



ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРКИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ КОНТАКТНЫМИ ТОЧЕЧНЫМИ МАШИНАМИ

Н. В. ПОДОЛА, П. М. РУДЕНКО, В. С. ГАВРИШ, кандидаты техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности применения алгоритма адаптации нейронных сетей в системах управления контактной точечной сварки на основе микроконтроллера. Для упрощения требуемых расчетов при заданной точности контроля предложено использовать нейронную сеть с входными параметрами процесса в относительных единицах.

Ключевые слова: контактная точечная сварка, диаметр ядра, сварная точка, микроконтроллер, нейронная сеть, адаптация, алгоритм

В системах управления контактными точечными машинами обычно применяются однокристалльные восьмиразрядные контроллеры типа MCS51, обеспечивающие достаточную точность регулирования процесса. При использовании в этих контроллерах нейронных сетей для контроля качества сварки необходимая точность предсказания диаметра ядра $D_{я}$ сварной точки может быть достигнута благодаря применению адаптивного алгоритма [1, 2]. При этом на вход нейронной сети подаются переменные, выраженные в натуральных единицах.

Расчет весовых коэффициентов и пороговых значений нейронной сети выполняется на персональном компьютере с применением вычислений с плавающей запятой. В однокристалльном контроллере использование такого расчета для вычисления по нейронной сети диаметра ядра сварной точки занимает много времени и не сочетается с высокой производительностью контактных машин. Цель работы состоит в оценке эффективности использования адаптивного алгоритма сети для уменьшения продолжительности расчета нейронной сети без потери точности предсказания.

При одной и той же структуре нейронной сети весовые коэффициенты и ее пороговые значения определяются параметрами режима сварки — сварочным током, диаметром рабочей поверхности электродов, напряжением на электродах. Чтобы исключить хранение в памяти больших массивов данных о весовых коэффициентах и пороговых значениях, был предложен алгоритм их перестройки [2, 3]: при изменении режима весовые коэффициенты, пороговые значения и структура базовой модели остаются неизменными, а входные переменные пересчитываются по линейному закону таким образом, чтобы сохранялась прежняя область определения модели:

$$I_{н} = A_1 I + B_1; U_{н} = A_2 U + B_2, \quad (1)$$

где $I_{н}$, $U_{н}$ — соответственно значения сварочного тока и напряжения между электродами, подстав-

ляемые на вход нейронной сети; I , U — измеренные значения тех же параметров.

Коэффициенты и свободные члены в зависимостях (1) вычисляются исходя из допустимых отклонений параметров базового и нового режимов сварки:

$$\begin{aligned} A_1 &= (I_{6,max} - I_{6,min}) / (I_{max} - I_{min}); \\ B_1 &= I_{6,max} - A_1 I_{max}; \\ A_2 &= (U_{6,max} - U_{6,min}) / (U_{max} - U_{min}); \\ B_2 &= U_{6,max} - A_2 U_{max} \end{aligned} \quad (2)$$

где $I_{6,max}$, $I_{6,min}$, $U_{6,max}$, $U_{6,min}$ — максимальное и минимальное значения диапазона изменения сварочного тока и напряжения между электродами базового режима; I_{max} , I_{min} , U_{max} , U_{min} — то же для нового режима.

Кроме того, аналогичное линейное преобразование применяется для выходной величины — диаметра ядра сварной точки:

$$D_{я} = A_3 D_6 + B_3,$$

где D_6 — диаметр ядра сварной точки при базовом режиме;

$$\begin{aligned} A_3 &= (D_{max} - D_{min}) / (D_{6,max} - D_{6,min}); \\ B_3 &= D_{max} - A_3 D_{6,min} \end{aligned} \quad (3)$$

где D_{min} , D_{max} — измеренные значения диаметра ядра соответственно при I_{min} , U_{min} и I_{max} , U_{max} ; $D_{6,min}$, $D_{6,max}$ — выходные минимальные и максимальные значения нейронной сети при подстановке на ее вход пересчитанных по (1) значений I_{min} , U_{min} и I_{max} , U_{max} .

Применение описанного алгоритма в системе управления контактной машиной позволило обеспечить погрешность предсказания диаметра ядра сварной точки не более 10 % при сварке низкоуглеродистой стали с толщиной пакета от (0,8 + 0,8) до (2,0 + 2,0) мм. При этом точность пересчитанной модели зависит от того, насколько удачно выбраны параметры D_{min} , D_{max} , I_{min} , U_{min} , I_{max} , U_{max} в (2) и (3), при которых значения диаметра ядра сварной точки изменяются от минимального до максимально допустимого при подборе нового режима сварки. При выборе этих параметров необходимо учитывать погрешность вос-

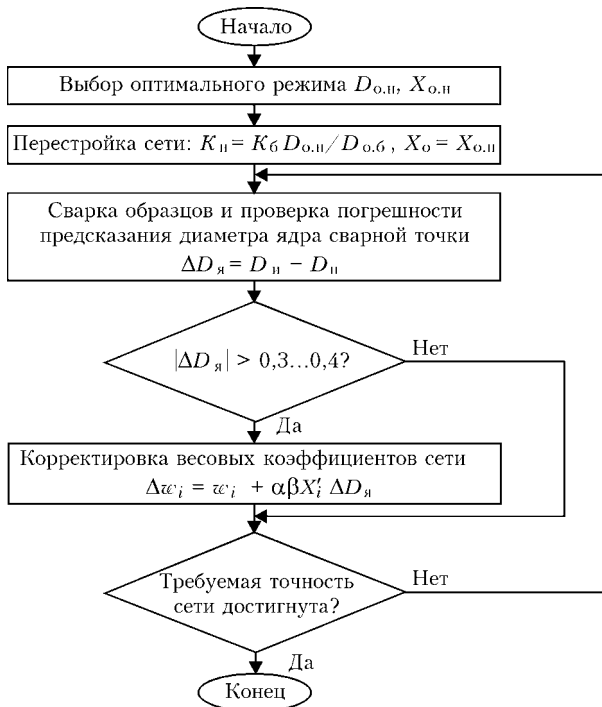


Рис. 1. Алгоритм адаптации нейронной сети с входными параметрами в относительных единицах (обозначения см. в тексте)

производимости опытных данных. Невозможно, накапливая экспериментальные данные, последовательно повышать точность подстройки. В перестроенной модели не учитываются данные в центре области описания, тогда как именно здесь существует наибольшая вероятность прохождения процесса.

Очевидно, что эксперименты и вычисления существенно упрощаются в случае, если входные переменные нейронной сети находятся в одном диапазоне значений. Простейшим способом приведения входных параметров процесса точечной сварки к близким численным значениям является представление их в относительных единицах

$$X' = (X - X_0) / X_0,$$

где X — текущие, а X_0 — оптимальные значения параметров.

Известно, что независимо от толщины свариваемых деталей для обеспечения качественного сварного соединения относительное изменение параметров режима сварки (тока, усилия сжатия электродов) не должно превышать заданных значений на $\pm 5\%$ по току и на $\pm 10\%$ по усилию сжатия электродов. Иными словами, при представлении параметров процесса точечной сварки в относительных единицах области изменения зна-

Толщина пакета, мм	Сварочный ток, кА			Длительность сварки, период	Усилие сжатия, даН	Диаметр ядра, мм
	базовый	минимальный	максимальный			
1,2 + 1,2 (базовая сеть)	8,9	5,9	9,9	10	370	5,4
0,8 + 0,8	8,2	6,5	9,8	8	320	4,6
2,0 + 2,0	12,1	8,7	13,2	12	550	6,9

чений входных величин накладываются одна на другую и довольно часто совпадают.

Известно, что при вычислении параметров нейронной сети обычно применяется нормализация входных переменных, что по сути является оценкой их в относительных единицах:

$$X'' = (X - X_{cp}) / X_{o,p},$$

где $X_{cp} = 0,5(X_{max} + X_{min})$ — среднее значение диапазона изменения входных переменных сети; $X_{o,p} = 0,3(X_{max} - X_{min})$ — оценка размаха этого диапазона.

С учетом того, что обычно $X_{cp} = X_0$, можно полагать

$$X'' = X'X_0 / X_{o,p},$$

а нормализованное значения выхода — значение диаметра ядра сварной точки

$$D'' = D_я / (1,1D_{max}).$$

При расчете нейронной сети с входными переменными в относительных единицах автоматически исключается необходимость их нормализации, что способствует повышению скорости сходимости алгоритма [4]. При контроле процесса сварки, выполняемом на новом режиме, необходимо выбрать новые оптимальные значения параметров режима $X_{o,n}$ и диаметра ядра сварной точки $D_{o,n}$. Далее в сеть необходимо подставить относительные значения X' , и изменить масштабный коэффициент на выходе базовой нейронной сети K_6 пропорционально изменению оптимальных значений диаметра ядра при базовом $D_{o,6}$ и новом режиме $D_{o,n}$:

$$K_n = K_6 D_{o,n} / D_{o,6}. \quad (4)$$

Алгоритм перестройки (рис. 1) нейронных сетей с входными параметрами в относительных единицах проверяли при сварке деталей из низкоуглеродистой стали с толщиной пакета (0,8 + 0,8), (1,2 + 1,2) и (2,0 + 2,0) мм.

Оптимальные режимы сварки выбирали с учетом рекомендаций Международного института сварки (таблица). Область исследования процесса составляла от $0,5D_{o,n}$ до $1,1D_{o,n}$ (до появления выплеска). При оптимальном режиме сварочный ток и напряжение между электродами обычно изменяли в диапазоне $-20...+5\%$, усилие сжатия электродов — на $+50\%$, диаметр рабочей поверхности электродов — на $+50\%$.

Базовую нейронную сеть строили для сварки пакета толщиной (1,2 + 1,2) мм. Входными переменными нейронной сети были их относительные значения X' . Затем для пакетов толщиной (0,8 + 0,8) и (2,0 + 2,0) мм по оптимальным параметрам базового режима $I_{o,6}$, $U_{o,6}$ и $D_{o,6}$ и нового оптимального режима $I_{o,n}$, $U_{o,n}$ и $D_{o,n}$ изменяли коэффициент на выходе базовой нейронной сети K_6 для новой сети K_n по зависимости (4).

Очевидно, что при оптимальных параметрах режима сварки погреш-



ность предсказания определяется погрешностью воспроизводимости опыта: максимальную погрешность следует ожидать на периферии требуемой области описания процесса сварки. Эта погрешность будет тем больше, чем больше нарушается подобие процессов сварки при базовом и новом режиме.

Увеличение погрешности предсказания процесса сварки в области параметров режима, при которых диаметр ядра больше $D_{o,n}$, не опасно, поскольку для контроля качества сварного соединения в этой области бракованное соединение можно оценить по возникновению выплеска (если выплески недопустимы), который с высокой достоверностью определяется по падению напряжения между электродами. Кроме того, если исходить из условия выбора оптимального режима, то эта область обычно настолько мала, что возникновение в ней значительной погрешности предсказания маловероятно.

Иное положение обстоит с увеличением погрешности в области минимального допустимого диаметра ядра D_{min} . Здесь и удаление от точки $D_{o,n}$ будет больше, и точность предсказания должна быть высокой для различения некачественного сварного соединения. С целью увеличения точности описания процесса сварки при значениях параметров режима, при которых диаметр ядра приближается к D_{min} , можно использовать данные в этой точке для подстройки нейронной сети. В эксперименте такую точку получали при одновременном уменьшении напряжения сети на $-10...-20\%$, увеличении усилия сжатия электродов на $+20...50\%$, а диаметра рабочей поверхности электродов — на $+50\%$.

По погрешности диаметра ядра сварной точки $\Delta D_{я} = D_{н} - D_{п}$ (где $D_{н}$ и $D_{п}$ — соответственно измеренное и предсказанное значения диаметра ядра) корректировали весовые коэффициенты сети:

$$\Delta w_i = w_i + \alpha \beta X'_i \Delta D_{я}, \quad (5)$$

где $\alpha = 0, 1$ — коэффициент усреднения; β — коэффициент, определяемый предсказанным значением диаметра ядра из алгоритма обучения нейронной сети. В нашем случае для обучения сети использовали алгоритм с обратным распространением ошибки типа «back propagation».

Описанный алгоритм проверяли при разных режимах сварки деталей с указанным диапазоном толщины пакета. Оптимальные параметры режима подбирали при разном времени сварки. Для уменьшения погрешности менее чем на 10% в двух случаях из девяти корректировка весовых коэффициентов сети по (5) не понадобилась, в шести случаях достаточно было сварки одной точки, а в одном случае — двух точек для уточнения коэффициентов w_i (рис. 2).

Приведенный адаптивный алгоритм и используемая структура нейронной сети удобнее для реализации в однокристалльных контроллерах, когда разрядная сетка ограничена 8 битами, по сравнению с расчетом с входными параметрами в натуральных единицах, поскольку упрощается масштабирование входных переменных. При расчетах

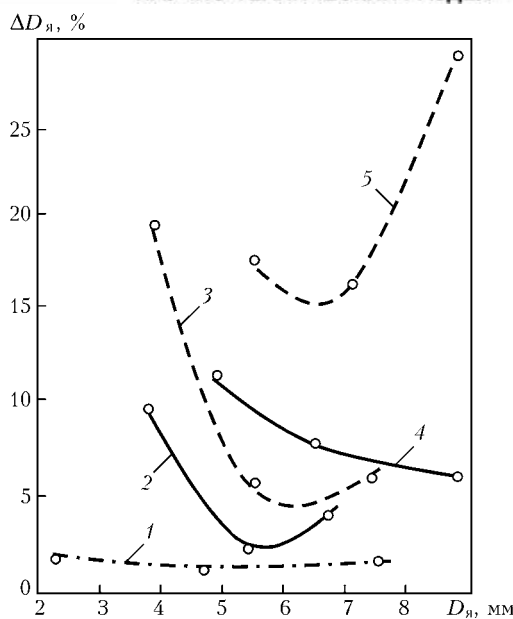


Рис. 2. Погрешность $\Delta D_{я}$ предсказания диаметра ядра сварной точки $D_{я}$ при сварке деталей из низкоуглеродистой стали с различной толщиной пакета: 1 — (1,2 + 1,2) мм — базовый режим; 2, 3 — (0,8 + 0,8) мм; 4, 5 — (1,2 + 1,2) мм; сплошные кривые — с адаптацией; штриховые — без нее

нейронных сетей и их проверке на персональном компьютере используются вычисления с плавающей запятой с практически неограниченной для поставленной задачи точностью представления входных значений параметров и результатов промежуточных вычислений.

В однокристалльном контроллере применение арифметических операций с плавающей запятой при вычислении по нейронным сетям исключено, поскольку на расчеты тратится недопустимо много времени по сравнению с высокой производительностью контактных сварочных машин. Очевидно, что расчеты в однокристалльной ЭВМ необходимо осуществлять в режиме фиксированной запятой. Основная длина слова таких ЭВМ составляет 8 бит, т. е. исходные данные, коэффициенты и результаты промежуточных вычислений находятся в диапазоне $-127...+127$. Усложнив алгоритмы вычислений, можно увеличить разрядную сетку, однако объем памяти и время вычислений программы при этом возрастают. Критерием оптимальности алгоритма вычислений был выбран минимальный объем памяти для его реализации при погрешности вычислений не более $0,1...0,2$ мм в сравнении с нейронной сетью, построенной без ограничений при расчете весовых коэффициентов и пороговых значений нейронной сети.

При программировании нейронной сети необходимо выбрать разрядность представления весовых коэффициентов и пороговых значений, точность представления сигмоидной функции и выполнения промежуточных вычислений, в частности накопления подсигмоидной суммы. Оценку разрядности представления коэффициентов и пороговых значений сети осуществляли с помощью расчета нейронной сети по одним и тем же экспериментальным данным с ограничением разрядной сетки от 7 и более бит.

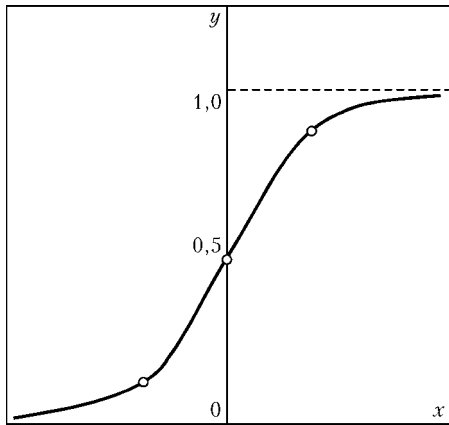


Рис. 3. Сигмоидная функция

В качестве базовой нейронной сети для оценки погрешности описания процесса была взята сеть, рассчитанная без ограничения переменных.

Из проведенных расчетов следует, что приемлемая точность описания процесса контактной точечной сварки с помощью нейронной сети выбранной структуры достигается при ограничении ее параметров до ± 512 . Увеличение точности представления до ± 1024 практически не повышает точность расчета диаметра ядра сварной точки, а снижение до ± 256 уменьшает точность предсказания. Таким образом, в дальнейшем рассматривали нейронные сети, переменные которых находились в диапазоне $-512...+512$ (10 бит).

При описании сигмоидной функции (рис. 3) учитывали, что она симметрична относительно точки $x = 0, y = 1/2$ и изменяется по выходу в диапазоне $0...1$ при изменении аргумента во всем диапазоне значений от $-\infty$ до $+\infty$. Область описания по аргументу может быть ограничена исходя из характера нелинейности функции. Так, при $x = 3,0 y = 0,952$; $x = 4,0 y = 0,982$; $x = 5,0 y = 0,993$; $x = 6,0 y = 0,997$; $x = 7,0 y = 0,999$; $x = 8,0 y = 0,9997$. В случае ограничения аргумента до $x_{\max} = 5,0$ погрешность описания функции на границе области ее определения не будет превышать 1%. Максимальная погрешность описания сигмоидной функции в зависимости от шага изменения аргумента находится в окрестности точки $x = 0$ и при шаге $1/16$ составляет 0,0156, при $1/32 = 0,0078$, при $1/64 = 0,0039$, т. е. шаг

$1/32$ обеспечивает погрешность описания не хуже 1%. Для описания сигмоидной функции с точностью не хуже 1% и в виде, удобном для реализации на однокристалльных контроллерах, аргумент представляли в виде девятибитового числа, включая один знаковый разряд, с дискретностью изменения аргумента $1/32$. Погрешность аппроксимации при этом меняется от 0,0078 (в центре) до 0,004 (на краях области определения).

Максимальное значение подсигмоидного выражения, зависящее от максимального значения входных переменных (255 или 8 бит), максимальных значений весовых коэффициентов и пороговых значений (± 512 или 10 бит), а также количества слагаемых в подсигмоидном выражении (4), составляет $8+10+3 = 21$ бит. Таким образом, подсигмоидную сумму необходимо считать трехбайтным числом.

Приведенные ограничения при промежуточных расчетах подтверждены результатами экспериментов по сварке низкоуглеродистой стали, которые сверяли с расчетами, выполненными в режиме плавающей запятой. Погрешность предсказания диаметра ядра при этом составила не более 0,1 мм.

Таким образом, предлагаемый алгоритм очень прост для использования при смене режима, есть возможность накапливать результаты экспериментов и повышать точность подстройки нейронной сети в определенных точках заданной области режимов. В целом алгоритм в относительных единицах позволяет контролировать качество сварки в широком диапазоне толщины свариваемых материалов без проведения большого количества экспериментов для построения нейронной сети.

1. Автоматическая оценка качества контактной сварки с помощью нейронных сетей / Б. Е. Патон, Н. В. Подола, В. С. Гавриш, В. В. Лукович // Автомат. сварка. — 1999. — № 12. — С. 3–8.
2. Подола Н. В., Руденко П. М., Гавриш В. С. Адаптивный алгоритм контроля качества контактной точечной сварки на основе нейронных сетей // Там же. — 2002. — № 1. — С. 46–48.
3. Подола Н. В., Гавриш В. С., Руденко П. М. Адаптивная система регулирования процесса точечной контактной сварки низкоуглеродистой стали // Там же. — 1999. — № 6. — С. 3–5.
4. Райбман Н. С., Чадеев В. М. Построение моделей для управления процессом производства. — М.: Энергия, 1975. — 237 с.

Peculiarities of application of the adaptive algorithm of neuron networks in resistance spot welding control systems based on micro controller are considered. It is suggested that the neuron network with input process parameters measured in relative units should be used to simplify the required calculations at the specified control accuracy.

Поступила в редакцию 21.10.2003,
в окончательном варианте 30.11.2003