

**РЕКУРСИВНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВАРОЧНОЙ ЦЕПИ
С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРА КАЛМАНА**

Б.И. Пякилля

Научный руководитель: профессор, д.т.н. В.И. Гончаров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: morphism@tpu.ru

**RECURSIVE ESTIMATION OF WELDING CIRCUIT PARAMETERS
USING KALMAN FILTER**

B.I. Pyakillya

Scientific Supervisor: Prof., Dr. V.I. Goncharov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: morphism@tpu.ru

***Abstract.** In this paper we present the results of recursive estimation of welding circuit parameters using Kalman filter in the case of linear dynamical system. These results are used for welding quality estimation problem where we have to obtain information about resistance value in resistance spot welding process. This value is calculated in real-time conditions in recursive way because of voltage control requirements. In addition, value of welding circuit inductance is calculated due to welding process performance checking. The results of recursive estimation with figures are presented in the end of the work.*

В настоящее время существует задача повышения эффективности работы производственных предприятий, связанная с повышением качества выпускаемых продуктов этих предприятий. В автомобильной промышленности эта задача связана с проблемой обеспечения требуемого качества процесса точечной сварки, т.е. прочности сварочного соединения. Важность этой проблемы вызвана тем, что точечная контактная сварка занимает 95% всех сварочных процессов [1, 2], а значит вопросы, связанные с протеканием процесса точечной сварки и получаемых сварных соединений имеют важное практическое значение. Существующая проблема оценивания качества сварных соединений основана на том, что в большинстве случаев невозможно напрямую измерить прочность или определить вид получаемого или полученного сварного соединения. Это может быть связано с изоляцией зоны сварки для борьбы с окислением, дороговизной установки измерительных приборов для каждой сварочной машины или высокая чувствительность к помехам [3].

Решение проблемы оценивания можно найти, используя существующие измерения сварочного тока и сварочного напряжения, полученные в процессе функционирования сварочной машины от ее собственных датчиков – пояс Роговского или шунт переменного/постоянного тока. Эти данные могут быть использованы вместе с существующими алгоритмами оценивания параметров динамической системы, которой является сварочная цепь сварочной машины как носитель информации о качестве

сварного соединения. Кроме того, что алгоритм оценивания должен обеспечивать информацией о качестве сварного соединения в реальном времени по мере протекания процесса, он также должен обладать невысокой вычислительной сложностью, что связано с ограничением на вычислительные возможности встраиваемых систем управления технологическими процессами.

В задаче оценивания сварного соединения, оцениваемой величиной является электрическое сопротивление между контактными электродами – параметр, который характеризует качество сварного соединения и величину напряжения, возникающего между электродами, которую необходимо знать для задачи стабилизации напряжения. Задача оценивания усложняется тем, что электрическое сопротивление имеет переменный характер, вызванный изменением температуры сварного соединения и процессом формирования сварной точки. Таким образом, при задаче оценивания сопротивления в реальном времени, необходимо использовать рекурсивные методы, позволяющие, на каждом этапе (шаге, итерации) получения экспериментальных данных (значений сварочного тока, сварочного напряжения), оценивать величину электрического сопротивления.

Для решения данной задачи был выбран линейный фильтр Калмана, мы представляем систему как систему линейных разностных уравнений первого порядка [4]:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \\ y_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{x}_k – вектор оцениваемых параметров на k -ой итерации, \mathbf{A}_k – матрица системы, связывающая значения вектора оцениваемых параметров на k и $k+1$ шагах, \mathbf{w}_k – вектор, элементами которого являются случайные значения, отражающие случайное изменение оцениваемых параметров, имеющие нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием $N(0, \sigma^2)$. Вектор \mathbf{w}_k описывает собственное случайное поведение системы. \mathbf{H}_k – матрица, описывающая параметры наблюдателя оцениваемых параметров, \mathbf{v}_k – вектор, моделирующий шум наблюдений с датчика (измерений), y_k – вектор наблюдаемых (измеренных) значений напряжения сварочной цепи.

В системе (1) вектор оцениваемых параметров \mathbf{x}_k представляет собой вектор, элементами которого являются параметры сварочного процесса: индуктивность сварочной цепи $L(t)$, электрическое сопротивление между электродами $r_3(t)$. Если необходимость оценивания электрического сопротивления обусловлена требованием оценить качество получаемого сварного соединения, то в случае с индуктивностью, параметр необходим для оценивания качества работы сварной машины – изменение индуктивности может говорить нам об изменении мощности сварочного процесса.

Вид дифференциального уравнения, описывающего сварочную цепь с помощью правил Кирхгофа, имеет вид:

$$U_k(t) = L(t) \frac{dI_{cb}(t)}{dt} + R(t) I_{cb}(t), \quad (2)$$

где $U_k(t)$, $I_{cb}(t)$ – сварочное напряжение на клеммах подключения к сварочной цепи и сварочный ток соответственно, $L(t)$ – переменная индуктивность сварочной цепи, $R(t)$ – общее переменное электрическое, которое имеет вид

$$R(t) = R_{cb} + r_3(t), \quad (3)$$

где R_{cb} – сопротивление сварочной цепи (ее проводящих частей), $r_3(t)$ – сопротивление между контактными электродами. Как видно из (3), $R_{cb} = \text{const}$, а сопротивление между электродами варьируется с течением времени.

Используя за основу описание вида (1), получим

$$\mathbf{x}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \quad y_k = \frac{I_k - I_{k-1}}{T} \quad I_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad (4)$$

где T –период дискретизации.

В результате применения фильтра Калмана, мы получаем решение в виде вектора параметров, который минимизирует квадратичную ошибку между экспериментальными данными и моделью. На рисунках 1, 2 представлены результаты оценивания параметров сварочного процесса.

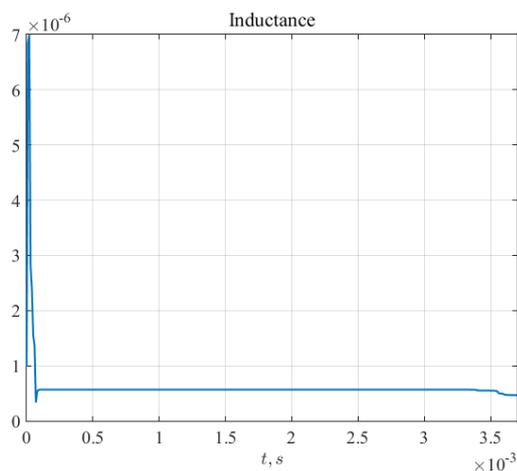


Рис. 1. График оценки индуктивности сварочной машины

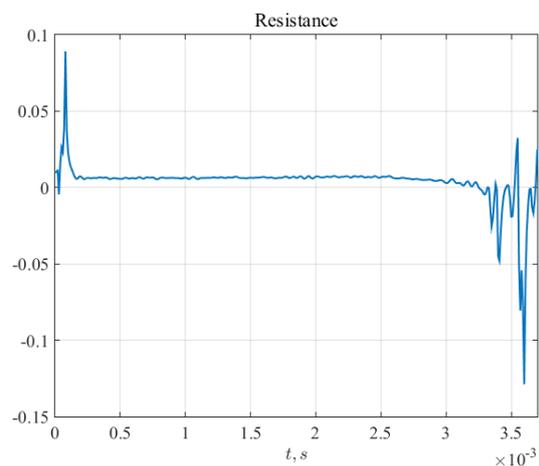


Рис. 2. График оценки общего сопротивления

Как видно из представленных результатов, оцениваемая индуктивность сварочной машины на протяжении всего сварочного процесса остается постоянной кроме начального этапа до 0,1 мс. Начальный этап колебаний оценки вызван неправильным выбором начальных значений при оценивании. График на рис. 2 показывает, что на начальном этапе оценка общего сопротивления имеет колебания, вызванные неправильным выбором начальных значений, далее оценка имеет значение, удовлетворяющее реальному значению общего сопротивления исследуемой сварочной машины. Конечный результат оценивания $R(t)$ после 3 мс. имеет зашумленный вид, что вызвано высоким уровнем помех в источнике тока и низким уровнем полезного сигнала – сварочного тока $I_{св}(t)$. Кроме этого, отрицательные значения оценки общего сопротивления можно объяснить отсутствием ограничений в виде равенств или неравенств на процесс оценивания в структуре фильтра Калмана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen Z., Shi Y., Zha H. Evaluating Technology of Spot Weld Quality for Coated High Strength Steel Sheet Based on Ultrasonic Guide Wave // IEEE Ultrasonics Symposium, 2008.– pp. 406-409.
2. Wen-Ren Y., Chau-Shing W. Current Measurement of Resistance Spot Welding Using DSP // Tamkang Journal of Science and Engineering. – 2011. – № 14. – pp. 33-38.
3. N. Blumentritt, Online control of resistance spot welding by an ultrasonic through transmission technique // Weld. World. – 2002. – № 46. – P. 297–307.
4. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. — М.: Радиотехника, 2003. — 400 с.