**КОНТРОЛЬ ЦЕЛОСТНОСТИ РЕЛЬСОВ МЕТОДОМ**

**ИМПУЛЬСНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

В.А. Сисин (Уральский государственный университет путей сообщения)

Центральной задачей, возникающей при эксплуатации железнодорожного транспорта, была и остается обеспечение безопасности движения поездов на станциях и перегонах. Поэтому большое внимание уделяется надежному функционированию систем интервального регулирования движения поездов, основным инструментом которых, в свою очередь, являются рельсовые цепи (РЦ). Именно РЦ на протяжении многих лет служат датчиком контроля свободности пути и выполняют функцию контроля целостности рельсов. Так, например, при загрязненном балласте токопроводящими примесями определение излома рельса становится затруднительным. Поэтому анализ и разработка методов с использованием новых принципов, обеспечивающих надежность и функционирования РЦ, находиться в центре внимания исследователей.

Одним из таких методов является метод преобразования информации, который функционирует на принципах анализа переходных процессов распространения сигналов в рельсовых линиях (РЛ), замкнутых на конце (при разряде конденсатора на РЦ). Это метод импульсного зондирования [1]. Предложенный подход к анализу процессов позволяет получить дополнительные параметры, не относящиеся к требованиям, предъявляемым устройствам СЦБ. К таким можно отнести определение скорости поезда, его ускорение (замедление) или расстояние до впереди идущего подвижного состава, выражаемое в виде непрерывных, а не дискретных данных.

Принцип импульсного зондирования, иллюстрируемый эквивалентной схемой устройства, работает следующим образом: в короткозамкнутую на конце РЛ, состоящих из *N* четырехполюсников, представляющих из себя однородные Т-звенья, подаются прямоугольные импульсы напряжения, при этом в РЛ возникает ток *i*РЛ. Результат анализа возникающего переходного процесса тока в амплитудной и временной областях дает информацию о состоянии РЛ и наличие или отсутствие подвижного состава на контролируемом участке пути. Очевидно, что при выбранных достаточно малых временных интервалах дискретности измерений амплитуды возникающего тока показанная эквивалентная схема вполне может адекватно отображать реальные процессы изменения характеристик РЛ (рис. 1).



Рис. 1. Эквивалентная схема рельсовой линии импульсного зондирования, представленной ОЦС с симметричными Т-звеньями

$$R=\frac{R\_{р }}{2}+mR\_{ст.};$$

$$L=\frac{L\_{р }}{2}+mL\_{ст.};$$

*R*р – сопротивление рельса;

*R*ст. – сопротивление стыка;

*L*р – индуктивность рельса;

*L*ст. – индуктивность стыка;

*G*б – проводимость балласта;

*N* – количество звеньев;

*UN* – напряжение на входе РЦ;

*Un* – напряжение на входе *n* четырехполюсника;

*U*1 – напряжение на входе последнего четырехполюсника

Однако для реализации данного метода необходимо провести скрупулезные теоретические исследования, которые включают в себя определение возможной длины данной РЦ, параметров импульса, потерь в РЦ и т.д. Все это подразумевает построение математической модели, позволяющей точно отразить физическое состояние РЦ при различных режимах работы.

Для реализации этой математической модели необходимо построить эквивалентную электрическую схему, которая позволяла бы учесть не только рабочие режимы РЦ, но и изменение сопротивления балласта в различных точках при изменении погодных условий[[1]](#footnote-2). Изменение сопротивления балласта на данных участках цепи способствует изменению формы импульса. При этом замещение РЛ обычным четырехполюсником не отражает всей картины изменения формы электрического сигнала. Лучше всего представить РЦ импульсного зондирования (РЦИЗ) как электрическую линию с распределенными параметрами; любую однородную длинную линию можно заменить эквивалентной однородной цепной схемой (ОЦС). Разделив линию длиной *L* на *N* одинаковых отрезков, каждый из которых имеет длину *s*,и заменив каждый отрезок линии эквивалентным четырехполюсником, получим эквивалентную ОЦС. При этом масштаб квантования будет определять необходимую точность моделирования линии при помощи цепной схемы [2].Так, например, длинную рельсовую линию можно представить из последовательно соединенных симметричных Т-звеньев (см. рис 1). Поскольку аргумент волнового сопротивления рельсовых линий остается положительным во всем диапазоне частот, то есть $\frac{R}{G}<\frac{L}{С}$, то емкостной составляющей проводимости изоляции можно пренебречь [3].

Так как РЦИЗ находится в одном из вырожденных случаев, то есть в режиме короткого замыкания, то можно анализировать реакцию цепи на скачек напряжения в разных точках, в том числе и конце линии с помощью следующих уравнений [2]:

$u\_{n}\left(p\right)=u\_{вх.}\left(p\right)\frac{shГ\left(p\right)n}{shГ\left(p\right)N}=\frac{U}{p}\frac{h(p)}{v(p)};$ (1)

$i\_{n}\left(p\right)=\frac{u\_{вх.}\left(p\right)}{Z\_{c}(p)}\frac{chГ\left(p\right)n}{shГ\left(p\right)N},$ (2)

где $u\_{nk}\left(p\right)$ – изображение по Лапласу напряжения на входе *n*-го четырехполюсника (линия в режиме КЗ); $i\_{nk}\left(p\right)$ – изображение по Лапласу тока на входе *n*-го четырехполюсника; $u\_{вх.}\left(p\right)$ – изображение по Лапласу напряжения на входе РЛ; $Г\left(p\right)=\sqrt{Z(p)Y(p)}=\sqrt{(R+pL)G}$ – операторная постоянная передачи одного звена цепной схемы; $Z\_{c}=\sqrt{\frac{R+pL}{G}}$ – изображение по Лапласу характеристического сопротивления.

Оригинал изображений тока и напряжения:

$u\_{n}\left(t\right)=U(\frac{sh\sqrt{GR}n}{sh\sqrt{GR}N}+\sum\_{p\_{k}}^{}\frac{h(p\_{k})}{p\_{k}v`(p\_{k})});$ (3)

$i\_{n}\left(t\right)=U(\frac{\sqrt{G}ch\sqrt{GR}n}{\sqrt{R}sh\sqrt{GR}N}+\sum\_{p\_{k}}^{}\frac{h\left(p\_{k}\right)}{Z\left(p\_{k}\right)p\_{k}v`\left(p\_{k}\right)}),$ (4)

где $p\_{k}$ характеристического уравнения $v\left(p\right)=0 $и по определению $v`\left(p\right)=\frac{d}{dx}v(p)$.

С помощью (4) можно построить зависимости переходного процесса тока на входе РЛ от сопротивления балласта.

Следующим этапом в построения математической модели необходимо определить возможную длину РЦИЗ из-за того, что в электрических линиях с распределенными параметрами с увеличением длины может возникнуть ситуация, когда на входной стороне невозможно определить короткое замыкание на конце линии или же холостой ход. При анализе условий передачи энергии по РЛ удобно пользоваться коэффициентом снижения напряжения [4]:

$k\_{н}=\frac{e^{γl}+p\_{k}e^{-γl}}{1-p\_{k}}$(5)

где *pk* – коэффициент отражения волны от конца линии; 𝛾 – коэффициент распространения РЛ; *l* – длина РЛ.

Так как информацию о состоянии РЛ возможно проанализировать, воздействовав на нее скачком напряжения (то есть оценить процесс нарастания тока), то в (1) не будет отраженной волны, поскольку переходный процесс тока определяется в начальный момент времени. Тогда:

$k\_{н}=e^{γl}$(6)

В (6) видно, что на снижение сигнала сильно влияет удельное сопротивление балласта. Коэффициент распространения данной РЛ будет равен коэффициенту затухания РЛ: $γ=α=\sqrt{RG\_{б}}$. Если степень экспоненты в (6) $γl=4$, то значения напряжения сигнала на конце линии длиной *l* будет составлять 2 % от входного. Тогда, при нормативном сопротивлении балласта в $ 1 Ом∙км $ и сопротивлении рельсов $R=0,5 \frac{Ом}{км}$ длина линии будет равна $l=\frac{4}{\sqrt{1∙0,5}}=5,65 км.$

Представление РЦИЗ в виде ОЦС позволяет разбить РЛ на большое количество малых звеньев с сосредоточенными параметрами, что, в перспективе, позволит перейти от однородной цепной схемы к неоднородной. Таким образом, появляется возможность описания РЦ при изменении сопротивления балласта в различных участках цепи, что может происходить, например, при изменении погодных условий в различных координатах РЛ. Для повышения точности расчетов математической модели необходимо импульс представлять в виде суммы гармоник, поскольку сопротивление и индуктивность рельсов есть величина, зависимая от частоты электрического сигнала.

Схема устройства для осуществления метода импульсного зондирования приведена на рис. 2.



Рис. 2. Устройство контроля целостности рельсовой линии

Рассмотрим случай, когда электрические характеристики РЛ плавно изменяются, что может быть связано с изменением электрических характеристик балласта верхнего строения пути, например, климатическими воздействиями (временные диаграммы, приведенные на рис. 3).



Рис. 3. Принцип работы устройство контроля целостности рельсовой линии

В данном случае наибольшее влияние оказывает уменьшение сопротивления балласта, связанного с его намоканием. Импульсы выходного напряжения генератора импульсов напряжения Г *Е*Г длительностью импульса *t*и и паузы *t*п (эпюра *U*Г(*t*)) через токовый резистор Р поступают в рельсовую линию. Вследствие этого, в последней появляются импульсы тока (эпюра *I*(*t*)), при этом амплитуда этих импульсов будет уменьшаться. Однако если частота следования импульсов генератора Г велика и лежит в пределах сотен герц, то при этом будет выполняться условие: (*t*и + *t*п) << τ, где τ – постоянная времени изменения электрических характеристик верхнего строения пути. Тогда разница между значениями тока *I*1, *I*2, *I*3, *I*4 и *I*5 будет относительно мала. Сформированные формирователем импульсов ФИ импульсы *t*0 (эпюра *U*ФИ(*t*)) подключают медленно меняющееся напряжение токового резистора Р к конденсатору К (эпюра *U*С(*t*)). Это обусловливает небольшое значение величины производной $\frac{du}{dt}$ (эпюра $\frac{du}{dt}(t)$) на выходе дифференцирующего устройства ДУ. Очевидно, что если выполняется условие $\frac{du}{dt}<U\_{пор.}$, то сигнал на выходе порогового устройства ПУ будет отсутствовать (эпюра *h*(*t*)). При изломе же рельса происходит резкое изменение электрических характеристик РЛ, что сказывается на значении производной, которая превысит пороговое значения.

Литература

1. Грачев Г.Н., Муратова Л.И., Гуменик М.Б. Новый метод построения и расчета рельсовых цепей // Транспорт: наука, техника, управление, 1994. № 9. – С. 27–33.

2. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.

3. Каллер М.Я., Соболев Ю.В., Богданов А.Г. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. – М.: Транспорт, 1987. – 335 с.

4. Брылеев А.М., Кравцов Ю.А., Шишляков А.В. Теория устройство и работа рельсовых цепей. – М. : Транспорт, 1978. – 344 с.

1. Например, выпадение осадков – дождя, мокрого снега и т.п. на определенных участках. [↑](#footnote-ref-2)