

МАТРИЦА ПАРАМЕТРОВ НЕСИММЕТРИЧНОЙ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ С n - ПОЛЮСНОЙ СХЕМОЙ ЗАМЕЩЕНИЯ

Д.В. Железнов, Е.М. Тарасов, А.Г. Исайчева

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия

В статье рассматривается математическая модель рельсовых линий с n -полюсной схемой замещения. При наличии поперечной и продольной асимметрии в рельсовых линиях использовать математические модели с четырехполюсной схемой замещения невозможно, поэтому в работе предложена математическая модель с многополюсной схемой замещения. Получена результирующая матрица A – параметров схемы замещения, являющаяся основой математической модели рельсовой цепи.

Ключевые слова: математическая модель, схема замещения, рельсовая линия, четырехполюсник, многополюсник, матрица, рельсовая цепь, напряжение, ток.

Введение

Системы интервального управления движения поездов базируются на информации классификаторов состояний рельсовых линий, которые, в свою очередь, получают информацию о свободном, занятом, исправном или неисправном состояниях рельсовых линий (РЛ) от рельсовых цепей – датчиков первичной информации. Состояние РЛ обладает рядом различительных признаков, характер изменения которых удобнее всего проанализировать на математической модели рельсовой цепи (РЦ), а для этого необходимо разработать математические модели структурных элементов РЦ в виде n – полюсной схемы замещения.

1. Постановка задачи

При формировании математических моделей РЦ рассматривается как каскадное соединение устройства согласования и защиты аппаратуры в начале РЛ, устройства согласования и защиты аппаратуры в конце РЛ и самой РЛ [1].

Расчет электрических параметров РЦ основывается на ее представлении в виде двухпроводной или трехпроводной электрической линии с распределенными параметрами.

Аналитические методы расчета, используемые в настоящее время с двухпроводной схемой замещения РЛ, дают удовлетворительные результаты для симметричных РЛ, но не могут обеспечить требуемой точности при наличии асимметрий. На электрифицированных участках к одной из рельсовых нитей присоединяются опоры контактной сети, и эквивалентная проводимость изоляции может оказаться выше $1,0 \text{ См/км}$ вследствие утечки сигнального тока через заземление опор, что приводит к поперечной асимметрии схемы, обрыв токопроводящих соединителей приводит к различию сопротивлений рельсовых нитей и появляется продольная асимметрия [2-4], поэтому для анализа и синтеза состояний РЛ необходимо разработать математические модели, описывающие процессы асимметрии. Для учета продольной и поперечной асимметрии дискретный участок РЛ необходимо представлять в виде трехпроводной схемы замещения, представленной на рис 1.

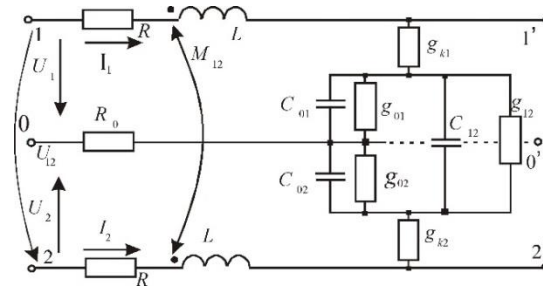


Рис. 1. Трехпроводная схема замещения участка рельсовой линии: M_{12} – взаимная индуктивность между рельсовыми нитями; g_{k1}, g_{k2} – проводимости слоя рельс – накладка; g_{01}, g_{02} – удельные проводимости заземления рельсовых нитей; g_{12} – удельная проводимость верхнего слоя балласта и шпал; C_{01}, C_{02} – емкости двойного слоя: рельс – накладка – рельс; R_0 – сопротивление земляного тракта

2. Матрица параметров несимметричной трехпроводной рельсовой линии

Схему замещения рельсовой линии представим в виде n - полюсного многополюсника (рис. 2):



Рис. 2. Многополюсная схема замещения участка рельсовой линии

Матрица параметров линейного пассивного неавтономного шестиполюсника РЛ имеет размерность равную четырем [5]. С целью получения симметричной структуры матрицы выбран следующий вид записи системы линейных уравнений, определяющих коэффициенты матрицы A – параметров

$$\begin{cases} U_1 = a_{11}U_3 + a_{12}I_3 + a_{13}I_4 + a_{14}U_4, \\ I_1 = a_{21}U_3 + a_{22}I_3 + a_{23}I_4 + a_{24}U_4, \\ I_2 = a_{31}U_3 + a_{32}I_3 + a_{33}I_4 + a_{34}U_4, \\ U_2 = a_{41}U_3 + a_{42}I_3 + a_{43}I_4 + a_{44}U_4. \end{cases}$$

Для определения A – параметров системы РЛ представлена в виде большого числа элементарных участков длиной dx каждый, в пределах которого схема замещения может быть представлена набором типовых дискретных полиномов.

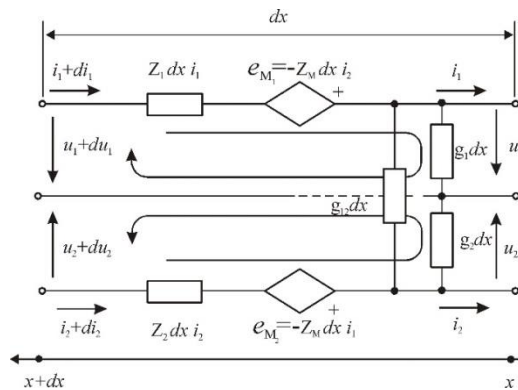


Рис. 3. Трехпроводная схема замещения элементарного участка рельсовой линии

Система уравнений токов и напряжений, в соответствии с направлениями токов и напряжений имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{du_1}{dx} = z_1 i_1 + z_M i_2, \\ \frac{di_1}{dx} = (g_1 + g_{12}) u_1 - g_{12} u_2, \\ \frac{di_2}{dx} = -g_{12} u_1 + (g_2 + g_{12}) u_2, \\ \frac{du_2}{dx} = z_M i_1 + z_2 i_2. \end{cases}$$

Общее решение для напряжения $U_1(x)$ (рис. 3) описывается выражением

$$u_1(x) = A_1 \operatorname{ch} \gamma_1 x + A_2 \operatorname{sh} \gamma_1 x + A_3 \operatorname{ch} \gamma_2 x + A_4 \operatorname{sh} \gamma_2 x,$$

где $\gamma_1 = \sqrt{a_2 - \sqrt{a_2^2 - a_0}}$; $\gamma_2 = \sqrt{a_2 + \sqrt{a_2^2 - a_0}}$,

$$a_0 = (z_1 z_2 - z_M^2)(g_1 g_2 + g_1 g_{12} + g_2 g_{12});$$

$$a_2 = \frac{1}{2} [g_{12} \cdot (z_1 + z_2 - 2z_M) + g_1 z_1 + g_2 z_2].$$

A_1, A_2, A_3, A_4 – произвольные постоянные, зависящие от граничных условий задачи. Для каждой корректно поставленной задачи величины $U_1(x), U_2(x), I_1(x), I_2(x)$ можно выразить через значения этих постоянных, некоторые дополнительные коэффициенты h_1, h_2 и квадратную матрицу второго порядка $[y_{ij}] \ i \in 1..2; j \in 1..2$

$$\begin{aligned} u_2(x) &= h_1 (A_1 \operatorname{ch} \gamma_1 x + A_2 \operatorname{sh} \gamma_1 x) + h_2 (A_3 \operatorname{ch} \gamma_2 x + A_4 \operatorname{sh} \gamma_2 x) \\ i_1(x) &= y_{11} (A_1 \operatorname{sh} \gamma_1 x + A_2 \operatorname{ch} \gamma_1 x) + y_{12} (A_3 \operatorname{sh} \gamma_2 x + A_4 \operatorname{ch} \gamma_2 x), \\ i_2(x) &= y_{21} (A_1 \operatorname{sh} g_1 x + A_2 \operatorname{ch} g_1 x) + y_{22} (A_3 \operatorname{sh} g_2 x + A_4 \operatorname{ch} g_2 x), \end{aligned}$$

где $y_{ij} = \frac{1}{z_1 z_2 - z_M^2} \begin{pmatrix} \gamma_1 (z_2 - h_1 z_M) & \gamma_2 (z_2 - h_2 z_M) \\ \gamma_1 (h_1 z_1 - z_M) & \gamma_2 (h_2 z_1 - z_M) \end{pmatrix}$

$$h_1 = \frac{\gamma_1^2 - z_1 (g_1 + g_{12}) + z_M g_{12}}{z_M (g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}};$$

$$h_2 = \frac{\gamma_2^2 - z_1 (g_1 + g_{12}) + z_M g_{12}}{z_M (g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}}.$$

В приведенных выше уравнениях допустим, что $x = l$, (l – длина линии), тогда получим

$$\begin{cases} I_1 = y_{11} S_1 A_1 + y_{11} C_1 A_2 + y_{12} S_2 A_3 + y_{12} C_2 A_4, \\ I_2 = y_{21} S_1 A_1 + y_{21} C_1 A_2 + y_{22} S_2 A_3 + y_{22} C_2 A_4, \\ U_1 = C_1 A_1 + S_1 A_2 + C_2 A_3 + S_2 A_4, \\ U_2 = h_1 C_1 A_1 + h_1 S_1 A_2 + h_2 C_2 A_3 + h_2 S_2 A_4, \end{cases} \quad (1)$$

где $S_1 = \text{sh}(\gamma_1 l)$, $C_1 = \text{ch}(\gamma_1 l)$, $S_2 = \text{sh}(\gamma_2 l)$, $C_2 = \text{ch}(\gamma_2 l)$.

Выразив параметры A_1, A_2, A_3, A_4 , через U_3, U_4, I_3, I_4 , получим

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{U_3 h_2 - U_4}{h_2 - h_1}; \quad A_2 = \frac{I_3 y_{22} - I_4 y_{12}}{d}; \\ A_3 &= \frac{U_4 - U_3 h_1}{h_2 - h_1}; \quad A_4 = \frac{I_4 y_{11} - I_3 y_{21}}{d}. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставляя значения A_1, A_2, A_3, A_4 , определенные по формулам (2) в правую часть соотношений (1), и проведя группировку по U_3, U_4, I_3, I_4 , получим формулы для вычисления коэффициентов матрицы A – параметров исследуемой длинной трехпроводной электрической линии.

Окончательный вид матрицы A – параметров несимметричной рельсовой линии с n - полюсной схемой замещения в символьном виде имеет вид (3).

Математические модели РЦ, зависят от конфигурации и вида схемы замещения и получаются перемножением матриц $[A]$ параметров устройств согласования в начале и в конце РЛ и матрицы (3), согласно выбранных схем замещения [6]. Параметрическая математическая модель РЦ, согласно схемы замещения (рис. 1)

$$[A]_N = [A]_{УСН} \cdot [A] \cdot [A]_{УСК}, \quad (3)$$

где $[A]_{УСН}$, $[A]_{УСК}$ – матрицы согласующих устройств в начале и конце РЛ, $[A]$ - соответствует матрице (3).

Таким образом, математическая модель вида (4) позволяет исследовать процесс распространения сигнала по рельсовым линиям и в земляном тракте, моделировать продольную асимметрию вследствие неравенства сопротивлений токопроводящих стыков, приводящих к разности сопротивлений рельсовых нитей.

$$[A] = \begin{vmatrix} \frac{h_2 C_1 - h_1 C_2}{h_2 - h_1} & \frac{y_{22} S_1 - y_{21} S_2}{d} & \frac{y_{11} S_2 - y_{12} S_1}{d} & \frac{C_2 - C_1}{h_2 - h_1} \\ \frac{h_2 y_{11} S_1 - h_1 y_{12} S_2}{h_2 - h_1} & \frac{y_{11} y_{22} C_1 - y_{12} y_{21} C_2 y_{11} y_{12} (C_2 - C_1)}{d} & \frac{y_{12} S_2 - y_{11} S_1}{h_2 - h_1} \\ \frac{h_2 y_{21} S_1 - h_1 y_{22} S_2}{h_2 - h_1} & \frac{y_{21} y_{22} (C_1 - C_2)}{d} & \frac{y_{11} y_{22} C_1 - y_{12} y_{21} C_2 y_{22} S_2 - y_{21} S_1}{d} & \frac{C_2 - C_1}{h_2 - h_1} \end{vmatrix} \quad (4)$$

Выводы

Наличие поперечной и продольной асимметрии РЛ делает невозможным использование четырехполосных схем замещения РЛ, не учитывающих земляной тракт передачи сигнала. Это обусловило необходимость разработки математических моделей РЛ в виде n – полюсных схем.

Разработанные математические модели, представлены совокупностью матриц параметров элементов РЦ, включая матрицу $[A]$ параметров n – полюсных схем замещения РЛ, и они позволяют гибко изменять схемы замещения в зависимости от конфигурации РЦ и проводить анализ любых видов РЦ, изменения напряжений, токов, их фазовых соотношений во всех точках РЦ, определять области существования электрических параметров рельсового многополюсника.

Литература

1. Брылеев, А.М. Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А.М. Брылеев, Ю.А. Кравцов, А.В. Шишляков - М.: Транспорт, 1978.-344с.
2. Тарасов, Е.М. Методика измерений сверхмалых сопротивлений токопроводящих стыков рельсовых линий как задача распознавания объекта / Е.М. Тарасов, А.Г. Исайчева // Информационные технологии и нанотехнологии: сб. научн. трудов по материалам международной научно-практической конференции, 29 июня - 01 июля 2015. – СГАУ:Самара – С. 431-433.
3. Железнов, Д.В. Концепция мониторинга и диагностика состояний токопроводящих стыков / Д.В. Железнов, А.Г. Исайчева // Вестник транспорта Поволжья. - 2015. - №4(52). - С.15-17. ISSN 1997-0722.
4. Тарасов, Е.М. Удаленный контроль технического состояния рельсовых линий на магистральных железных дорогах / Е.М. Тарасов, В.А. Загорский, А.Г. Исайчева // Наука и образование транспорту: сб.научн. трудов по материалам международной научно-практической конференции 21-23 октября 2015. - СамГУПС:Самара - С.144-146.
5. Математическое моделирование рельсовых цепей с распределенными параметрами рельсовых линий / Е.М Тарасов. – Самара: СамГАПС, 2003.-118с.
6. Принципы распознавания в классификаторах состояний рельсовых линий / Е.М. Тарасов. – М.: Маршрут, 2003. – 156 с.