



# ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ СВАРОЧНОГО КОНТУРА НА ПАРАМЕТРЫ ТОКА ПРИ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВЫХ ПРОЦЕССАХ СВАРКИ

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты анализа и моделирования частотных свойств сварочного контура при импульсно-дуговых процессах сварки. Рассмотрены три различных подхода к реализации этих процессов: с помощью модуляции выходного напряжения источника сварочного тока, путем вибрации горелки и за счет импульсной подачи электродной проволоки. Показано, что рабочий диапазон частот импульсов сварочного тока существенно зависит от используемого подхода.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, импульсно-дуговые процессы, плавящийся электрод, амплитудно-частотные характеристики

Благодаря существенным достижениям в области силовой полупроводниковой техники, компьютерных технологий и роботизации сварочных процессов значительно возрос интерес к импульсно-дуговой сварке плавящимся электродом, которая, как известно [1], впервые была предложена в ИЭС им. Е. О. Патона в 1964 г. Как свидетельствуют публикации [2–14], интенсивные исследования и разработка этого способа сварки ведутся главным образом в трех направлениях: создание импульсных источников, обеспечивающих широкие возможности программного управления амплитудой, длительностью и частотой импульсов сварочного тока [2, 3]; разработка способов и специальных механизмов для осуществления импульсной подачи электродной проволоки и так называемой вибрации сварочной горелки [4–10]; исследование и разработка адаптивных методов и алгоритмов автоматического управления импульсно-дуговыми сварочными процессами [11–16].

Одна из сложных технических проблем, возникающая, в частности, при разработке сварочного

оборудования, связана с тем, что с помощью программно-управляемой импульсной подачи электродной проволоки или вибрации сварочной горелки пока не удается значительно увеличить частоту импульсов сварочного тока, а следовательно, заметно повысить эффективность автоматического управления плавлением и переносом металла при импульсно-дуговой сварке.

В то же время при решении задачи повышения частоты импульсов могут возникнуть трудности, не связанные с указанными техническими проблемами, а обусловленные частотными ограничениями самого сварочного контура как динамической системы. Насколько нам известно из публикаций, этот вопрос до сих пор остается малоизученным.

В настоящей работе ставится задача исследовать влияние частотных свойств сварочного контура на параметры тока при импульсно-дуговых процессах автоматической дуговой сварки плавящимся электродом во всех рассматриваемых подходах к ее реализации.

**Математическая модель.** Следуя [10, 17, 18], запишем систему уравнений, составленную на основании упрощенной схемы сварочного контура, изображенной на рис. 1, а:

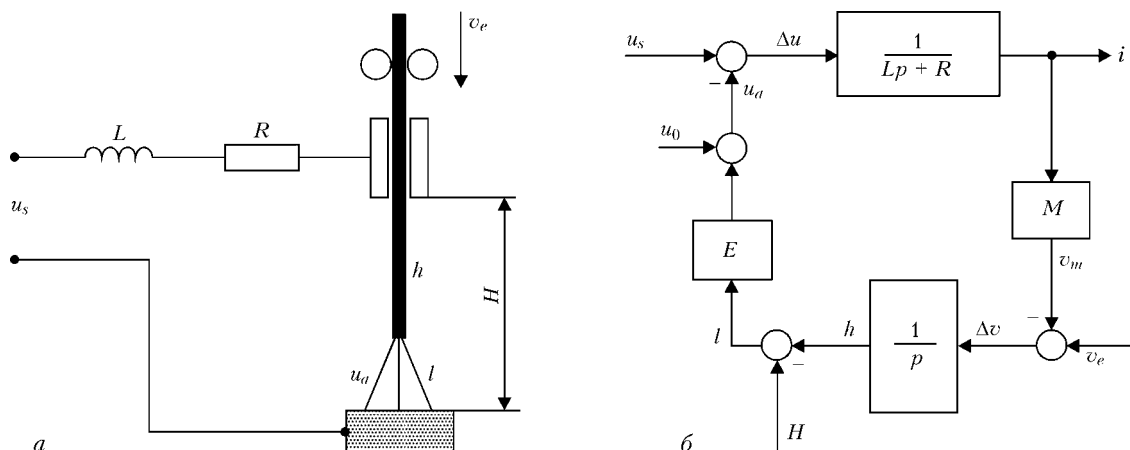


Рис. 1. Эквивалентная (а) и структурная (б) схемы сварочного контура (см. объяснения в тексте)



$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} + Ri = u_s - u_a, \\ u_a = u_0 + El, \\ l = H - h \quad (0 < l < l_{II}), \\ h = \int_0^t (v_e - v_m) dt, \quad v_m = Mi, \end{cases} \quad (1)$$

где  $L, R$  — соответственно индуктивность и эквивалентное сопротивление сварочного контура;  $u_s = u_s(t, i)$  — напряжение на выходных клеммах источника сварочного тока, зависящее от сварочного тока  $i$  и времени  $t$ ;  $u_a = u_a(i, l)$  — напряжение на дуге, являющееся функцией от  $i$  и длины дугового промежутка  $l$ ;  $u_0 = u_0(i)$  — суммарное падение напряжения в приэлектродных областях дугового промежутка;  $E$  — напряженность электрического поля в столбе дуги;  $H = H(t)$  — расстояние между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны;  $h = h(t)$  — вылет электрода;  $l_{II}$  — пороговое значение длины дуги, при котором происходит ее обрыв;  $v_e = v_e(t)$  — скорость подачи плавящегося электрода относительно токоподводящего мундштука;  $v_m = v_m(t)$  — скорость плавления электрода;  $M \equiv \partial v_m / \partial i$  — крутизна характеристики плавления электрода при номинальных значениях сварочного тока  $i_{II}$  и вылета электрода  $h_{II}$ .

В систему уравнений (1) не вошли параметры, характеризующие, в частности, перенос электродного металла через дуговой промежуток и движение свободной поверхности сварочной ванны в направлении осевой линии вылета электрода. Влияние этих и других малых параметров на динамику процесса дуговой сварки в данной задаче можно не учитывать.

Для наглядности и удобства дальнейшего рассмотрения воспользуемся традиционной графической интерпретацией системы уравнений (1) в виде структурной схемы, представленной на рис. 1, б (здесь через  $p$  обозначен оператор Лапласа).

Как видно из этой схемы, сварочный контур с точки зрения теории автоматического управления представляет собой замкнутую систему с отрицательной обратной связью. В качестве управляющих или возмущающих воздействий могут выступать в отдельности или в определенных комбинациях скорость подачи электрода  $v_e(t)$ , расстояние между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны  $H(t)$  и напряжение на выходных клеммах источника сварочного тока  $u_s(t)$ .

Поскольку в итоге нас интересуют частотные свойства рассматриваемой системы, то сразу же перейдем к графоаналитическим характеристикам и на основе структурной схемы (см. рис. 1, б) запишем выражения для передаточных функций от ее входов  $v_e, u_s$  и  $H$  к выходу  $i$ :

$$\begin{aligned} W_1(p) &= \frac{i(p)}{v_e(p)} = \frac{M^{-1}}{T_e T_s p^2 + T_s p + 1}; \\ W_2(p) &= \frac{i(p)}{u_s(p)} = \frac{(EM)^{-1} p}{T_e T_s p^2 + T_s p + 1}; \\ W_3(p) &= \frac{i(p)}{H(p)} = \frac{M^{-1} p}{T_e T_s p^2 + T_s p + 1}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $T_e$  и  $T_s$  — постоянные времени, определяемые соотношениями

$$T_e = \frac{L}{R}, \quad T_s = \frac{R}{EM}.$$

Заметим, что при  $T_s \geq 4T_e$  сварочный контур относительно задающего воздействия  $v_e(t)$  эквивалентен апериодическому звену второго порядка, а относительно воздействий  $u_s(t)$  и  $H(t)$  — последовательно соединенным апериодическому и дифференцирующему звеньям. Рассмотрим их амплитудно-частотные характеристики  $A_k(f) = |W_k(j2\pi f)|$ , где  $k = 1, 2, 3, j = \sqrt{-1}, a f$  — частота гармонического воздействия.

**Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ).** Построить АЧХ сварочного контура можно непосредственно по формулам

$$\begin{aligned} A_1(f) &= \frac{M^{-1}}{\sqrt{(1 - 4\pi^2 T_e T_s f^2)^2 + (2\pi T_s f)^2}}, \\ A_2(f) &= \frac{2\pi(EM)^{-1} f}{\sqrt{(1 - 4\pi^2 T_e T_s f^2)^2 + (2\pi T_s f)^2}}, \\ A_3(f) &= \frac{2\pi M^{-1} f}{\sqrt{(1 - 4\pi^2 T_e T_s f^2)^2 + (2\pi T_s f)^2}}, \end{aligned} \quad (3)$$

которые известным образом выводятся после подстановки в выражения (2) вместо оператора  $p$  мнимой переменной  $j2\pi f$  [19].

На рис. 2 для удобства сравнения приведены графики нормированных АЧХ  $A_{1н}(f), A_{2н}(f)$  и  $A_{3н}(f)$ , построенные по формулам (3), где  $A_{1кн}(f) = A_k(f) / \max A_k(f)$ . Параметры контура, входящие в эти формулы, приняты следующие:  $E = 2,5$  В/мм,  $M = 0,67$  мм/(А·с),  $T_s = 0,1$  с,  $T_e = 2,4 \cdot 10^{-3}$  с. Значения указанных параметров взяты из работ [20, 21] для случая дуговой сварки в аргоне плавящейся электродной проволокой Св-08Г2С диаметром 1 мм. Как и следовало ожидать, кривые  $A_{2н}(f)$  и  $A_{3н}(f)$  полностью совпадают и имеют в сущности форму АЧХ полосового фильтра, в то время как кривая  $A_{1н}(f)$  представляет собой АЧХ фильтра низких частот.

Выделим на рис. 2 так называемые рабочие диапазоны частот  $\Delta f_1$  и  $\Delta f_2 = \Delta f_3$ , в границах которых значения функций  $A_{кн}(f)$  не выходят за пределы желаемого допуска по амплитуде, равного, например, 0,2. Это означает, что на верхней границе указанных диапазонов амплитуда гармонически изменяющегося сварочного тока  $i = i(t, f)$  становится в пять раз меньше, чем ее максимальное значение, которое она принимает при том же входном воздействии на частоте  $f_{\max k} = \arg \max_f A_k(f)$ .

При дальнейшем же повышении частоты  $f$  амплитуда колебаний сварочного тока весьма быстро и асимптотически приближается к нулю (см. рис. 2).

Сравнение рабочих диапазонов показывает, что значение  $\Delta f_1$  существенно меньше чем  $\Delta f_2$  и составляет при данных параметрах всего лишь 8 Гц.

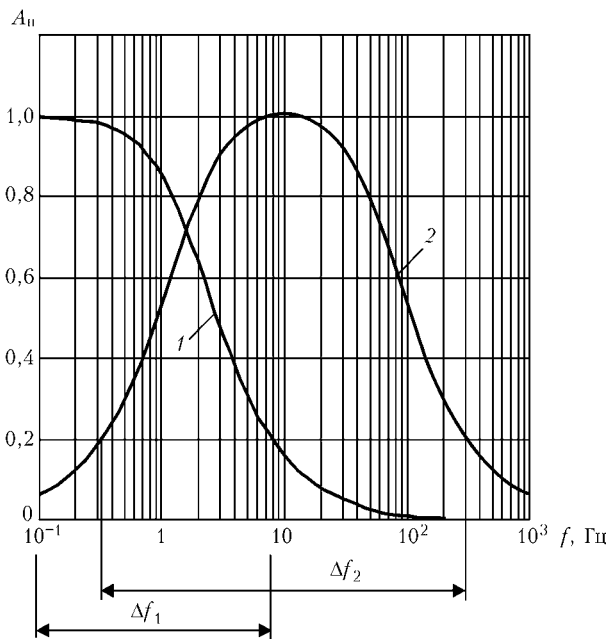


Рис. 2. Нормированные АЧХ: 1 –  $A_{1n}(f)$ ; 2 –  $A_{2n}(f)$  и  $A_{3n}(f)$

Становится очевидным, что импульсная подача электродной проволоки с частотой, превышающей в нашем случае  $f = 8$  Гц, является малоэффективной, поскольку вне рабочей полосы  $\Delta f_1$  сварочный контур как фильтр низких частот будет «подавлять» импульсы сварочного тока.

Иначе обстоит дело в ситуации, когда импульсы формируются с помощью источника сварочного тока или путем периодического изменения расстояния между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны. В этом случае рабочий диапазон частот достаточно широк и составляет на том же уровне 0,2 (см. рис. 2)  $\Delta f_2 = 300$  Гц.

Из анализа частотных характеристик видно, что весьма жесткие ограничения, обусловленные динамическими свойствами контура, налагаются на частоту импульсов только при импульсной подаче электродной проволоки. В двух других рассмотренных случаях эти ограничения несущественны.

**Результаты моделирования.** С целью экспериментальной проверки степени влияния частотных свойств сварочного контура на параметры им-

пульсов сварочного тока выполнено моделирование его динамики на ЭВМ. Эксперимент проведен путем численного решения системы уравнений (1) для трех случаев:  $u_s = \text{var}, H = \text{const}, v_e = \text{const}$ ;  $H = \text{var}, u_s = \text{const}, v_e = \text{const}$ ;  $v_e = \text{var}, H = \text{const}, u_s = \text{const}$ . При этом использовали те же параметры сварочного контура, что и при расчете АЧХ. Входные воздействия задавали в виде следующих алгоритмов:

$$\begin{aligned} u_s &= 21(1 + z) \text{ [В]}; \\ H &= 17 - 3z \text{ [мм]}; \\ v_e &= 70(1 + z) \text{ [мм/с]}, \end{aligned}$$

где

$$z = \begin{cases} 1, & nT \leq t \leq nT + \tau, \\ 0, & nT + \tau < t < (n+1)T, \end{cases} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots ;$$

$T = 1/f_n$ ;  $f_n$  – частота следования импульсов;  $\tau$  – их длительность.

Результаты моделирования при  $f_n = 10$  и 30 Гц и  $\tau = 0,01$  с представлены на рис. 3–5. Сравнение полученных результатов показало, что импульсы, сформированные с помощью модуляции выходного напряжения источника сварочного тока (рис. 3), имеют достаточно большую амплитуду, которая в пределах полосы пропускания мало изменяется с увеличением  $f_n$ . В меньшей степени это относится и к импульсам тока, вызванным вибрацией сварочной горелки (рис. 4). Что касается случая, когда импульсы сварочного тока возникают при импульсной подаче плавящегося электрода, то, как видно из рис. 5, амплитуда их незначительна, а сами импульсы имеют существенно искаженную форму.

Ясно, что вне полосы пропускания  $\Delta f_1$  (см. рис. 2) импульсы сварочного тока подавляются сварочным контуром тем сильнее, чем выше их частота следования. Тогда вполне естественно ожидать существенного увеличения амплитуды импульсов в случае, если их частота будет выбрана внутри рабочего диапазона  $\Delta f_1$ . Оказалось, что это не совсем так. На рис. 6, а представлен результат моделирования рассматриваемого процесса при  $f_n = 2$  Гц. При сравнении рис. 6, а с рис. 5, а видно, что амплитуда импульсов увеличилась незначительно.

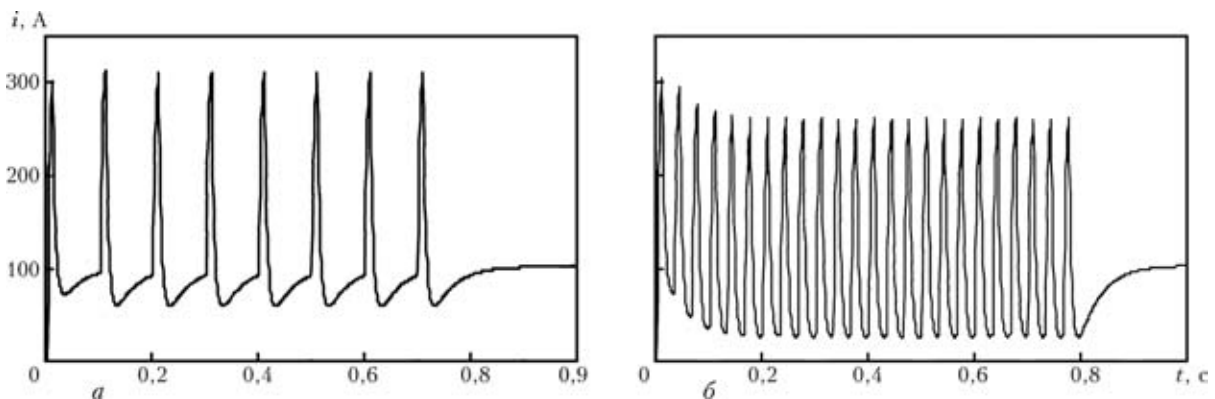


Рис. 3. Импульсы сварочного тока, сформированные с помощью модуляции выходного напряжения источника тока при  $\tau = 0,01$  с: а –  $f_n = 10$ ; б – 30 Гц

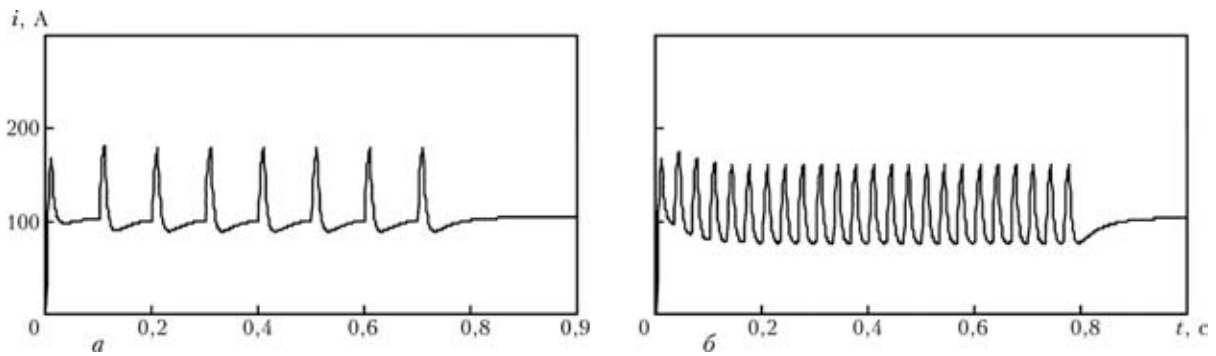


Рис. 4. Импульсы сварочного тока, вызванные вибрацией горелки (*a, б* — см. рис. 3)

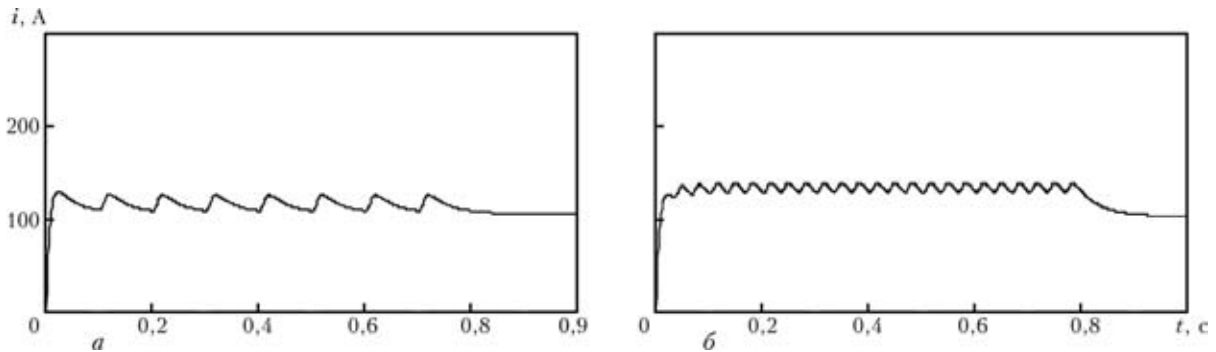


Рис. 5. Импульсы сварочного тока, возникающие при импульсной подаче плавящегося электрода (*a, б* — см. рис. 3)

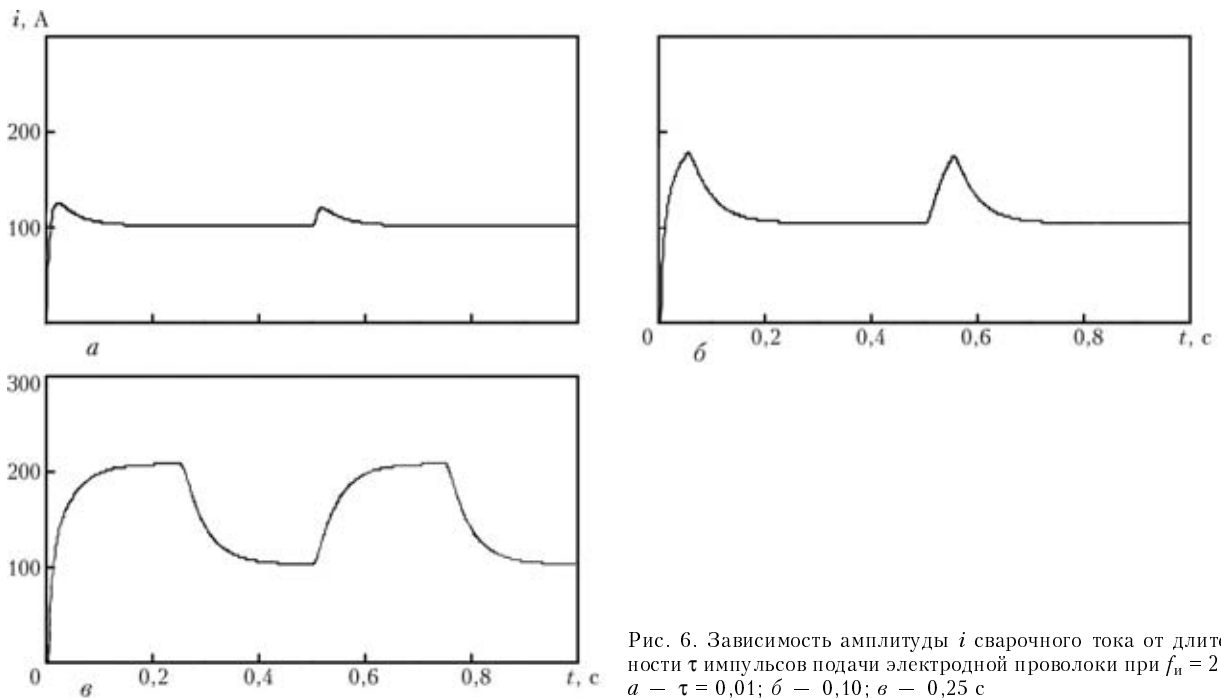


Рис. 6. Зависимость амплитуды  $i$  сварочного тока от длительности  $\tau$  импульсов подачи электродной проволоки при  $f_{\text{и}} = 2$  Гц: *a* —  $\tau = 0,01$ ; *б* —  $0,10$ ; *в* —  $0,25$  с

Этот факт достаточно просто объяснить, если рассмотреть соотношение

$$\Delta l = -\Delta v \tau, \quad (4)$$

записанное на основании двух последних уравнений системы (1) после их дифференцирования при  $H = \text{const}$  и перехода затем к конечным приращениям. Из (4) видно, что изменение длины дуги  $\Delta l$  пропорционально не только разности скоростей  $\Delta v = v_e - v_m$ , которая возникает при импульсной подаче электрода, но и произведению

этой разности на длительность импульса. При очень малых значениях  $\tau$  достаточно малым, очевидно, будет и значение  $\Delta l$ . Следовательно, незначительной будет и амплитуда импульсов сварочного тока. Увеличение длительности импульсов при том же значении  $\Delta v$  должно привести к возрастанию амплитуды импульсов. Как раз этот эффект и наблюдается в результате моделирования (рис. 6, б).

При достаточно больших значениях  $\tau$ , соизмеримых с постоянной времени сварочного контура  $T_s$ , разность  $\Delta v$  уже нельзя считать величиной



постоянной, как в случае малых значений  $\tau$ . Из-за действия отрицательной обратной связи по скорости плавления электрода (известный эффект саморегулирования) значение  $\Delta v$  будет экспоненциально уменьшаться и за промежуток времени  $\Delta t \approx \approx 3T_s$  станет практически равным нулю. При этом равным нулю, согласно (4), будет и значение  $\Delta I$ , а амплитуда импульсов сварочного тока, начиная с данного момента времени, фактически перестает возрастать (рис. 6, в).

Исходя из этого становится ясным, что максимального значения амплитуда импульсов достигает при  $\tau \approx 3T_s$  и скважности импульсов, равной 2, т. е. при  $\tau = T/2 = 1/2f_{\text{н}}$ . Следовательно, оптимальной частотой импульсной подачи электродной проволоки является

$$f_{\text{опт}} \approx 1/6T_s.$$

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что частотные свойства сварочного контура как динамической системы зависят не только от его параметров, но и от того, на какой из входов этой системы  $u_s$ ,  $H$  или  $v$  поступают импульсные воздействия. В том случае, когда указанное воздействие задается путем модуляции выходного напряжения источника сварочного тока или периодического изменения расстояния  $H$  между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны, диапазон значений рабочих частот достаточно широк (сотни герц). В случае же формирования импульсов сварочного тока за счет импульсной подачи электродной проволоки диапазон значений рабочих частот весьма ограничен (единицы герц).

1. Патон Б. Е., Потатиевский А. Г., Подола Н. В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием процесса // Автомат. сварка. — 1964. — № 1. — С. 1–6.
2. Лебедев В. К. Тенденции развития источников питания для дуговой сварки // Там же. — 1995. — № 5. — С. 3–6.
3. Лоос А. В., Лукутин А. В., Сараев Ю. Н. Источники питания для импульсных электротехнологических процессов. — Томск: Томск. политехн. ин-т, 1998. — 158 с.
4. Управление процессом дуговой сварки путем программирования скорости подачи электродной проволоки / Б. Е.

- Патон, Н. М. Воропай, В. Н. Бучинский и др. // Автомат. сварка. — 1977. — № 1. — С. 1–5.
5. Воропай Н. М., Савельев О. Н., Семергеев С. С. Электромагнитные механизмы импульсной подачи электродной проволоки // Там же. — 1980. — № 1. — С. 46–49.
6. Воропай Н. М. Параметры режимов и технологические возможности дуговой сварки с импульсной подачей электродной и присадочной проволоки // Там же. — 1996. — № 10. — С. 3–9.
7. Лебедев В. А., Мошкин В. Ф., Пичак В. Г. Новые механизмы для импульсной подачи электродной проволоки // Там же. — 1996. — № 5. — С. 39–44.
8. Анализ технических и технологических возможностей импульсной подачи электродной проволоки в процессах дуговой сварки и наплавки / Б. Е. Патон, В. А. Лебедев, В. Г. Пичак и др. // Свароч. пр-во. — 2002. — № 2. — С. 24–31.
9. Ushio M., Liu W., Mao W. An experimental investigation of dynamic behavior of arc sensor in GMA welding in short-circuit transfer mode // Trans. JWRI. — 1995. — 24, № 1. — P. 25–31.
10. Mao W., Sadek A. A., Ushio M. Measurement of dynamic characteristics of arc sensor in GMA welding in dip transfer mode // Ibid. — 1997. — 26, № 1. — P. 9–19.
11. Патон Б. Е., Шейко П. П. Автоматическое управление процессом импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом // Автомат. сварка. — 1967. — № 1. — С. 3–8.
12. Патон Б. Е., Лебедев А. В. Управление плавлением и переносом металла при сварке в углекислом газе // Там же. — 1988. — № 11. — С. 15–18.
13. Сараев Ю. Н. Адаптивные импульсно-дуговые методы механизированной сварки при строительстве магистральных трубопроводов // Свароч. пр-во. — 2002. — № 1. — С. 4–11.
14. Стабилизация процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом / Б. Е. Патон, П. П. Шейко, А. М. Жерносеков, Ю. А. Шимановский // Автомат. сварка. — 2003. — № 8. — С. 3–6.
15. Дюргеров Н. Г., Сагиров Д. Х. Определение свойств дуги при импульсных процессах // Свароч. пр-во. — 2004. — № 4. — С. 14–18.
16. Шейко П. П., Жерносеков А. М., Шимановский Ю. О. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с автоматической стабилизацией параметров режимов // Автомат. сварка. — 2004. — № 1. — С. 8–11.
17. Цыбульский Г. А. Построение математических моделей в задачах адаптивного управления дуговой сваркой // Там же. — 1994. — № 1. — С. 24–27.
18. Цыбульский Г. А. К вопросу об устойчивости процесса дуговой сварки плавящимся электродом // Там же. — 2002. — № 5. — С. 17–19.
19. Первозванский А. А. Курс теории автоматического управления. — М.: Наука, 1986. — 616 с.
20. Ленивкин В. А., Дюргеров Н. Г., Сагиров Х. Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. — М.: Машиностроение, 1989. — 264 с.
21. Цыбульский Г. А. О влиянии флуктуаций электрического поля в столбе дуги на устойчивость процесса дуговой сварки // Автомат. сварка. — 2002. — № 6. — С. 44–45.

Results of analysis and modelling of frequency characteristics of welding circuit in pulsed welding processes are given. Three different approaches to implementation of these processes are considered: through modulation of output voltage of the welding current source, exciting torch vibrations and pulsed feeding of electrode wire. It is shown that the operational range of welding current pulses strongly depends upon the approach employed.

Поступила в редакцию 08.12.2004