

Влияние параметров питающей сети на стабильность фазового регулирования при контактной сварке

© 2023

Климов Алексей Сергеевич^{*1}, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»
Кудинов Андрей Константинович², старший преподаватель кафедры «Промышленная электроника»
Климов Виталий Сергеевич³, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Прикладная математика и информатика»
Ельцов Валерий Валентинович, доктор технических наук,
профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»
Болдырев Денис Алексеевич⁴, доктор технических наук,
профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

*E-mail: KlimovTGU@yandex.ru,
klimov@tltsu.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8679-0882>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3026-2554>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1467-3543>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6951-5825>

Поступила в редакцию 30.05.2023

Принята к публикации 09.06.2023

Аннотация: Контактная сварка в условиях массового производства выполняется при значительном количестве возмущений, совокупное действие которых может превышать возможности современной аппаратуры управления. Большинство систем управления контактной сваркой, применяемых в промышленности для компенсации действующих возмущений, предусматривает фазовое регулирование сварочного тока в зависимости от измеренных параметров, характеризующих процесс формирования сварного соединения. Эффективность работы таких регуляторов в значительной мере определяется точностью измерения и задания параметров фазового регулирования, к которым относят углы открытия и проводимости сварочных тиристорov. В работе показано, что при включении контактной машины происходит фазовый сдвиг напряжения сети в режиме нагрузки относительно напряжения сети в режиме холостого хода. С использованием упрощенной электрической схемы замещения контактной сварочной машины в работе описана природа фазового сдвига напряжения сети. В качестве паразитных параметров сети выделены активное сопротивление и индуктивность сети. Моделирование электрических процессов в контактной машине выполнено согласно трехконтурной схеме замещения. Показано влияние паразитных параметров сети на стабильность фазового регулирования, особенности получаемых осциллограмм тока и напряжения. В зависимости от параметров сети и контактной сварочной машины, величина фазового сдвига составляет от долей до единиц электрического градуса. При параметрической стабилизации сварочного тока по напряжению сети влиянием паразитных параметров сети можно пренебречь. При работе регулятора в режиме поддержания численного значения вторичного тока наблюдается уменьшение создаваемого тока относительно заданного. Предложена и апробирована методика определения паразитных параметров питающей сети по результатам опыта короткого замыкания.

Ключевые слова: параметры питающей сети; фазовое регулирование при контактной сварке; контактная сварка; управление контактной сваркой в условиях возмущений; диагностика контактной сварки; моделирование электрических процессов; фазовое управление; измерение и регулирование сварочного тока.

Для цитирования: Климов А.С., Кудинов А.К., Климов В.С., Ельцов В.В., Болдырев Д.А. Влияние параметров питающей сети на стабильность фазового регулирования при контактной сварке // *Frontier Materials & Technologies*. 2023. № 3. С. 53–60. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-3-65-5.

ВВЕДЕНИЕ

Лидирующее положение контактной сварки при изготовлении листовых деталей в массовом производстве объясняется высокими технико-экономическими показателями, а также значительным объемом накопленного положительного опыта в области применения и расширения технологических возможностей этого способа. Ежегодно в мире в эксплуатацию вводится порядка 100 тыс. машин для контактной сварки на общую сумму около 1,5 млрд долларов США, что составляет 30 % объема рынка сварочного оборудования. Растущие потре-

ности мировой промышленности позволяют прогнозировать увеличение объемов продаж оборудования для контактной сварки до 2 млрд долларов США к 2025 году [1; 2]. В Российской Федерации 40 % оборудования для контактной сварки имеет срок службы более 20 лет, обновление парка сварочных машин затруднено повышением закупочной цены на оборудование и комплектующие, недостаточным финансированием научно-исследовательских разработок в области сварки [3; 4].

В сложившихся экономических условиях задача повышения качества сварочных работ и расширения технологических возможностей должна решаться за счет

кратного повышения эффективности использования уже имеющегося на предприятии оборудования без существенных затрат на его замену и глубокую модернизацию. При этом существенная роль отводится системам управления и методикам оперативной диагностики состояния сварочного оборудования [5; 6].

Принятая большинством производителей аппаратуры концепция управления процессом сварки рассматривает регулятор контактной сварки как самостоятельное изделие, реализующее заранее заложенный в него управляющий алгоритм [7]. Существенное повышение качества соединений достигнуто благодаря стабилизации и коррекции режимов сварки, реализуемых современными аппаратными средствами. В данной области ведут свои разработки известные производители оборудования для контактной сварки: ЗАО «Электрик-МИКС» (Россия), «Селма» (Россия), Bosch Rexroth (Германия), ENTRON Controls (США), Welding Technology Corporation (США), Spotron (Япония), Dengensha (Япония), Тесна (Италия). Эксплуатация машин для контактной сварки в условиях массового производства характеризуется целым набором возмущений (интенсивный износ сварочных электродов, привода сжатия, токоведущих элементов, нестабильность питающей сети), совокупное действие которых не может быть компенсировано современными системами управления [8–10]. Решение проблемы повышения стабильности качества контактной сварки при различных возмущениях может быть достигнуто путем комплексного решения задач оперативной диагностики состояния сварочного оборудования и питающей сети, моделирования электрических процессов в системе «машина – деталь», поиска параметров обратной связи, синтеза алгоритмов диагностики и управления [11–13].

В системах фазового регулирования со стабилизацией действующего тока на основе отрицательной обратной связи уменьшение ошибки относительно заданного значения достигается введением интегрирующей составляющей в закон регулирования. При этом обеспечивается эффективная компенсация колебаний действующего напряжения сети относительно номинального [14; 15]. Низкое качество питающих сетей и их загруженность другими потребителями искажает форму сигнала сетевого напряжения. При этом возникает погрешность измерения и задания временных параметров питающего напряжения и тока, что снижает эффективность фазового регулирования и нарушает нормальную работу регуляторов контактной сварки. Вопрос диагностики и управления контактной сваркой с учетом искажения формы сетевого напряжения в научной литературе не освещен.

Цель исследования – повышение достоверности диагностики и эффективности систем управления контактной сваркой в условиях колебания сетевого напряжения путем моделирования электрических процессов в системе «машина – деталь» и разработки методик диагностики состояния питающих сетей.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предварительный расчет электрических параметров контактной сварки и построение осциллограмм тока и напряжения выполнены с применением упрощенной

схемы замещения, представленной на рис. 1 а. В схему включены последовательно соединенные активные сопротивления первичной обмотки сварочного трансформатора $R_{1т}$, вторичного контура R_2 и нагрузки $R_{эз}$, а также индуктивности вторичного контура L_2 и первичной обмотки трансформатора $L_{1т}$. Работа тиристорного контактора моделируется положением ключа K . Питающая сеть моделируется идеальным источником напряжения $E(t)$ синусоидальной формы и включенными последовательно с ним паразитным сопротивлением R_c и индуктивностью L_c сети. На клеммах «1» и «2» снимается опорное напряжение U_c , равное $U_{c,xx}$ на холостом ходу и $U_{c,св}$ в режиме сварки. При работе машины в режиме холостого хода наблюдается отклонение напряжения сети $U_{c,xx}$ относительно номинального напряжения сети $U_{c,н}$, что объясняется загруженностью сети другими потребителями электрической энергии. При работе машины в режиме сварки наблюдается скачкообразное уменьшение напряжения сети $U_{c,св}$ относительно напряжения на холостом ходу $U_{c,xx}$, которое проявляется не только в снижении подаваемого на контактор напряжения, но и в отставании по фазе напряжения $U_{c,св}$ относительно напряжения $U_{c,xx}$, что показано на рис. 1 б.

Расчетное определение паразитных параметров питающей сети (активное сопротивление R_c и индуктивность L_c) предложено проводить по результатам опыта короткого замыкания в режиме полнофазного включения сварочной машины. На осциллограмме токов и напряжений можно выделить три характерные области, представленные на рис. 2. Первая – до коммутации тиристорного контактора, на котором выполняется измерение действующего напряжения сети в режиме холостого хода $U_{c,xx}$. Вторая – после коммутации тиристорного контактора, на которой происходят переходные процессы. Эта область длится 2...3 полупериода сетевого напряжения. В момент коммутации t_k тиристорного контактора измеряют провал напряжения ΔU и скорость нарастания первичного тока dI_1/dt . Третья область характеризуется синусоидальной формой напряжения и тока, на ней измеряют действующее напряжение сети под нагрузкой $U_{c,св}$, первичный ток I_1 и угол φ_1 отставания тока от напряжения. Следует отметить, что режим короткого замыкания характеризуется наибольшим фазовым сдвигом $t_{\varphi 1}$, что позволяет повысить точность расчетного определения паразитных параметров сети. Точность повышается и при увеличении первичного тока I_1 , поэтому для проведения измерений принята максимальная ступень сварочного трансформатора. Максимальное подавление переходных процессов при включении тиристорного контактора обеспечивается при коммутации в момент достижения максимума напряжения $U_{c,xx}$, поэтому первое включение тиристора выполняли при угле открытия $\alpha=90^\circ$ эл.

Поскольку в момент коммутации ток I_1 равен нулю, наблюдаемый провал напряжения ΔU полностью обусловлен падением напряжения на паразитной индуктивности сети L_c и может быть рассчитан согласно (1) по скорости нарастания первичного тока dI_1/dt :

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

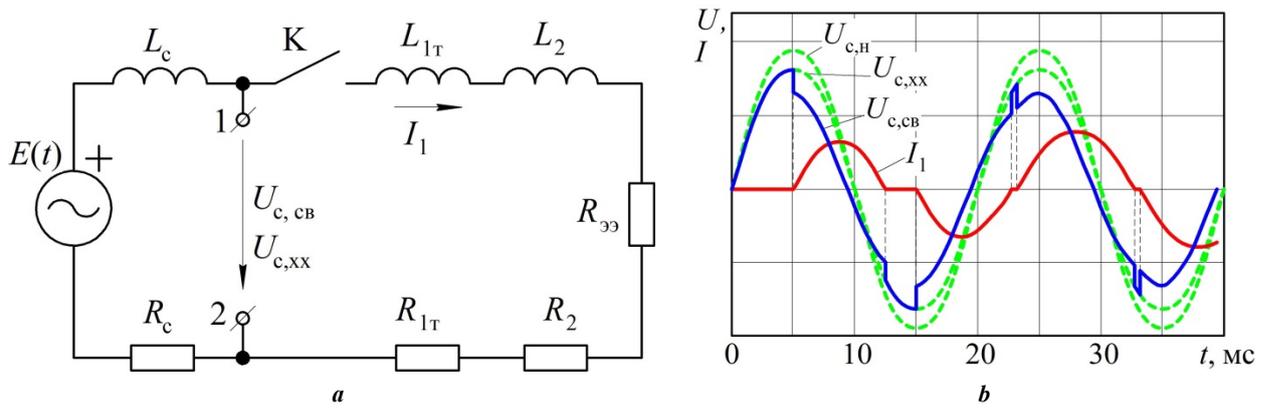


Рис. 1. Упрощенная схема замещения контактной машины при подключении к неидеальной сети (а) и осциллограммы тока и напряжения (б).

$E(t)$ – идеальный источник напряжения синусоидальной формы;
 R_c и L_c – активное сопротивление и индуктивность питающей сети;
 R_{1m} и L_{1m} – активное сопротивление и индуктивность первичной обмотки трансформатора;
 R_2 и L_2 – активное сопротивление и индуктивность вторичного контура;
 $R_{ээ}$ – активное сопротивление нагрузки (свариваемых деталей);
 $U_{c,н}$, $U_{c,хх}$ и $U_{c,св}$ – напряжение сети номинальное, в режиме холостого хода и в режиме нагрузки;
 I_1 – ток в первичном контуре контактной машины

Fig. 1. A simplified electric equivalent circuit of the contact welding machine when connecting to a non-ideal circuit (a) and oscillograms of the current and voltage (b).

$E(t)$ – ideal sinusoidal voltage source;
 R_c and L_c – active resistance and inductance of the supply mains;
 R_{1m} and L_{1m} – active resistance and inductance of the transformer primary winding;
 R_2 and L_2 – active resistance and inductance of the secondary circuit;
 $R_{ээ}$ – active load resistance (of welded parts);
 $U_{c,н}$, $U_{c,хх}$ and $U_{c,св}$ – mains voltage is nominal, idle, and under the load conditions;
 I_1 – the current in the primary circuit of the contact welding machine

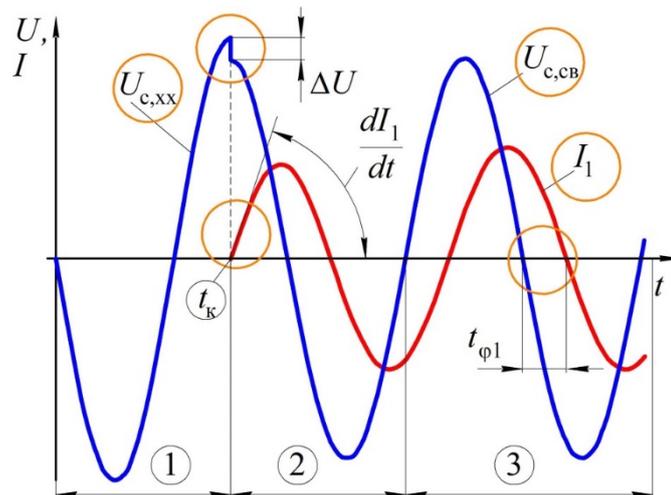


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения при полнофазном включении.
 $U_{c,хх}$ и $U_{c,св}$ – напряжение сети в режиме холостого хода и в режиме нагрузки;
 I_1 – ток в первичном контуре контактной сварочной машины;
 ΔU – провал напряжения; t_k – момент коммутации тиристорного контактора;
 dI_1/dt – скорость нарастания первичного тока; $t_{\phi 1}$ – фазовый сдвиг

Fig. 2. Current and voltage oscillograms at full-phase switching-on.

$U_{c,хх}$ and $U_{c,св}$ – mains voltage in idle mode and in load mode;
 I_1 – the current in the primary circuit of the contact welding machine;
 ΔU – power failure; t_k – commutation moment of the thyristor contactor;
 dI_1/dt – primary current growth rate; $t_{\phi 1}$ – phase shift

Активное сопротивление R_c вычисляется согласно (2) с учетом частоты питающей сети f_c :

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

Измерение паразитных параметров питающей сети выполняли в лаборатории контактной сварки Тольяттинского государственного университета с использованием контактной сварочной машины МТ-4019, регистратора сварочных процессов РКДП-0401 и регулятора сварки РМС-24. Включение тиристорного контактора выполняли на 8-й ступени трансформатора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Измеренное напряжение сети на холостом ходу составило $U_{c,xx}=380$ В. В момент коммутации тиристорного контактора величина провала напряжения составила $\Delta U=39$ В. Скорость нарастания первичного тока $dI_1/dt=148$ кА/с, измеренное напряжение сети в режиме нагрузки $U_{c,cb}=343$ В, первичный ток полнофазного включения в режиме нагрузки $I_1=258$ А. Угол отставания первичного тока от напряжения составил $\varphi_1=61^\circ$ эл. При расчетах согласно (1) и (2) получены значения паразитных параметров питающей сети $R_c=0,14$ Ом, $L_c=0,26$ мГн.

Моделирование электрических процессов в сварочном оборудовании с учетом паразитных параметров сети R_c и L_c выполнено с применением Т-образной схемы замещения и приведением параметров к первичной обмотке трансформатора [16]. Питающая сеть моделируется идеальным источником напряжения E синусоидальной формы. Включенное состояние тиристорного контактора моделируется перемычкой, расчетная схема замещения в этом случае представлена на рис. 3 а. Выключенное состояние тиристорного контактора моделируется разрывом электрической цепи, расчетная схема замещения в этом случае представлена на рис. 3 б. В схеме дополнительно учтены параметры сердечника трансформатора R_0 и L_0 . Математическое описание электрических процессов выполнено с применением метода переменных состояния, в качестве которых выбраны токи индуктивности $L_{1T}+L_c$ (ток I_1), индуктивности L_2 (ток I_2) и индуктивности L_0 (ток I_0). Получены системы дифференциальных уравнений первого порядка для включенного (3) и выключенного (4) состояний тиристорного контактора:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_0 + R_c + R_{1T}}{L_c + L_{1T}} & \frac{R_0}{L_c + L_{1T}} & \frac{R_0}{L_c + L_{1T}} \\ \frac{R_0}{L_2} & -\frac{R_0 + R_2 + R_{\Sigma}}{L_2} & -\frac{R_0}{L_2} \\ \frac{R_0}{L_0(I_0)} & -\frac{R_0}{L_0(I_0)} & -\frac{R_0}{L_0(I_0)} \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} E(t); \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_0 + R_2 + R_{\Sigma}}{L_2} & -\frac{R_0}{L_2} \\ 0 & -\frac{R_0}{L_0(I_0)} & -\frac{R_0}{L_0(I_0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

С использованием (3) и (4) был рассчитан переходный процесс при включении машины МТ-4019 при угле открытия тиристорov $\alpha=60^\circ$ эл. для ранее найденных паразитных параметров сети $R_c=0,14$ Ом, $L_c=0,26$ мГн. Расчетные кривые тока и напряжения, представленные на рис. 4, имеют характерные провалы в момент коммутации тиристорного контактора, форма и величина которых соответствует осциллограммам, полученным при помощи регистратора РКД-0401. Из рис. 4 также видно, что точка перехода через ноль сетевого напряжения в режиме холостого хода $U_{c,xx}$ не совпадает с точкой перехода через ноль сетевого напряжения в режиме сварки $U_{c,cb}$, при этом фактический угол открытия тиристорov α отличается от задаваемого $\alpha_{зад}$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из анализа результатов натуральных экспериментов и математического моделирования следует, что в условиях работы массового производства несовершенство питающей сети приводит к нарушению нормального протекания фазового регулирования при контактной сварке. Корректное задание угла открытия тиристорov α , отсчитываемого от точки перехода через ноль сетевого напряжения $U_{c,xx}$ холостого хода, возможно только в первом полупериоде сварочного тока. На последующих полупериодах сигнал $U_{c,xx}$ напряжения холостого хода отсутствует. Вместо него присутствует сдвинутый по фазе сигнал напряжения $U_{c,cb}$ в режиме сварки. В условиях неидеальности питающей сети фактический угол открытия тиристорov α отличается от задаваемого регулятором значения $\alpha_{зад}$ на величину поправки $\Delta\alpha$:

$$\alpha = \alpha_{зад} - \Delta\alpha. \quad (5)$$

Величина поправки рассчитывается согласно (3)–(5) для определенных заранее паразитных параметров питающей сети и может быть представлена семейством кривых в зависимости от фактического угла открытия тиристорov α , коэффициента мощности $\cos\varphi$ и загрузки машины по мощности Q , как показано на рис. 5. В зависимости от параметров режима сварки и фазового регулирования поправка $\Delta\alpha$ составляет от десятых долей до единиц электрического градуса. Она растет при уменьшении коэффициента мощности ($\cos\varphi$) и глубины фазового регулирования (угол α), увеличении загрузки Q сварочной машины по мощности.

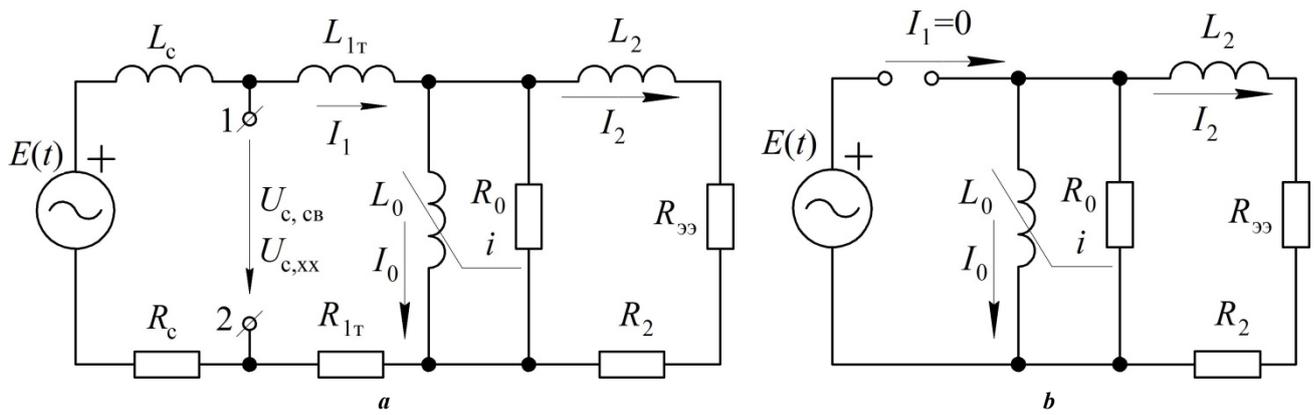


Рис. 3. Расчетная схема замещения контактной сварочной машины при включенном (а) и выключенном (б) тиристорном контакторе

Fig. 3. Calculated equivalent circuit of the contact welding machine with on (a) and off (b) thyristor contactor

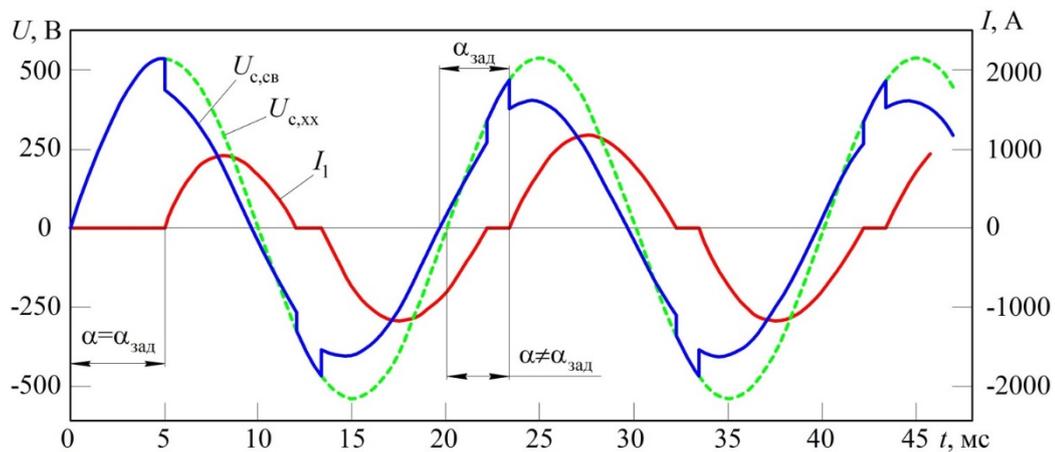


Рис. 4. Расчетные кривые напряжения и тока, построенные с учетом паразитных параметров питающей сети

Fig. 4. Calculated voltage and current curves built taking into account the supply mains parasitic parameters

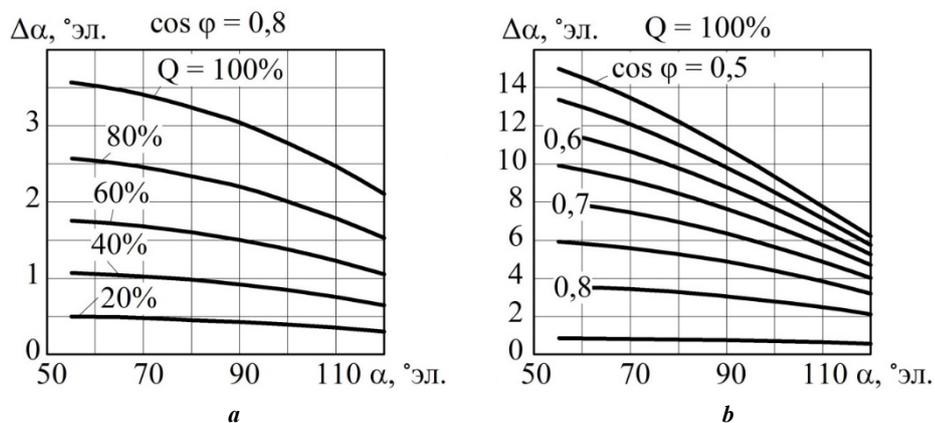


Рис. 5. Зависимость поправки $\Delta\alpha$ от угла регулирования α при различной нагрузке по мощности Q для $\cos\varphi=0,8$ (а) и при 100 % нагрузке сварочной машины (б)

Fig. 5. The dependence of the allowance $\Delta\alpha$ on the control angle α at different loads by power Q for $\cos\varphi=0.8$ (a) and at 100 % load of the welding machine (b)

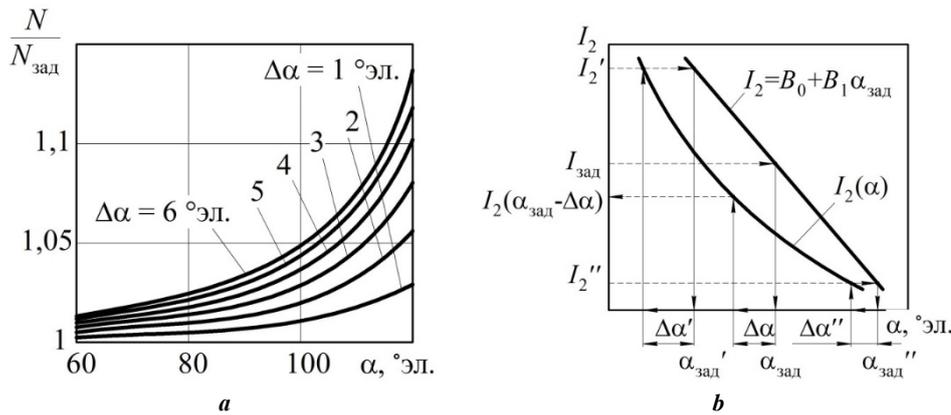


Рис. 6. Отношение действительного уровня нагрева N к заданному уровню нагрева $N_{зад}$ при параметрической стабилизации (а);

погрешность задания тока при количественной стабилизации сварочного тока (б)

Fig. 6. The ratio of the actual heating level N to the set heating level $N_{зад}$ with parametric stabilization at the parametric stabilization (а);
current setting error at the quantitative stabilization of welding current (б)

При использовании регуляторов сварки, реализующих параметрическую стабилизацию сварочного тока напряжению сети (РКМ-803 и РКМ-804 в режиме параметрической стабилизации, РВИ-801), влиянием паразитных параметров сети на качество сварки можно пренебречь. Так, для алгоритма параметрической стабилизации [17], реализованного в регуляторе РКМ-803 и РКМ-804, фактический уровень нагрева N (отношение действующего тока к полнофазному) отличается от задаваемого уровня нагрева $N_{зад}$ незначительно, причем в большую сторону, что показано на рис. 6 а. Из этого можно сделать вывод, что фазовый сдвиг наблюдаемого напряжения $U_{с,св}$ относительно напряжения холостого хода $U_{с,хх}$ не нарушает фазового регулирования при реализации алгоритмов параметрической стабилизации.

Количественное задание и поддержание величины сварочного тока, реализуемое в большинстве современных регуляторов контактной сварки, в условиях фазового сдвига напряжения сварки $U_{с,св}$ относительно напряжения холостого хода $U_{с,хх}$ может проходить с существенными нарушениями. При работе регулятора в режиме поддержания численного значения сварочного тока развиваемый ток I_2 равен заданному току $I_{зад}$ только в двух ключевых точках $\alpha_{зад}'$ и $\alpha_{зад}''$, которые были использованы при построении регулировочной характеристики. Для промежуточных значений угла открытия тиристоров $\alpha_{зад}$ развиваемый ток $I_2(\alpha_{зад}-\Delta\alpha)$, который соответствует фактическому углу открытия тиристоров согласно (5), оказывается меньше задаваемого тока $I_{зад}$. Возникающая погрешность продемонстрирована на рис. 6 б. Так, для стационарных машин МТ-3003 и МТ-1933 отклонение развиваемого и задаваемого токов при сварке образцов из стали 08Ю толщиной (1,5+1,5) мм составило соответственно 1,5 и 0,5 кА. Для диагностики контактной сварки и прогнозирования качества соединений выполняется оценка временных интервалов работы тиристорного контактора с вычислением коэффициента мощности $\cos\varphi$ [18–20]. Погрешность задания угла открытия тиристоров $\Delta\alpha$, составляющая от долей до единиц электрического градуса, нарушает нормаль-

ную работу алгоритмов управления и диагностики. Так, при $\Delta\alpha=1^\circ$ эл. фактическое значение $\cos\varphi$ оказывается больше рассчитанного на 1...10 %, а при $\Delta\alpha=3^\circ$ эл. погрешность может достигать 20 %. Уменьшение глубины фазового регулирования и повышение значения коэффициента мощности $\cos\varphi$ за счет оптимизации параметров режима сварки и конструкции вторичного контура контактной машины позволяет существенно снизить влияние $\Delta\alpha$ на точность управления и диагностики контактной сварки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При фазовом сдвиге напряжения сети в режиме нагрузки относительно напряжения сети в режиме холостого хода возникает погрешность задания угла открытия тиристоров, достигающая нескольких электрических градусов.

Показано, что при параметрическом управлении током по напряжению сети влиянием паразитных параметров сети можно пренебречь. При численном поддержании вторичного тока развиваемый ток оказывается меньше задаваемого вследствие возникновения погрешности задания угла α открытия тиристоров.

Предложена методика расчетного определения паразитных параметров питающей сети по результатам опыта короткого замыкания в режиме полнофазного включения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ertas A.H., Akbulut M. Experimental Study on Fatigue Performance of Resistance Spot-Welded Sheet Metals // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 114. P. 1205–1218. DOI: [10.1007/s00170-021-06822-z](https://doi.org/10.1007/s00170-021-06822-z).
2. Kang M., Choi W.H., Kim C. Statistical Analysis of Korean Welding Industry // Journal of Welding and Joining. 2023. Vol. 41. № 2. P. 107–111. DOI: [10.5781/JWJ.2023.41.2.4](https://doi.org/10.5781/JWJ.2023.41.2.4).

3. Ощепков Ф.Н. Современный рынок сварочного оборудования: проблемы и перспективы // Сварка и диагностика. 2013. № 5. С. 62–63. EDN: [RDYYHT](#).
4. Лукин М.А. Научно-технический уровень сварочного производства в современной России // Сварочное производство. 2015. № 12. С. 31–36. EDN: [VKSMWL](#).
5. Zhou B., Pychynski T., Reischl M., Kharlamov E. Machine Learning with Domain Knowledge for Predictive Quality Monitoring in Resistance Spot Welding // Journal of Intelligent Manufacturing. 2022. Vol. 33. № 4. P. 1139–1163. DOI: [10.1007/s10845-021-01892-y](#).
6. Cho Y., Rhee S. Experimental study of nugget formation in resistance spot welding // Welding Journal. 2003. Vol. 82. № 8. P. 195–201.
7. Гладков Э.А., Климов А.С., Анциборов А.Н. Опыт применения регуляторов контактной сварки в массовом производстве // Сварка и диагностика. 2021. № 1. С. 47–53. DOI: [10.52177/2071-5234_2021_01_47](#).
8. Wei D., Li D., Tang D., Jiang Q. Deep Learning Assisted Vision Inspection of Resistance Spot Welds // Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 62. № 8. P. 262–274. DOI: [10.1016/j.jmapro.2020.12.015](#).
9. Klimov A.S., Kudinov A.K., Klimov V.S. Influence of Grid Parameters on Control and Diagnostics in Resistance Spot Welding // Russian Engineering Research. 2021. № 9. P. 813–819. DOI: [10.3103/S1068798X2109015X](#).
10. Dong J., Hu J., Luo Z. Quality Monitoring of Resistance Spot Welding Based on a Digital Twin // Metals. 2023. Vol. 13. № 4. Article number 697. DOI: [10.3390/met13040697](#).
11. Martin O., Ahedo V., Santos J.I., Galan J.M. Comparative Study of Classification Algorithms for Quality Assessment of Resistance Spot Welding Joints From Pre- and Post-Welding Inputs // IEEE Access. 2022. № 10. P. 6518–6527. DOI: [10.21203/rs.3.rs-645372/v2](#).
12. Zhao D., Wang Y., Zhang P., Liang D. Modeling and Experimental Research on Resistance Spot Welded Joints for Dual-Phase Steel // Materials. 2019. Vol. 12. № 7. Article number 1108. DOI: [10.3390/ma12071108](#).
13. Xia Y.J., Shen Y., Zhou L., Li Y.B. Expulsion intensity monitoring and modeling in resistance spot welding based on electrode displacement signals // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2020. Vol. 143. № 3. P. 1–26. DOI: [10.1115/1.4048441](#).
14. Yang W.R., Wang C.S. Current Measurement of Resistance Spot Welding Using DSP // Tamkang Journal of Science and Engineering. 2011. Vol. 14. № 1. P. 33–38.
15. Matsushita M., Ikeda R., Oi K. Development of a new program control setting of welding current and electrode force for single-side resistance spot welding // Welding in the World. 2015. Vol. 59. P. 533–543. DOI: [10.1007/s40194-015-0228-1](#).
16. Klimov A.S., Kudinov A.K., Komirenko A.V., Antsiborov A.N. A method for measuring current in resistance welding // Welding International. 2013. Vol. 27. P. 830–833. DOI: [10.1080/09507116.2013.796636](#).
17. Klimov A.S., Antsiborov A.N., Klimov V.S., Kudinov A.K. Current regulation in contact welding // Russian Engineering Research. 2019. Vol. 39. P. 766–771. DOI: [10.3103/S1068798X19090119](#).
18. Zhou M., Zhang H., Hu S.J. Relationships between Quality and Attributes of Spot Welds // Welding Journal. 2003. Vol. 82. № 4. P. 72S–77S.
19. Martin O., De Tiedra P. Advances in the Control and Improvement of Quality in the Resistance Spot Welding Process // Metals. 2022. Vol. 12. № 11. Article number 1810. DOI: [10.3390/met12111810](#).
20. Ziyad K., Manohar D. Adaptive control of resistance spot welding based on a dynamic resistance model // Mathematical and Computation Applications. 2019. Vol. 24. № 4. Article number 86. DOI: [10.3390/mca24040086](#).

REFERENCES

1. Ertas A.H., Akbulut M. Experimental Study on Fatigue Performance of Resistance Spot-Welded Sheet Metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 114, pp. 1205–1218. DOI: [10.1007/s00170-021-06822-z](#).
2. Kang M., Choi W.H., Kim C. Statistical Analysis of Korean Welding Industry. *Journal of Welding and Joining*, 2023, vol. 41, no. 2, pp. 107–111. DOI: [10.5781/JWJ.2023.41.2.4](#).
3. Oshchepkov F.N. Contemporary market of welding equipment: problems and prospects. *Svarka i diagnostika*, 2013, no. 5, pp. 62–63. EDN: [RDYYHT](#).
4. Lukin M.A. Scientific and technical level of welding production in modern Russia. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2015, no. 12, pp. 31–36. EDN: [VKSMWL](#).
5. Zhou B., Pychynski T., Reischl M., Kharlamov E. Machine Learning with Domain Knowledge for Predictive Quality Monitoring in Resistance Spot Welding. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2022, vol. 33, no. 4, pp. 1139–1163. DOI: [10.1007/s10845-021-01892-y](#).
6. Cho Y., Rhee S. Experimental study of nugget formation in resistance spot welding. *Welding Journal*, 2003, vol. 82, no. 8, pp. 195–201.
7. Gladkov E.A., Klimov A.S., Antsiborov A.N. Experience of contact welding regulators in mass production. *Svarka i diagnostika*, 2021, no. 1, pp. 47–53. DOI: [10.52177/2071-5234_2021_01_47](#).
8. Wei D., Li D., Tang D., Jiang Q. Deep Learning Assisted Vision Inspection of Resistance Spot Welds. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 62, no. 8, pp. 262–274. DOI: [10.1016/j.jmapro.2020.12.015](#).
9. Klimov A.S., Kudinov A.K., Klimov V.S. Influence of Grid Parameters on Control and Diagnostics in Resistance Spot Welding. *Russian Engineering Research*, 2021, no. 9, pp. 813–819. DOI: [10.3103/S1068798X2109015X](#).
10. Dong J., Hu J., Luo Z. Quality Monitoring of Resistance Spot Welding Based on a Digital Twin. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 4, article number 697. DOI: [10.3390/met13040697](#).
11. Martin O., Ahedo V., Santos J.I., Galan J.M. Comparative Study of Classification Algorithms for Quality Assessment of Resistance Spot Welding Joints From Pre- and Post-Welding Inputs. *IEEE Access*, 2022, no. 10, pp. 6518–6527. DOI: [10.21203/rs.3.rs-645372/v2](#).
12. Zhao D., Wang Y., Zhang P., Liang D. Modeling and Experimental Research on Resistance Spot Welded

- Joints for Dual-Phase Steel. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 7, article number 1108. DOI: [10.3390/ma12071108](https://doi.org/10.3390/ma12071108).
13. Xia Y.J., Shen Y., Zhou L., Li Y.B. Expulsion intensity monitoring and modeling in resistance spot welding based on electrode displacement signals. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2020, vol. 143, no. 3, pp. 1–26. DOI: [10.1115/1.4048441](https://doi.org/10.1115/1.4048441).
 14. Yang W.R., Wang C.S. Current Measurement of Resistance Spot Welding Using DSP. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 2011, vol. 14, no. 1, pp. 33–38.
 15. Matsushita M., Ikeda R., Oi K. Development of a new program control setting of welding current and electrode force for single-side resistance spot welding. *Welding in the World*, 2015, vol. 59, pp. 533–543. DOI: [10.1007/s40194-015-0228-1](https://doi.org/10.1007/s40194-015-0228-1).
 16. Klimov A.S., Kudinov A.K., Komirenko A.V., Antsiborov A.N. A method for measuring current in resistance welding. *Welding International*, 2013, vol. 27, pp. 830–833. DOI: [10.1080/09507116.2013.796636](https://doi.org/10.1080/09507116.2013.796636).
 17. Klimov A.S., Antsiborov A.N., Klimov V.S., Kudinov A.K. Current regulation in contact welding. *Russian Engineering Research*, 2019, vol. 39, pp. 766–771. DOI: [10.3103/S1068798X19090119](https://doi.org/10.3103/S1068798X19090119).
 18. Zhou M., Zhang H., Hu S.J. Relationships between Quality and Attributes of Spot Welds. *Welding Journal*, 2003, vol. 82, no. 4, pp. 72S–77S.
 19. Martin O., De Tiedra P. Advances in the Control and Improvement of Quality in the Resistance Spot Welding Process. *Metals*, 2022, vol. 12, no. 11, article number 1810. DOI: [10.3390/met12111810](https://doi.org/10.3390/met12111810).
 20. Ziyad K., Manohar D. Adaptive control of resistance spot welding based on a dynamic resistance model. *Mathematical and Computation Applications*, 2019, vol. 24, no. 4, article number 86. DOI: [10.3390/mca24040086](https://doi.org/10.3390/mca24040086).

The influence of the supply mains parameters on the stability of phase control during resistance welding

© 2023

Aleksey S. Klimov^{*1}, PhD (Engineering),

assistant professor of Chair “Welding, Pressure Material Treatment, and Allied Processes”

*Andrey K. Kudinov*², senior lecturer of Chair “Industrial Electronics”

*Vitaly S. Klimov*³, PhD (Engineering),

assistant professor of Chair “Applied Mathematics and Informatics”

Valery V. Eltsov, Doctor of Sciences (Engineering),

professor of Chair “Welding, Pressure Material Treatment, and Allied Processes”

*Denis A. Boldyrev*⁴, Doctor of Sciences (Engineering),

professor of Chair “Nanotechnologies, Materials Science, and Mechanics”

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

*E-mail: KlimovTGU@yandex.ru,
klimov@tltsu.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8679-0882>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3026-2554>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1467-3543>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6951-5825>

Received 30.05.2023

Accepted 09.06.2023

Abstract: Resistance welding in large-scale manufacturing is carried out with a significant number of disturbances, the cumulative effect of which may exceed the capabilities of modern control equipment. Most resistance welding control systems used in industry to compensate for existing disturbances provide welding current phase control depending on the measured parameters characterizing the process of welded joint formation. The efficiency of such controllers is largely determined by the accuracy of measuring and setting the phase control parameters, which include the opening and conduction angles of welding thyristors. The paper shows that when switching on a contact machine, a phase shift of the mains voltage occurs in the load mode relative to the mains voltage in the idle mode. Using a simplified electric equivalent circuit of a contact welding machine, the paper describes the nature of the phase shift of the mains voltage. Circuit active resistance and inductance are selected as parasitic parameters of the mains. The authors simulated the electrical processes in the contact machine according to the three-loop equivalent circuit. The study shows the influence of mains parasitic parameters on the phase regulation stability, the features of the obtained current and voltage oscillograms. Depending on the mains and contact welding machine parameters, the phase shift magnitude ranges from fractions to units of an electrical degree. With welding current parametric stabilization by the mains voltage, the influence of mains parasitic parameters can be neglected. When the regulator operates in the mode of maintaining the secondary current numerical value, a decrease in the generated current relative to the specified one is observed. The authors proposed and tested a technique for determining the parasitic parameters of the supply mains based on the results of a short circuit test.

Keywords: supply mains parameters; phase control during resistance welding; resistance welding; resistance welding control under disturbances; resistance welding diagnostics; simulation of electric processes; phase control; welding current measurement and control.

For citation: Klimov A.S., Kudinov A.K., Klimov V.S., Eltsov V.V., Boldyrev D.A. The influence of the supply mains parameters on the stability of phase control during resistance welding. *Frontier Materials & Technologies*, 2023, no. 3, pp. C. 53–60. DOI: [10.18323/2782-4039-2023-3-65-5](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-5).