

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ СВЕРХМАЛЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СТЫКОВ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ КАК ЗАДАЧА РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЙ ОБЪЕКТА

Е.М. Тарасов, А.Г. Исайчева

Самарский государственный университет путей сообщения

Системы железнодорожной автоматики и телемеханики играют важную роль в перевозочном процессе, обеспечивая безопасность движения поездов, поэтому необходимо исключить отказы и сбои в работе всех её элементов и устройств. В статье рассматривается принцип измерения сопротивлений токопроводящих стыков рельсовых линий, который позволяет проводить измерения и вычисление сопротивлений в широком диапазоне изменения (от десятков микроом до единиц Ом). Представленные математические модели информативных признаков могут быть использованы в автоматизированных комплексах диагностики сопротивлений токопроводящих стыков рельсовых линий магистрального, промышленного железнодорожного транспорта, трамвайных рельсовых линий и метрополитена.

Устройства автоматики и телемеханики являются основными техническими средствами, обеспечивающими автоматическое регулирование и безопасность движения поездов, в которых чувствительным элементом первичного датчика информации о состоянии участков контроля являются рельсовые линии. На электрифицированных железных дорогах в качестве обратного провода, используются рельсовые линии, состоящие в основном из рельсовых звеньев длиной 25 метров, на стыках соединенные между собой накладками затянутыми болтами, а для выравнивания сопротивления стыков, применяются медные стыковые соединители, сечением 70 мм^2 . В условиях обращения на участке тяжеловесных поездов происходит ослабление затяжки болтов, частичный или полный обрыв стыковых соединителей, что приводит к флуктуации электрического сопротивления стыка, и это негативно сказывается на устойчивости работы рельсовых цепей - классификаторов состояний рельсовых линий. С учетом того, что для нормального хода процесса регулирования движения поездов необходимо до минимума исключить отказы и сбои в работе эксплуатируемых устройств автоматики и телемеханики, то становится очевидным важное требование – обеспечение контроля электрического сопротивления токопроводящих стыков (ТПС). Это требование особо важно для диагностики отказов ТПС, отказы которых составляют 15% из всего потока отказов систем автоматики и телемеханики.

С учетом того, что сопротивление исправного токопроводящего стыка находится в пределах $60-300 \times 10^{-6} \text{ Ом}$, ручные измерения требуют значительного времени, обеспечивают невысокую точность и не эффективны в условиях непрерывного движения поездов. В то же время сопротивление стыкового соединителя может расти от 60×10^{-6} до $0,4 \text{ Ом}$, и при достижении последнего, наступает эффект обрыва рельсовой линии сигнальному току, приводящий к появлению информации об отказе систем автоматики и телемеханики [1, 2].

В связи с этим, разработка устройства контроля величины сопротивления токопроводящих стыков, является актуальной проблемой и требует разработки новых принципов измерения сопротивления стыков, распределенных на участке контроля.

В настоящее время очевидна невозможность прямых дистанционных измерений сопротивления токопроводящих стыков из-за незначительности величин сопротивлений (десятки микроом), их распределенности и большого количества – 200 токопроводящих стыков на участке контроля 2500 м.

Косвенное измерение сопротивлений токопроводящих стыков должно осуществляться в процессе функционирования систем интервального управления

движением поездов, когда на рельсовые линии (чувствительный элемент датчика состояния рельсовых линий) поступает только напряжение источника опроса с целью определения их состояний: свободны, заняты или неисправны.

Суть методики косвенного измерения сопротивления стыков малой величины в комплексе устройства контроля состояний рельсовых линий заключается том, что на первом этапе осуществляется обучение решающей функции вычислителя сопротивления ТПС на обучающей выборке известных сопротивлений, характеризующихся совокупностью первичных информативных признаков заранее определенными координатами и дискретным рядом сопротивлений стыков в диапазоне возможных значений, а на втором этапе, с помощью предварительно обученной решающей функции вычислителя координат и сопротивлений стыка микропроцессорное решающее устройство в каждый момент времени достоверно определяет принадлежность результата вычисления к конкретной координате и сопротивлению. И, в этой связи, определение величины сопротивления токопроводящих стыков, в основном, связано с решением задач выделения информативных признаков, связанных сопротивлением ТПС и синтезом правил, на основе которых будет осуществляться отнесение результата вычисления к координате нахождения стыка и его сопротивлению.

Применительно к определению сопротивления стыка и его координаты, в качестве информативных признаков удобно использовать входные и выходные электрические параметры рельсового четырехполюсника, зависящие от состояний внутренних параметров рельсовых линий участка контроля, в том числе и от величины сопротивления ТПС, а именно: амплитуды и фазы напряжения и тока на входе рельсовой линии, а также амплитуды и фазы напряжений на выходе рельсовой линии. Тогда, множества образов, формируемых при указанных признаках, имеют вид:

$$m_j = \{U_{1j}, \varphi_{1j}, I_{1j}, \psi_{1j}, U_{2j}, \varphi_{2j}\}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

При этом необходимо учесть, что элементарный четырехполюсник рельсовой линии $[A_{pL}]$ содержит звено рельсовой линии с распределенными параметрами и элементы токопроводящего стыка со сосредоточенными параметрами, сопротивление которого требуется измерить. Поэтому участки рельсовой линии в схеме замещения (рис.1) [1], необходимо замещать каскадным соединением четырехполюсника звена рельсовой линии $[A_p]$ и четырехполюсником токопроводящего стыка $[A_c]$, в виде

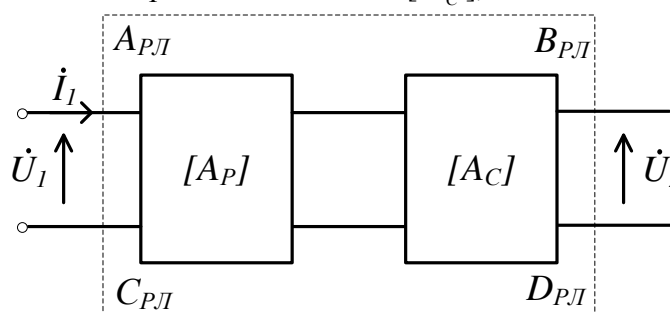


Рисунок 1. Схема замещения рельсового четырехполюсника с токопроводящими стыками: \dot{U}_1, \dot{U}_2 - комплексное значение напряжений на входе и выходе элементарного участка рельсовой линии; \dot{I}_1 - комплексное значение тока на её выходе

Параметры обобщенного четырехполюсника рельсовой линии, участка контроля, образованного n-каскадно-соединенными четырехполюсниками звена рельсовой линии и токопроводящего стыка определяются выражением:

$$A_{pL} = \prod_{i,j=1}^n A_{ij}^p A_{ji}^c,$$

где A_{ij}^p - матрица четырехполюсника рельсового звена; A_{ji}^c - матрица четырехполюсника токопроводящего стыка; n - количество рельсовых звеньев.

Представление рельсовой линии в виде каскадно-соединенных n -четырёхполюсников рельсовых линий с равномерно распределенными параметрами и сосредоточенными параметрами токопроводящего стыка позволяет исследовать влияние измеряемого параметра – токопроводящего стыка на информативные признаки в условиях изменения возмущения в виде флуктуации сопротивления изоляции рельсовых линий в широком диапазоне.

Рельсовые звенья, вследствие контакта с землей и электромагнитного взаимного влияния описываются уравнениями линий с распределенными параметрами [1], где

$$A = D = ch\gamma\ell, B = Z_g sh\gamma\ell, C = sh\gamma\ell / Z_g, \quad (2)$$

$$g = a + jb = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)}, Z_g = \sqrt{\frac{r + j\omega L}{g + j\omega C}}.$$

Матрицы рельсового четырехполюсника $[A_p]$ с учетом (2) и токопроводящего стыка $[A_c]$ имеют вид:

$$[A_p] = \begin{bmatrix} A_p & B_p \\ C_p & D_p \end{bmatrix}, [A_c] = \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{bmatrix}. \quad (3)$$

В этом случае обобщенная матрица рельсовой линии участка контроля, согласно рисунку 1, представляется в виде:

$$\begin{cases} A_{pn} = ch\gamma\ell \cdot A_c + Z_g sh\gamma\ell \cdot C_c, \\ B_{pn} = ch\gamma\ell \cdot B_c + Z_g sh\gamma\ell \cdot D_c, \\ C_{pn} = \frac{1}{Z_g} sh\gamma\ell \cdot A_c + ch\gamma\ell \cdot C_c, \\ D_{pn} = \frac{1}{Z_g} sh\gamma\ell \cdot B_c + ch\gamma\ell \cdot D_c. \end{cases} \quad (4)$$

Математические модели информативных признаков (1) с учетом (2) и (4)

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \frac{E \cdot A_{pn} \cdot Z_n + B_{pn}}{(C_{pn} \cdot Z_n + D_{pn}) \cdot Z_0 + A_{pn} \cdot Z_n + B_{pn}}, \\ \dot{I}_1 &= \frac{E \cdot (C_{pn} \cdot Z_n + D_{pn})}{(C_{pn} \cdot Z_n + D_{pn}) \cdot Z_0 + A_{pn} \cdot Z_n + B_{pn}}, \\ \dot{U}_2 &= \frac{E \cdot Z_n}{(C_{pn} \cdot Z_n + D_{pn}) \cdot Z_0 + A_{pn} \cdot Z_n + B_{pn}}, \end{aligned}$$

где E - источник сигнала опроса рельсовых линий; Z_n, Z_0 - сопротивления нагрузки и ограничителя входного тока рельсового четырехполюсника, соответственно.

Решающую функцию вычислителя сопротивления ТПС $Z_i(X)$ удобно представить в виде полинома вида [3]

$$Z_i(X) = C_1 x_1 + C_2 x_2 + \dots + C_m x_m + C_{m+1} = C_o^T X + C_{m+1}, \quad (5)$$

где x_1, x_2, \dots, x_m - информативные признаки, X – вектор информативных признаков, $C_o = (C_1, C_2, \dots, C_m)^T$ – транспонированный вектор коэффициентов.

В процессе построения решающей функции вычислителя вида (5) основная задача заключается в том, чтобы найти весовые коэффициенты полинома, удовлетворяющие требованиям обученного вычислителя сопротивления токопроводящего стыка по

идентификации дискретного ряда сопротивлений стыков в диапазоне возможных значений.

Один из возможных путей решения этой задачи – использование методов обучения [3, 4]. Обучение вычислителя (нахождение коэффициентов полинома вычислителя) можно осуществить методом решения системы условных уравнений [5] воспользовавшись приемами из теории интерполяции. Для этого всю систему уравнений необходимо записать в матричной форме в виде $XC = Z$ [6], где $C = K^{-1}XTZ$, где XT – транспонированная матрица X ; K^{-1} – обратная матрица произведения, $K = XTX$, равная $K^{-1} = (XTX)^{-1}$.

В результате получим единственную восстановленную по данным, математического моделирования функцию, имеющую минимальную погрешность определения сопротивления ТПС.

Очевидно, полученный полином должен обладать толерантностью к «полевым» данным, не попавшим в процедуру обучения функции вычислителя, которая проверяется на контрольной выборке экспериментальных данных. В случае если погрешность вычисления сопротивления решающей функцией в пространстве «полевых» данных значительна и результаты попадают в соседние дискретные значения сопротивлений ТПС, то очевидно необходимо усложнить решающую функцию и повторить процедуру обучения вычислителя.

Рассмотренный принцип измерения сопротивлений токопроводящих стыков рельсовых линий реализуем, позволяет проводить измерения и вычисление сопротивлений в широком диапазоне изменения (от десятков микроом до единиц Ом), и может быть использован в автоматизированных комплексах диагностики сопротивлений токопроводящих стыков рельсовых линий магистрального, промышленного железнодорожного транспорта, трамвайных рельсовых линий и метрополитена.

Исследования относительной погрешности косвенного измерения сопротивления токопроводящих стыков обученной функцией вычислителя показали, что величина относительной погрешности зависит от сложности функции и количества признаков в функциях вычислителя. Так компьютерное моделирование измерения сопротивления ТПС восстановленной функцией вычислителя, показало, что максимальная относительная погрешность наблюдается при определении сопротивления ТПС в области малых значений сопротивлений $\delta(Z_{i_{max}}) = 3,94\%$, расположенных ближе к источнику сигнала опроса рельсовых линий, а минимальная погрешность $\delta(Z_{i_{min}}) = 0,869\%$ у ТПС, расположенных на выходе участках контроля.

Литература

1. Брылеев А.М., Кравцов Ю.А., Шишляков А.В. Теория, устройство и работа рельсовых цепей. – М.: Транспорт, 1978. – 344 с.
2. Дмитренко И.Е. Техническая диагностика и автоконтроль систем железнодорожной автоматики и телемеханики. – М.: Транспорт, 1986. – 144 с.
3. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1978. – 412 с.
4. Патент РФ №2173276 Способ контроля состояния рельсовой линии / Тарасов Е.М., Белоногов А.С. – Заявл. 31.05.99, Оpubл. Б.И. 2001, № 25, МКИ В61L 23/16.
5. Тарасов Е.М. Принципы разделения пространства образов на классы решающими функциями // Известия Самарского научного центра РАН, Спецвыпуск, Самара, 2003, С. 78-83.
6. Тарасов Е.М. Методика определения коэффициентов полиномиальной решающей функции // Вестник Самарского муниципального института управления. – Самара: СМИУ, 2012. – № 3 (22), С. 48-56.
7. Тарасов Е.М., Якобчук А.И. Обобщенная структура устройства мониторинга и диагностики // Вестник Самарского муниципального института управления. – Самара: СМИУ, 2011. – № 2 (17), С. 164-170.