



## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВЫХ СИСТЕМ

**В. Н. СИДОРЕЦ, А. М. ЖЕРНОСЕКОВ**, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработаны блок-схемы для моделирования в пакете математических программ MATLAB сварочных систем, содержащих дугу с плавящимся электродом. Моделирование позволяет ставить численный эксперимент, решать нелинейные дифференциальные уравнения, описывающие динамику изменения длины дуги при плавлении электрода и величины сварочного тока.

*Ключевые слова:* компьютерное моделирование, дуга с плавящимся электродом, импульсный источник, нелинейные дифференциальные уравнения

Разработка современного сварочного оборудования и анализ его свойств невозможны без экспериментальных исследований. Применение компьютерной техники позволяет часть натурных экспериментов заменить компьютерным моделированием. В работе [1] была предложена математическая модель системы «источник питания — дуга с плавящимся электродом», которая представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, связывающих длину дуги и ток сварки с параметрами сварочного процесса и источника питания. Пакет Simulink компьютерных математических программ MATLAB позволяет проводить численные исследования динамики нелинейных систем, не решая в явном виде дифференциальные уравнения [2, 3]. Однако в наборе блоков пакета Simulink отсутствуют блоки,

описывающие электрическую дугу с плавящимся электродом, и специализированные источники питания дуги (например, импульсные).

Целью данной работы является разработка блок-схем для компьютерного моделирования систем дуговой сварки с плавящимся электродом, содержащих импульсный источник питания дуги. Блок-схема системы «источник питания — дуга с плавящимся электродом» приведена на рис. 1, где в качестве сварочного источника питания используется импульсный источник питания дуги И-169 [4], разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона. Моделируемая система состоит из трех основных элементов: дуга — блок «Duga», электрическая цепь — блок «Source» и импульсный источник — блок «I\_Source\_New».

Входные параметры блока «Duga», моделирующего сварочную дугу с плавящимся электродом (рис. 2), следующие: начальная длина дуги  $l_0$ ; расстояние между мундштуком и изделием  $l_w$ ; сва-

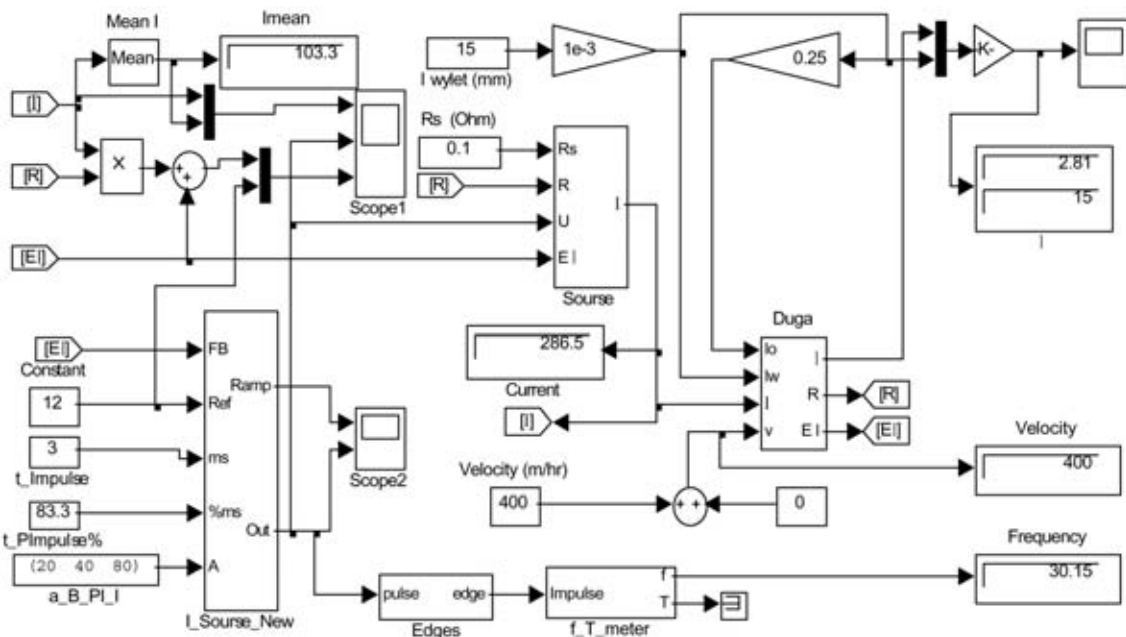


Рис. 1. Блок-схема системы «источник питания — дуга с плавящимся электродом» для моделирования в пакете MATLAB

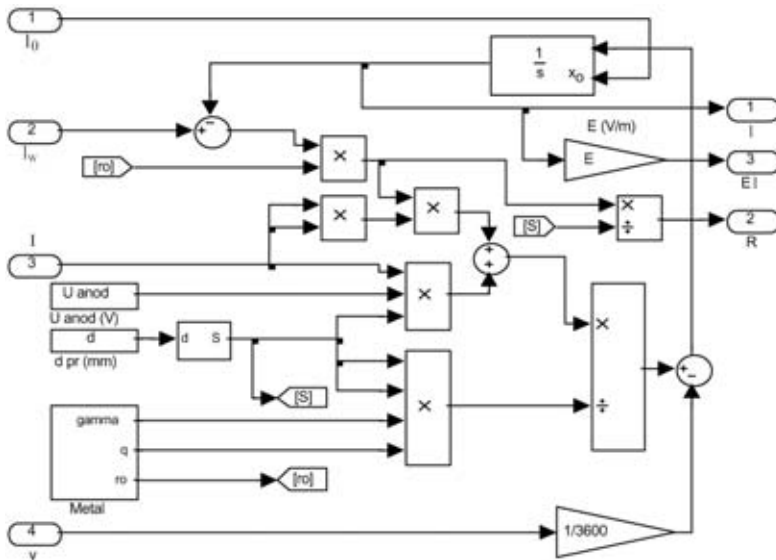


Рис. 2. Блок, моделирующий сварочную дугу с плавящимся электродом

рочный ток  $I$ ; скорость подачи сварочной проволоки  $v$ . Выходные параметры блока «Duga»: длина дуги  $l$ ; сопротивление электродной проволоки  $R$ ; падение напряжения на дуге  $El$  (где  $E$  — напряженность электрического поля в столбе дуги). Основным входом (3) является сварочный ток  $I$ , а выходом (1) — длина дуги  $l$ . Остальные входы параметрические, т. е. задающие параметры.

С помощью блока «Duga» численно решается нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее динамику изменения длины дуги при плавлении электрода [1]:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{SU_A i + \rho(l_w - l)i^2}{\gamma S^2 [c(T_{\text{melt}} - T_0) + \lambda]} - v,$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения электрода;  $U_A$  — прианодное (или прикатодное, в зависимости от полярности тока сварки) падение напряжения с учетом потенциала выхода;  $i$  — мгновенное значение сварочного тока;  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление металла электрода;  $\gamma, c$  — соответственно плотность и удельная теплоемкость металла электрода;  $T_{\text{melt}}$  — темпера-

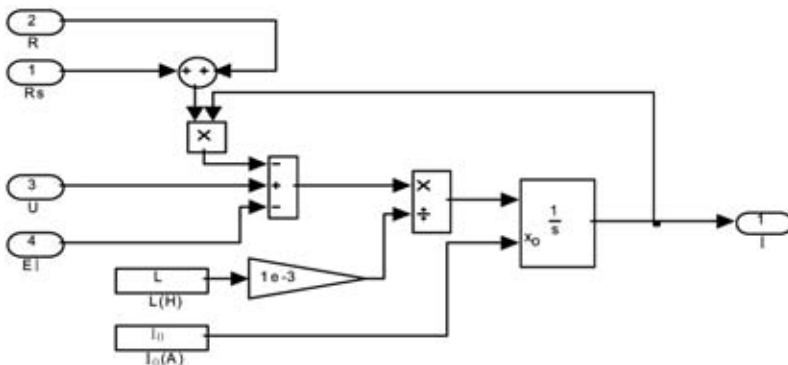


Рис. 3. Блок, моделирующий электрическую цепь

тура плавления металла;  $T_0$  — температура проволоки при выходе из мундштука;  $\lambda$  — удельная теплота плавления металла;  $v$  — скорость подачи проволоки.

Как видно из рис. 2, в блок «Duga» входит блок «Metal». Это параметрический блок, в котором задаются тепло- и электрофизические характеристики металла электродной проволоки. В блоке «Metal» также вычисляется параметр  $q$  ( $q = c(T_{\text{melt}} - T_0) + \lambda$  — константа, описывающая теплофизические свойства металла электродной проволоки, который поступает на выход блока для дальнейшего использования в блоке «Duga».

Наряду со стандартными блоками использован дополнительный блок « $d, S$ », который по диаметру электродной проволоки  $d$  вычисляет площадь ее поперечного сечения  $S$  (рис. 2).

Ядром блока «Duga» является блок-интегратор, который собственно решает дифференциальное уравнение путем интегрирования

$$l = \int \left( \frac{SU_A i + \rho(l_w - l)i^2}{\gamma S^2 [c(T_{\text{melt}} - T_0) + \lambda]} - v \right) dt + l_0.$$

Вход интегратора  $x_0$  используется для задания начального значения  $l_0$ .

Блок, моделирующий электрическую цепь «Source», приведен на рис. 3. Основным входом блока является падение напряжения на дуге « $El$ », остальные входы параметрические. Выходом является сварочный ток  $I$ . Как и в блоке «Duga», в блоке «Source» используются стандартные блоки Simulink: умножитель, делитель, сумматор, масштабный коэффициент. Блоком, который несет основную нагрузку, является интегратор с дополнительным входом для ввода начального значения. Этот блок решает дифференциальное уравнение, которое описывает электрическую цепь [1]:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \left( U_{ps} - R_s i - \rho \frac{l_w - l}{S} i - El \right),$$

где  $L$  — индуктивность источника питания и подводящих кабелей;  $U_{ps}$  — напряжение источника питания дуги, которое может быть как постоянным, так и импульсным;  $R_s$  — активное сопротивление источника питания и подводящих кабелей.

Решение производится таким же образом, как и в блоке «Duga», т. е.

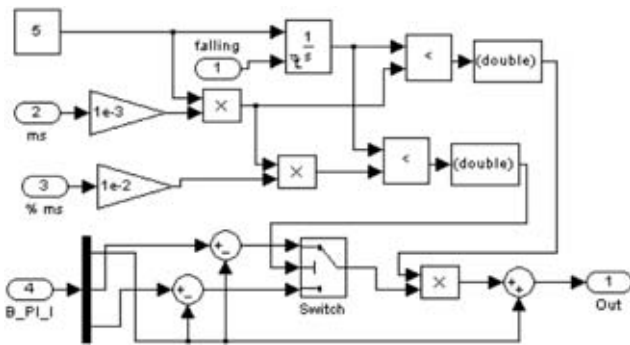


Рис. 4. Блок, моделирующий источник питания для импульсно-дуговой сварки

дифференциальное уравнение сводится к интегральному:

$$i = \int \left( \frac{1}{L} \left( U_{ps} - R_s i - \rho \frac{l_w - l}{S} i - El \right) \right) dt + i_0.$$

Если необходимо рассматривать источник питания постоянного тока, то вход «U» связывается с блоком «Constant», который задает напряжение холостого хода (см. рис. 3). Если исследуется источник питания, выходное напряжение которого зависит от времени, этот вход должен связываться со специализированным блоком. Состав блока «I\_Source\_New», моделирующего источник питания для импульсно-дуговой сварки, представлен на рис. 4.

Блок «I\_Source\_New» состоит из двух частей: формирователя амплитудных и временных характеристик сварочного тока (блок «PI-I») и регулятора по среднему значению за период. Регулятор интегрирует разность между сигналом обратной связи  $U_{FB}$  и сигналом задания  $U_{Ref}$ .

$$\int (U_{FB} - U_{Ref}) dt.$$

При достижении сигналом нулевого значения регулятор вырабатывает перепад из логической единицы в логический нуль (задний фронт). Этим перепадом интегратор обнуляется, а также запускает блок «PI-I», который формирует импульсы высокого и низкого уровней сварочного тока (в случае ступенчатого импульса). Приравнивая интеграл нулю, регулятор вырабатывает длительность, которая обеспечила бы стабильность среднего за период значения

$$\int_0^T U_{FB} dt = U_{Ref}$$

Блок «Constant» (5) подает постоянный сигнал на вход интегратора, который периодически обнуляется задним фронтом по входу «falling» (1). На выходе интегратора формируется пилообразный сигнал, который посредством двух компараторов «<» сравнивается с уровнями, которые со-

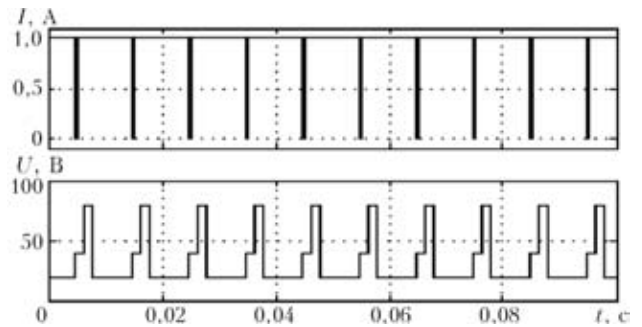


Рис. 5. Временные диаграммы, демонстрирующие работу блока формирователя

ответствуют длительностям низкого и высокого уровней сварочного тока. Ключ «Switch» подает сигналы, соответствующие амплитуде низкого и высокого уровня импульса на выход «Out» (1) блока «PI-I» в соответствующие интервалы времени. Когда время больше длительности импульса, на выход «Out» подается сигнал, соответствующий базовому току.

На рис. 5 приведены временные диаграммы работы блока «PI-I» для импульсно-дуговой сварки со следующими параметрами: напряжение базового тока, напряжение импульса нижнего и верхнего уровня 20, 40, 80 В соответственно, длительность импульса 3 мс, импульс верхнего уровня 1,5 мс (50 % импульса) при частоте задания от внешнего генератора 100 Гц.

Схему, приведенную на рис. 1, применяли при моделировании импульсно-дуговых источников питания дуги с заданием частоты следования импульсов внешним генератором [1]. Аналогичные, но модернизированные схемы, использовали при создании систем автоматической стабилизации средних значений напряжения на дуге и тока сварки с воздействием на частоту следования импульсов и скорость подачи сварочной проволоки [5].

### Выводы

1. Опыт использования компьютерных программ MATLAB при моделировании импульсно-дуговых систем показывает перспективность применения этого пакета при создании нового сварочного оборудования.

2. При решении исследовательских задач и в учебном процессе целесообразно использовать разработанные блок-схемы для моделирования систем, содержащих дугу с плавящимся электродом, и импульсные источники питания, позволяющие решать нелинейные дифференциальные уравнения, которые описывают динамику изменения длины дуги при плавлении электрода и сварочного тока.

1. Сидорец В. Н., Жерносеков А. М. Численное моделирование системы источник питания–дуга с плавящимся электродом // Автомат. сварка. — 2004. — № 12. — С. 10–16.



2. Филлис Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. — М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. — 616 с.
3. Дьяконов В. П. MATLAB 6/ 6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя. — М.: СОЛОН-Пресс, 2003. — 576 с.
4. А. с. 4696750/27 СССР, МКП<sup>5</sup> В 23 К 9/09. Источник тока для импульсно-дуговой сварки / В. М. Павшук, П. П. Шейко. — Заявл. 31.05.89; Опубл. 07.10.91, Бюл. № 37. — 6 с.
5. Жерносеков А. М. Системи автоматичної стабілізації процесу імпульсно-дугового зварювання плавким електродом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — К., 2006. — 19 с.

Block diagrams have been developed for simulation of welding systems containing a consumable electrode arc in MATLAB software package. Simulation allows staging numerical experiments, solving non-linear differential equations, describing the dynamics of variation of the arc length at electrode melting and of welding current.

Поступила в редакцию 22.09.06

УДК 621.791:629.113

## ОБЛЕГЧЕННЫЕ СВАРНЫЕ БАЛЛОНЫ ДЛЯ АВТОТРАНСПОРТА

**М. М. САВИЦКИЙ**, д-р техн. наук, **А. А. САВИЧЕНКО**, **В. М. КУЛИК**, кандидаты техн. наук,  
**А. Ф. ЛУПАН**, **Г. М. МЕЛЬНИЧУК**, **Л. А. ЧЕРТОРЫЛЬСКИЙ**, **Н. А. ГОЛУБ**, **В. А. СУПРУНЕНКО**, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описана конструкция сварного баллона для автотранспорта с композиционной оболочкой. Отмечена возможность производства облегченных баллонов различных типоразмеров с удельной массой 0,60...0,65 кг/л. Гарантированный срок эксплуатации баллонов составляет 15...20 лет.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, высокопрочная сталь, композиционная оболочка, облегченный баллон, удельная масса

Загрязнение окружающей среды токсичными продуктами сгорания горючего достигает в крупных городах 70 % общего загрязнения. Использование в качестве моторного топлива природного газа (метана) снижает выбросы CO, углеводородов, оксидов азота и исключает выбросы соединений свинца. Кроме того, эквивалентное количество газа в 2-3 раза дешевле бензина.

Для работы автомобилей на сжатом метане применяют баллоны с рабочим давлением до 19,6 МПа. В настоящее время на грузовом транспорте и автобусах в Украине эксплуатируются автомобильные баллоны из углеродистых и легированных сталей с удельной массой 1,25 и 1,86 кг/л. Для использования баллонов на легковых автомобилях и сельскохозяйственных машинах их удельная масса должна быть не более 0,7...0,8 кг/л, что возможно путем увеличения прочности конструкционного материала до  $\sigma_b \geq 1275$  МПа при использовании труб из никельсодержащей стали 20ХН4ФА для горячей закатки днищ и горловин. В связи с отсутствием в Украине производства качественных равнотолщинных труб требуемого размера при изготовлении таких баллонов трубы размером 219×8,5 мм приходится протачивать изнутри и снаружи до размера 215×4,5 мм.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработаны конструкция (рис. 1) [1] и технология изготовления сварного комбинированного баллона удельной массой 0,60...0,65 кг/л. Герметичный корпус, состоящий из прямошовной обечайки 1 и двух штампованных днищ 4 одинаковой толщины со стыковыми соединениями 3, изготавливают из листовой высокопрочной легированной стали с применением аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом [2]. В листовом прокате толщиной 3...6 мм предельное отклонение по толщине в 3-4 раза меньше, чем в трубах, а процесс производства его на металлургических предприятиях хорошо налажен. Получаемые соединения характеризуются мелкокристаллической структурой и плавными переходами от шва к основному металлу на границе сплавления. Заданный химический состав и комплексная обработка продольного шва обеспечивают его равнопрочность и сообщают ему достаточно высокую конструктивную и усталостную прочность.

Учитывая, что в цилиндрической части корпуса напряжения в 2 раза больше, чем в полусферических днищах, на ней формируется усиливающая композиционная оболочка 2 заданной толщины стенки путем поперечной намотки с натяжением стеклянных волокон, пропитываемых эпоксидным связующим, и полимеризации при повышенных температурах. В цилиндрической части сварного корпуса композиционной оболочкой создаются кольцевые напряжения сжатия, ко-