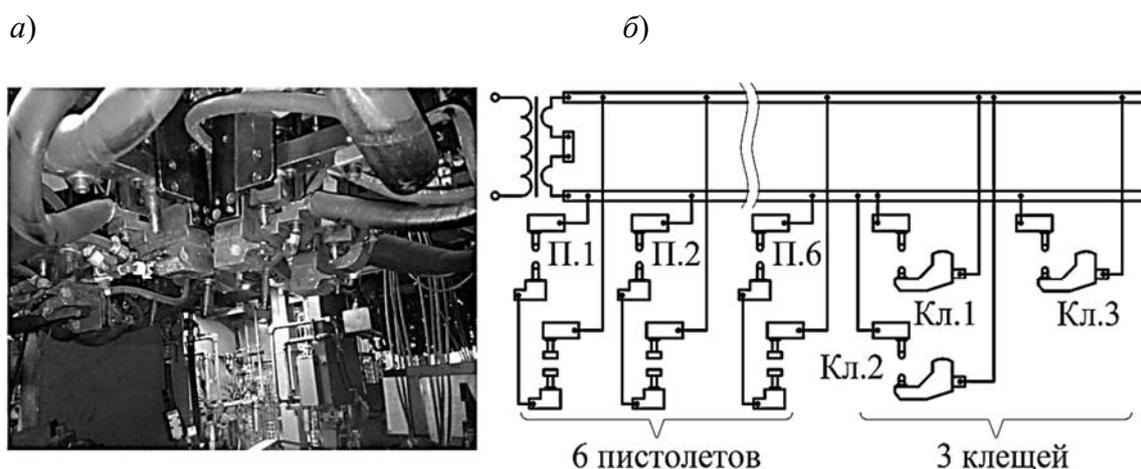


Рис. 4. Внешний вид (а) и схема вторичного контура (б) многоэлектродной сварочной машины 503.651.421

В течение 8 недель было сварено 100 тыс. деталей, при этом отслеживали динамику сопротивления  $R_{2к}$  (рис. 5). За это время произошёл выход из строя перемычек в цепи сварочных пистолетов № 4 и 5, в цепи сварочных клещей № 1 и 2. Установлено, что переход перемычки в «пограничное состояние» может быть отслежен по увеличению скорости роста  $R_{2к}$  до 40 мкОм в неделю. Так, на следующей неделе после прекращения замеров из строя вышли перемычки в контуре пистолетов № 1 и 2.

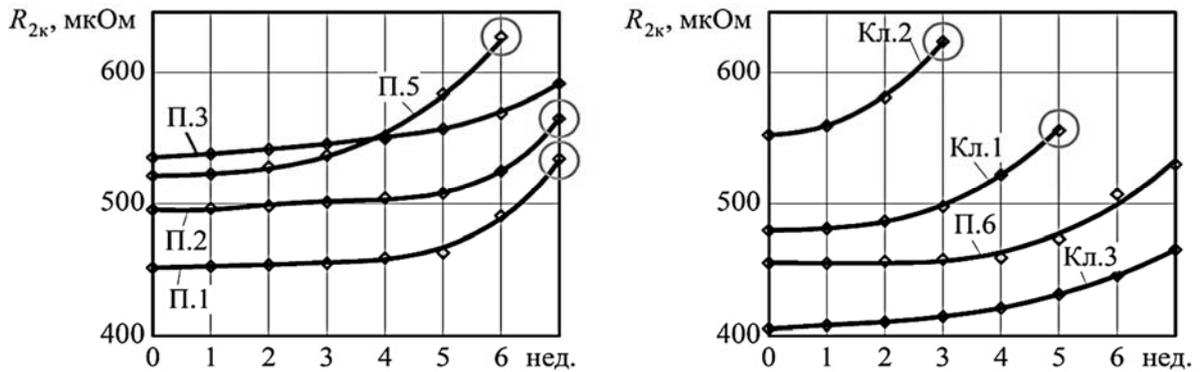


Рис. 5. Динамика сопротивления  $R_{2к}$  при продолжительной работе

С использованием математического и физического моделирования электрических процессов в системе «контактная машина – деталь» предложены и апробированы методики расчётного определения энергетических характеристик (ток сварки  $I_2$ , сопротивление «электрод – электрод»  $R_{ээ}$ , энерговыделение  $q_{ээ}$  между электродами) по параметрам фазового регулирования [10].

Предложенные методики были апробированы на промышленном сварочном оборудовании (машины МТ-1933, МР-8010). Погрешность расчетного определения вторичного тока  $I_2$  составила 6 %, сопротивления участка «электрод – электрод» – 7 %, тепловыделения  $q_{ээ}$  – 10 %. Была выполнена оптимизация параметров режима сварки топливного бака на машине МТ-1933 и топливного фильтра на машине МР-8010.

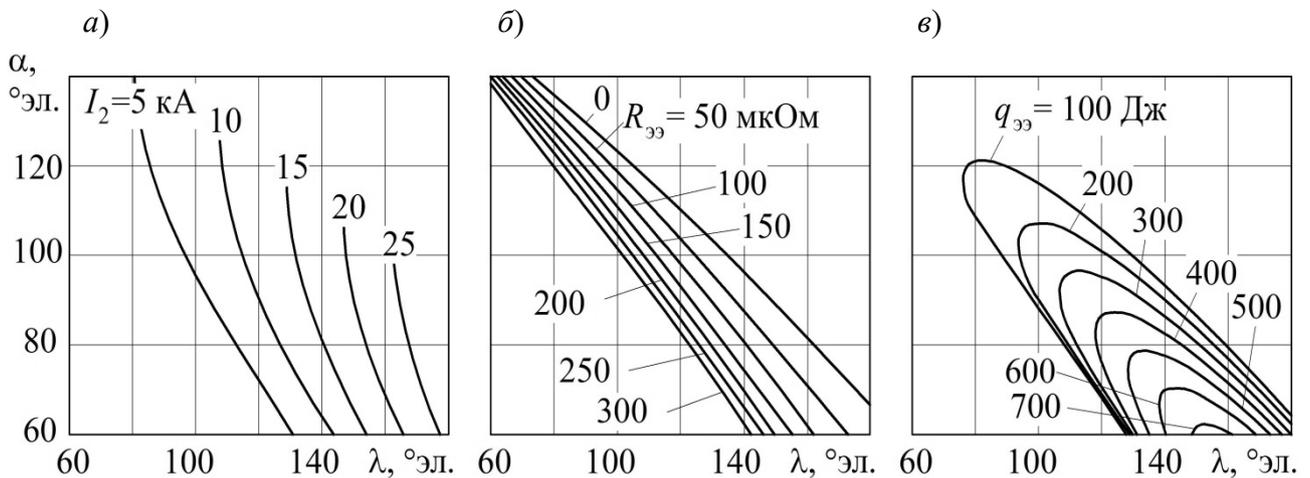


Рис. 6. Определение энергетических характеристик тока  $I_2$  (а), сопротивления  $R_{ээ}$  (б) и энерговыделения  $q_{ээ}$  (в) по параметрам фазового регулирования для машины МР-8010 ( $K_T = 78$ )

Предложенные расчетные методики использованы в системе адаптивного управления контактной сваркой на базе регулятора PST.6250.100L (BOSCH REXROTH). Проведена апробация на машине МСМ 503.618.421 при сварке усилителя внутренней панели задней правой двери в сборе 1118-6201180 (для толщины 1,5 + 1,5 мм) и машине МСМ 503.651.421 при сварке наружной

панели задней левой двери в сборе 1118-6201013 (для толщины 0,8 + 0,8 мм) [11]. Установлено, что стабильное качество в условиях интенсивного износа электродов, колебания напряжения сети и сжимающего усилия на электродах обеспечивается до 2000 сварок. В то же время сварка с применяющейся ранее стабилизацией тока приводит к непроварам уже после выполнения 500 сварок (рис. 7).

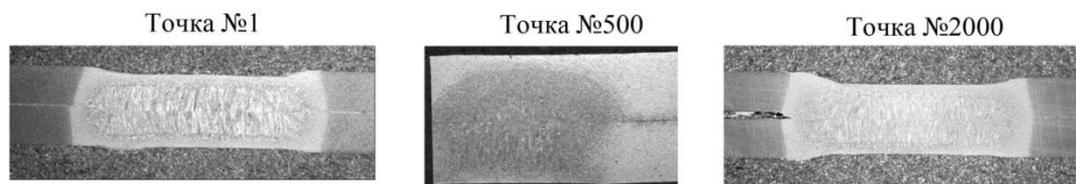


Рис. 7. Макроструктура соединения для толщины 1,5 + 1,5 мм при отсутствии возмущений (а); после выполнения 500 точек при стабилизации тока (б); после выполнения 2000 точек по предложенному алгоритму управления (в)

Таким образом, контактная сварка на переменном токе промышленной частоты имеет значительные резервы для повышения эффективности. Предложенные методики позволяют оперативно оценивать состояние питающей сети, износ длительно эксплуатируемых контактных машин, рассчитывать энергетические характеристики (ток, сопротивление «электрод – электрод» и энерговыделение), эффективно управлять сваркой в условиях возмущений.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукин, М. А. Научно-технический уровень сварочного производства в современной России / М. А. Лукин // Сварочное производство. – 2015. – № 12. – С. 31–36.
2. Lee, S. Statistical Analysis of Korean Welding Industry (VI) / S. Lee, C. Kim // Journal of Welding and Joining. – 2019. – № 2. – P. 66–69.
3. Ощепков, Ф. Н. Современный рынок сварочного оборудования: проблемы и перспективы / Ф. Н. Ощепков // Сварка и диагностика. – 2013. – № 5. – С. 62–63.
4. Лукин, М. А. Научно-технический уровень сварочного производства в современной России / М. А. Лукин // Сварочное производство. – 2015. – № 12. – С. 31–36.
5. Климов, А. С. Влияние параметров сети на точность управления и диагностики контактной сварки / А. С. Климов, А. К. Кудинов, В. С. Климов // Вестн. машиностроения. – 2021. – № 6. – С. 46–52.
6. Способ измерения сварочного тока: пат. РФ 2424096 / А. С. Климов, А. К. Кудинов, В. С. Климов, А. Н. Анциборов // Бюл. № 20. Кл. В23К11/24. – 2011.
7. Способ измерения тока при контактной сварке / А. С. Климов [и др.] // Сварочное производство. – 2012. – № 10. – С. 46–49.
8. Контроль состояния вторичных контуров контактных машин в условиях массового производства / А. Н. Анциборов [и др.] // Сварочное производство. – 2019. – № 6. – С. 20–25.
9. Способы измерения активного и реактивного сопротивлений сварочного контура контактных машин / А. Н. Анциборов [и др.] // Вестн. машиностроения. – 2019. – № 3. – С. 71–76.
10. Продолжительность включенного состояния тиристорov как параметр обратной связи в системах автоматического управления контактной точечной сваркой / А. С. Климов [и др.] // Сварочное производство. – 2009. – № 2. – С. 17–22.
11. Идентификация технологического процесса контактной сварки как объекта управления в условиях массового производства узлов кузова автомобиля / Э. А. Гладков [и др.] // Сварка и Диагностика. – 2020. – № 6. – С. 31–36.