

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОДОВОЙ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ

Розроблена математична модель, яка дозволила дати наукове обґрунтування автоматизованому методу визначення параметрів рейкового кола по величині ЕРС, наведених в приймальних котушках локомотива, яка пропорційна струму в рейках. Для реалізації запропонованого методу визначення параметрів рейкового кола був розроблений апаратно-програмний комплекс, який встановлюється на базі вагона-лабораторії.

Разработана математическая модель, которая позволила дать научное обоснование автоматизированному методу определения параметров рельсовой цепи по величине ЭДС, наведенной в приемных катушках локомотива, которая пропорциональна току в рельсах. Для реализации предложенного метода определения параметров рельсовой цепи был разработан аппаратно-программный комплекс, который устанавливается на базе вагона-лаборатории.

The mathematic model, which is allowed us to give a scientific substantiation to the automated method of definition of parameters of a rail circuit on electro-motive force in locomotive coils proportional to a current in rails, was elaborated. The hardware-software complex was developed to realization of proposed method of definition of parameters of rail circuit. It is established on the base of car - laboratory.

### Введение

Используемые в настоящее время методы определения параметров рельсовых цепей (РЦ) основаны на измерениях в интервалах между движущимися поездами. Первичные параметры определяют на основании измерений входного сопротивления рельсовой цепи, которое получают при оценке известных зависимостей между ее напряжениями и токами в начале и конце рельсовой цепи. Вторичные параметры определяют по найденным значениям первичных параметров рельсовой цепи. Такие измерения связаны с выходом на поле и влекут за собой значительные трудовые и временные затраты.

Перспективными являются методы, основанные на определении параметров рельсовой цепи с помощью измерительной аппаратуры установленной на базе вагона-лаборатории, поскольку не требуют выделения специального времени для проверки (окон) и отключения аппаратуры рельсовых цепей и контактной сети. Первичные и вторичные параметры линии определяются по значениям амплитуды и фазы тока локомотивной сигнализации в рельсовой цепи и сопротивлению, которое полагается известным. Значения тока в рельсах могут быть получены в результате измерений с помощью аппаратуры, установленной на базе вагона-лаборатории. Определение фазы сигнального тока вызывало определенные трудности, поэтому большинство из этих методов реализованы не были. К тому же нередко они давали погрешность до 100 %.

Следует отметить, что метрологические свойства этих методов исследованы недостаточно, а при их разработке не были учтены все факторы, влияющие на точность измерений, например погрешности измерений тока локомотивной сигнализации и ординаты рельсовой линии. Следовательно, существует необходимость в разработке метода и устройства для определения параметров тока локомотивной сигнализации и первичных и вторичных параметров рельсовой цепи на базе вагона-лаборатории.

Таким образом, целью работы является разработка метода определения первичных и вторичных параметров кодовых рельсовых цепей с помощью оборудования, установленного на базе вагона-лаборатории «Автоматика, телемеханика и связь».

### Математическая модель

Для реализации поставленной задачи, которая заключается в автоматизированном определении параметров рельсовой цепи, необходимо проработать вопросы, которые включают в себя следующую последовательность операций (рис. 1). В начале измеряется ЭДС локомотивных катушек. По величине ЭДС определяются значения кодового тока в начале и конце рельсовой цепи. Далее по величине тока локомотивной сигнализации можно определить первичные и вторичные параметры рельсовой цепи.

Рассмотрим вопрос определения электродвижущей силы в приемной локомотивной катушке. В системе автоматической локомотив-

ной сигнализации (АЛС) существует непрерывная связь между путевыми и локомотивными устройствами. Приемные катушки АЛС связаны индуктивно с током в рельсах, посредством магнитного поля, которое образуется вокруг них. Таким образом, в пределах каждой рельсовой цепи имеется отдельный канал связи.



Рис. 1. Последовательность операций для определения параметров рельсовой цепи

Ток  $I_{\text{АЛС}}$  в канале связи, образованном рельсами и колесной парой, протекает в противоположном направлении под каждой из приемных локомотивных катушек (ПК1, ПК2), которые включены между собой последовательно встречно. В результате суммарная наведенная в приемных катушках ЭДС равна

$$\dot{E} = \dot{E}_1 + \dot{E}_2, \quad (1)$$

где  $\dot{E}_1, \dot{E}_2$  - ЭДС, наведенные в приемных катушках ПК1 и ПК2 соответственно.

Без учета эффекта запаздывания волны и включая во внимание то, что поперечное сечение сердечника имеет форму квадрата, действующее значение ЭДС в каждой из приемных катушек может быть определено по формуле

$$E = -\frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot I_m}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot R} \cdot \omega \cdot S, \quad (2)$$

где  $\mu$  - магнитная проницаемость среды (стали сердечника), Гн/м;  $\mu_0$  - магнитная постоянная, Гн/м;  $R$  - расстояние от излучающего проводника до точки в пространстве, м,  $I_m$  - амплитудное значение тока локомотивной сигнализации под приемной катушкой локомотива, А,  $\omega$  - угловая частота, рад/с,  $S$  - площадь поперечного сечения сердечника, м<sup>2</sup>.

Относительная погрешность между измеренными и рассчитанными данными в соответствии с полученной зависимостью между током локомотивной сигнализации и ЭДС (2) не превышает  $\pm 3,5$  %. Полученная зависимость может быть использована при определении параметров рель-

совой цепи с помощью аппаратно-программного комплекса установленного на базе вагона-лаборатории [1], в котором датчиками информации являются локомотивные катушки.

Для определения параметров рельсовой цепи с помощью аппаратно-программного комплекса установленного на базе вагона-лаборатории воспользуемся схемой замещения канала АЛС, приведенной на рис. 1. На схеме показаны четырехполюсники питающего конца рельсовой цепи Н, который задан коэффициентами  $A_H, B_H, C_H, D_H$ , и рельсовой линии РЛ, сопротивление поездного шунта  $R_{\text{ш}}$ , приемные катушки подвижного состава ПК1 и ПК2, которые позволяют передавать информацию из рельсовой линии в аппаратно-измерительный комплекс (АИК) для контроля параметров тока локомотивной сигнализации и определения первичных и вторичных параметров рельсовой цепи. Четырехполюсник РЛ имеет переменное сопротивление, поскольку при движении подвижного состава от релейного к питающему концу рельсовой цепи сопротивление рельсовых нитей  $Z_p = R_p \cdot l + j \cdot X_p \cdot l$ , где  $R_p$  и  $X_p$  - удельное активное и индуктивное сопротивление рельсовой нити, а  $l$  - расстояние от питающего конца рельсовой цепи до приемных катушек локомотивной сигнализации, и сопротивление изоляции  $Z_{\text{из}}$  будут изменяться. Также на схеме замещения показаны напряжения и токи  $\dot{U}, \dot{I}$  и  $\dot{U}_n, \dot{I}_n$  соответственно на входе и выходе четырехполюсника Н. В зависимости от положения ключа К аппаратно-измерительный комплекс может записывать и контролировать параметры тока локомотивной сигнализации по результатам измерения ЭДС с одной или двух приемных катушек.

Схема замещения четырехполюсника питающего конца кодовой рельсовой цепи Н приведена на рис. 3, где  $C_0$  - емкость ограничителя,  $Z_0$  - сопротивление ограничителя типа РОБС-3А, ДТ - дроссель-трансформатор [2].

Связь между напряжениями и токами в начале  $\dot{U}, \dot{I}$  и конце  $\dot{U}_n, \dot{I}_n$  четырехполюсника питающего конца рельсовой цепи можно представить в виде системы уравнений [2]:

$$\begin{cases} \dot{U} = A_H \cdot \dot{U}_n + B_H \cdot \dot{I}_n \\ \dot{I} = C_H \cdot \dot{U}_n + D_H \cdot \dot{I}_n \end{cases}, \quad (3)$$

Схема рельсового четырехполюсника (РЛ) для режима локомотивной сигнализации приведена на рис. 4, на которой показаны  $\dot{U}_n, \dot{I}_n$

напряжение и ток на входе рельсовой линии, подаваемые с выхода четырехполюсника питающего конца рельсовой цепи, а  $\dot{U}_{алс}$ ,  $\dot{I}_{алс}$  — напряжение и ток на выходе РЛ. При чем напряжение на выходе рельсового четырехполюсника равно  $\dot{U}_{алс} = R_{ш} \cdot \dot{I}_{алс}$ . Связь между напряже-

ниями и токами в начале и конце рельсовой линии описывается системой уравнений

$$\begin{cases} \dot{U}_n = A \cdot \dot{U}_{алс} + B \cdot \dot{I}_{алс} \\ \dot{I}_n = C \cdot \dot{U}_{алс} + D \cdot \dot{I}_{алс} \end{cases}, \quad (4)$$

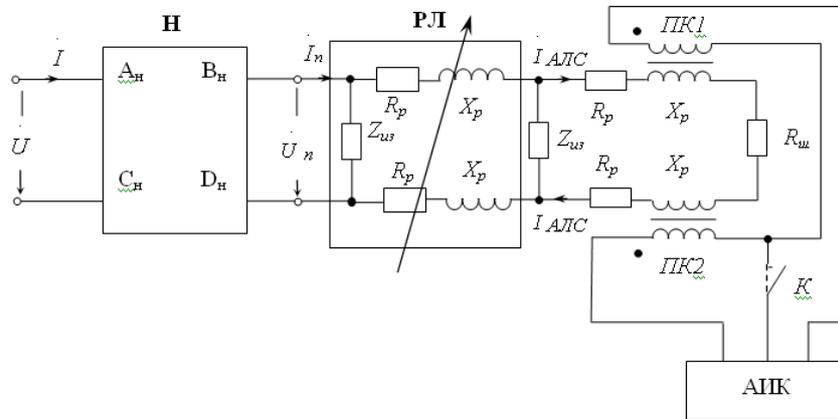


Рис. 2. Схема замещения канала системы контроля параметров тока локомотивной сигнализации

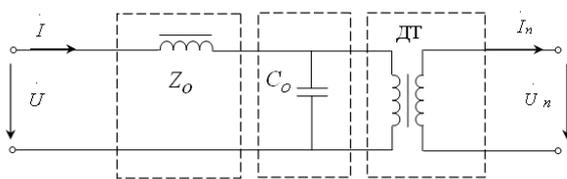


Рис. 3. Схема замещения четырехполюсника питающего конца кодовой рельсовой цепи

Учитывая, что  $\dot{U}_{алс} = R_{ш} \cdot \dot{I}_{алс}$ , получим

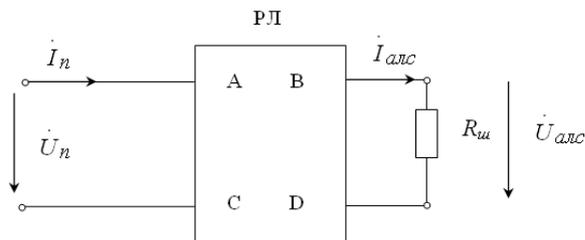


Рис. 4. Четырехполюсник рельсовой линии

$$\begin{aligned} \dot{I}_n &= C \cdot \dot{U}_{алс} + D \cdot \dot{I}_{алс} = C \cdot \dot{I}_{алс} \cdot R_{ш} + D \cdot \dot{I}_{алс} = \\ &= \frac{1}{R_{ш}} \cdot \dot{I}_{алс} \cdot R_{ш} + D \cdot \dot{I}_{алс} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_n &= A \cdot \dot{U}_{алс} + B \cdot \dot{I}_{алс} = A \cdot \dot{I}_{алс} \cdot R_{ш} + B \cdot \dot{I}_{алс} = \\ &= \dot{I}_{алс} \cdot (R_{ш} \cdot A + B) \end{aligned}$$

$$\dot{I}_n = \dot{I}_{алс} (1 + D) = \dot{I}_{алс} \left( 2 + \frac{Z \cdot (l - x)}{R_{ш}} \right), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_n &= \dot{I}_{алс} \cdot \left( R_{ш} \cdot \left( 1 + \frac{Z \cdot x}{R_{ш}} \right) + Z \cdot x \right) = \\ &= \dot{I}_{алс} \cdot (R_{ш} + 2 \cdot Z \cdot x) \end{aligned} \quad (6)$$

Итак, получена связь между напряжением и током на питающем конце рельсовой цепи  $\dot{U}_n$ ,  $\dot{I}_n$  и током  $\dot{I}_{алс}$ , который протекает под приемными катушками локомотива.

По определению условий работы рельсовой линии в режиме АЛС напряжение в начале линии равно минимальному напряжению путевого трансформатора, то есть  $U_n = U_{мин}$ . Величина минимального напряжения путевого трансформатора определяется из регулировочных таблиц [3].

В результате математических преобразований было получено, что полное сопротивление рельсовой линии равно

$$Z = \frac{U_{мин} - I_k \cdot R_{ш}}{2 \cdot I_k}, \quad (7)$$

Волновое сопротивление рельсовой цепи равно

$$Z_B = \sqrt{Z \cdot R_{ш}}. \quad (8)$$

Коэффициент распространения волны равен

$$\gamma = \frac{\text{arcsch}(\sqrt{Z_B \cdot R_{ш}})}{l}, \quad (9)$$

Входное сопротивление рельсовой цепи в зависимости от расстояния между питающим концом и поездом определяется выражением

$$Z_{\text{вх}}(l) = \sqrt{Z(l) \cdot R_{\text{ш}}}, \quad (10)$$

Проводимость изоляции рельсовой линии может быть определена следующим образом

$$Y_{\text{из}} = \frac{\gamma(l)^2}{z \cdot l}, \quad (11)$$

где  $z$  - удельное сопротивление рельсовой линии, Ом/км.

Таким образом, разработана математическая модель для косвенного определения параметров рельсовой цепи по величине ЭДС, наведенной в приемных катушках локомотива, которая пропорциональна току в рельсах.

### Результаты моделирования

Сравнительная оценка рассчитанных и экспериментальных значений тока локомотивной сигнализации, входного сопротивления рельсовой цепи, проводимости изоляции и коэффициента затухания в зависимости от координаты

кодовой рельсовой цепи 50 Гц показала, что относительная ошибка между рассчитанными с помощью предложенного метода и измеренными данными не превышает 10 %.

Значения первичных и вторичных параметров рельсовой цепи, полученные в результате расчетов по разработанной математической модели и экспериментальных исследований, приведены в табл. 1. Ввиду сложности проведения измерений в условиях эксплуатации, связанных с необходимостью организации «окон», отключения аппаратуры рельсовых цепей, а также ввиду зависимости первичных и вторичных параметров рельсовых цепей от погодных условий, для проверки адекватности разработанного метода определения была использована физическая модель.

В результате предложенная математическая модель позволила дать научное обоснование методу определения параметров рельсовой цепи, который включает в себя измерение ЭДС в приемных катушках локомотива и вычисление тока локомотивной сигнализации по ее значению и определение параметров рельсовой цепи по значениям тока в рельсах.

Таблица 1

Значение первичных и вторичных параметров кодовой рельсовой цепи 50 Гц

Расстояние от питающего конца рельсовой цепи до локомотивных катушек, $l$ км	Ток локомотивной сигнализации $I_{\text{алс}}$			Входное сопротивление рельсовой цепи			Проводимость изоляции рельсовой цепи			Коэффициент распространения волны		
	расчетное значение, А	измеренное значение, А	относительная ошибка, %	расчетное значение, Ом	измеренное значение, Ом	относительная ошибка, %	расчетное значение, См	измеренное значение, См	относительная ошибка, %	расчетное значение	измеренное значение	относительная ошибка, %
0	10,00	10,00	0	0,67	0,70	3,72	0,14600	0,15000	2,67	1,016	1,000	1,638
0,2	9,32	9,50	1,91	0,70	0,70	0,25	0,03400	0,03500	2,86	0,517	0,500	3,426
0,4	8,69	8,50	2,18	0,72	0,70	3,34	0,01400	0,01500	6,67	0,351	0,350	0,232
0,6	8,09	8,00	1,17	0,75	0,75	0,08	0,00739	0,00750	1,49	0,268	0,260	2,974
0,8	7,54	7,50	0,57	0,78	0,78	0,47	0,00441	0,00450	2,09	0,218	0,220	0,935
1	7,03	7,00	0,43	0,80	0,80	0,53	0,00285	0,00280	1,82	0,185	0,180	2,672
1,2	6,55	6,50	0,78	0,83	0,83	0,39	0,00195	0,00200	2,40	0,161	0,160	0,737
1,4	6,11	6,00	1,77	0,86	0,86	0,36	0,00139	0,00140	0,57	0,144	0,140	2,503
1,6	5,69	5,50	3,45	0,89	0,90	0,64	0,00103	0,00100	2,50	0,130	0,130	0,161
1,8	5,30	5,30	0,06	0,93	0,95	2,49	0,00077	0,00080	3,29	0,119	0,120	0,954
2	4,94	5,00	1,16	0,96	0,95	1,01	0,00060	0,00060	0,70	0,110	0,110	0,058
2,2	4,61	4,50	2,36	0,99	1,00	0,59	0,00047	0,00048	2,81	0,103	0,100	2,537
2,4	4,29	4,30	0,19	1,03	1,00	2,99	0,00037	0,00036	2,89	0,096	0,095	1,369
2,6	4,00	4,10	2,44	1,07	1,10	3,01	0,14600	0,15000	2,67	1,016	1,000	1,638

### Аппаратно-программный комплекс

Для реализации предложенного автоматизированного метода определения параметров

рельсовой цепи был разработан аппаратно-программный комплекс, который устанавливается на базе вагона-лаборатории «Автоматика, телемеханика и связь». Комплекс предназначен для измерения амплитуды кодового тока и вре-

менных параметров числового кода автоматической локомотивной сигнализации, тока асимметрии, параметров рельсовой цепи, ее координаты, контроля проезда изолирующих стыков, определения спектрального состава обратного тягового тока и регистрации результатов измерений.

Анализ литературных источников [4-6], а также разработанная математическая модель позволила сформулировать требования, которые предъявляются к автоматизированному аппаратно-программному комплексу: измерение электродвижущей силы в приемных катушках локомотива в диапазоне от 0 до 5 В; измерение тока кодовых сигналов частотой 25, 50 и 75 Гц в рельсовых цепях в диапазоне от 1 до 35 А; измерение длительности сигналов от 0,08 до 0,6 с с точностью не ниже  $\pm 0,01$  с для кодовых сигналов частотой 50 и 75 Гц и  $\pm 0,02$  с – для кодовых сигналов частотой 25 Гц; измерение перерыва в кодировании от 2 до 9,99 с; измерение координаты рельсовой цепи от 0 до 4000 м; реализация полосовой фильтрации сигнала, записанного с катушек локомотивной сигнализации. Для фильтра 50 Гц полоса пропускания фильтра должна лежать в пределах от 43 до 57 Гц, для фильтра 75 Гц – от 65 до 87 Гц, для фильтра 25 Гц – от 20 до 31 Гц; определение спектрального состава обратного тягового тока в диапазоне от 0 до 20 кГц.

Разработанная измерительная система реализована в виде приставки к персональному компьютеру типа IBM PC. Она осуществляет цифровую обработку сигнала и содержит следующие основные узлы: блок согласования, аналого-цифровой преобразователь, мультиплексоры, генератор тактовых импульсов, программируемый таймер, регистры данных и управления.

### Выводы

Разработана математическая модель, которая позволила дать научное обоснование методу определения параметров рельсовой цепи по величине ЭДС, наведенной в приемных катушках локомотива, которая пропорциональна току

в рельсах. Для реализации предложенного автоматизированного метода определения параметров рельсовой цепи был разработан аппаратно-программный комплекс, который устанавливается на базе вагона-лаборатории «Автоматика, телемеханика и связь». Была выполнена сравнительная оценка рассчитанных и экспериментальных значений тока локомотивной сигнализации, входного сопротивления рельсовой цепи, проводимости изоляции и коэффициента затухания в зависимости от координаты кодовой рельсовой цепи 50 Гц, которая показала, что относительная ошибка не превышает 10 %.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сердюк Т. Н. Автоматизированная система для контроля параметров кодового тока в рельсах / Т. Н. Сердюк, В. И. Гаврилюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: ДПТ, 2004. – Вип. 3. – С. 15-20.
2. Путевая автоблокировка и авторегулировка. Котляренко и др. – М.: Транспорт, 1983. – 408 с.
3. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: Справочник / В. С. Аркатов, Н. Ф. Котляренко, А. И. Баженов, Т. Л. Лебедева / Под ред. В. С. Аркатова. – М.: Транспорт, 1982. – 360 с.
4. Інструкція про порядок користування автоматичною локомотивною сигналізацією безперервного типу (АЛС) і пристроями контролю пильності машиніста на залізницях України: ЦТ-ЦШЕОТ-0027: Затв. Наказом Міністерства транспорту України 27.01.2000. – К., 2000. – 30 с.
5. Аппаратура «Контроль». Техническое описание и инструкция по эксплуатации: 8402 ТО: Минва путей сообщения СССР. – М., 1988. – 120 с.
6. Методика выполнения измерений параметров кодов АЛСН в вагоне-лаборатории Приднепровской ж. д.: Утв. Службой сигнализации и связи Приднепровской ж. д. 08.05.2003. – Д., 2003. – 27 с.

Поступила в редакцию 19.09.2007.