

УДК 656.252.12

Д. В. КОМНАТНЫЙ, кандидат технических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УДАРЕ МОЛНИИ В РЕЛЬСОВУЮ ЦЕПЬ

Дан анализ процессов распространения волн напряжения по рельсовой цепи, пораженной разрядом молнии. Разработана модель рельсовой цепи и указаны области применимости модели. Расчет процесса распространения напряжения в цепи выполнен методом разделения переменных. Показано, что данный метод является достаточно универсальным, так как для него разработаны подробные таблицы решений. Приведены расчеты электромагнитных процессов в рельсовой цепи конкретной конструкции.

Рельсовые цепи магистральных железных дорог достаточно часто поражаются прямыми ударами молнии. Число поражений возрастает в условиях неустойчивого климата с резкими перепадами погоды, которые сопровождаются грозовыми шквалами. Волны тока и напряжения, созданные молнией, распространяются по рельсовым цепям и являются причиной отказов и сбоев оборудования сигнальных точек систем интервального регулирования движения поездов и локомотивного оборудования АЛС (рисунок 1). Деструктивному влиянию молнии особенно подвержены современные микроэлектронные и микропроцессорные системы перегонных СЖАТ. Поэтому актуальной задачей остается построение моделей электромагнитных процессов в рельсовых цепях, пораженных молнией, с целью прогнозирования характеристик этих процессов и проектирования мер защиты ЖАТ на перегонах.

Электромагнитные волны в рельсовых цепях описываются уравнениями линии с распределенными параметрами. Эти уравнения можно получить, рассматривая известную схему замещения малого участка линии с распределенными параметрами, на которую воздействует распределенный, в общем случае, источник тока [1]. Для рельсовых цепей, согласно [2], можно предполагать, что погонное сопротивление и погонная емкость цепи пренебрежимо малы, а погонные индуктивность и проводимость утечки не зависят от частоты. Тогда уравнения рельсовой цепи (рисунок 1) имеют вид

$$\frac{\partial u}{\partial x} + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial i}{\partial t} + G_0 u = j(x, t), \quad (1)$$

где u – напряжение в линии, В; i – ток в линии, А; x – координата точки на линии, м; t – время, отсчитываемое от момента удара молнии, с; L_0 – погонная индуктивность рельсовой цепи, Гн/км; G_0 – погонная утечка в рельсовой цепи, См/км; j – ток распределенного источника тока, А.

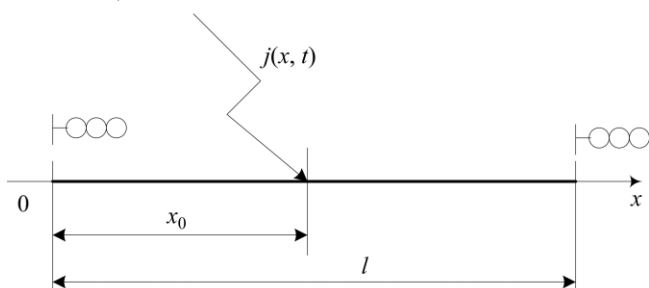


Рисунок 1 – Схема рельсовой цепи при ударе в нее молнии

Уравнения (1) можно привести к одному уравнению для напряжения в рельсовой цепи

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{L_0 G_0} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{G_0} \frac{\partial}{\partial t} j(x, t). \quad (2)$$

Для решения уравнения (2) необходимо задать граничные и начальные условия, а также распределение тока источника $j(x, t)$. Будем полагать, что в момент времени $t = 0$

$$u(x, 0) = 0. \quad (3)$$

Анализ конструкции существующих импульсных и тональных рельсовых цепей [3] показывает, что необходимо рассматривать рельсовые цепи, нагруженные на концах на катушки индуктивности. Для простоты полагаем, что индуктивности этих катушек одинаковы, а омические сопротивления пренебрежимо малы. Тогда граничные условия имеют вид

$$u(0, t) = -L \frac{di(0, t)}{dt}; \quad u(l, t) = L \frac{di(l, t)}{dt}, \quad (4)$$

где l – длина рельсовой цепи, м; L – индуктивность катушки, Гн.

Выражения (4) можно преобразовать к виду

$$u(0, t) - \frac{L}{L_0} \frac{\partial u(0, t)}{\partial x} = 0; \quad u(l, t) + \frac{L}{L_0} \frac{\partial u(l, t)}{\partial x} = 0. \quad (5)$$

По данным справочника [4] форма импульса тока молнии, ударившей в точку РЦ с координатой x_0 , может быть описана выражением

$$j(x, t) = I_0 e^{-nt} \delta(x - x_0), \quad (6)$$

где I_0 – амплитуда импульса, А; n – постоянная времени, с⁻¹; δ – дельта-функция Дирака.

Уравнение (2) с начальным условием (3), граничными условиями (5) и неоднородным членом, выраженным через (6), является уравнением Фурье математической физики. Как правило, решение таких уравнений применительно к процессам в рельсовых цепях осуществляется методом преобразования Лапласа [2]. Но этот метод имеет недостаток, заключающийся в необходимости проделывать сложное обратное преобразование Лапласа. Известный метод разделения переменных или

метод Фурье позволяет находить решение уравнений в частных производных непосредственно, для чего в монографии [5] приведены подробные таблицы, охватывающие все варианты задач на решение уравнения Фурье. Использование этих таблиц существенно упрощает расчеты. Поэтому в настоящей статье распределение напряжения в РЦ ищется методом разделения переменных, основываясь на материалах из [5].

В общем виде решение уравнения (2) имеет вид

$$u(x, t) = U(x, t) + \sum_{k=1}^{\infty} \left[C_k e^{-a^2 \mu_k t} + u_k(t) \right] X_k(x), \quad (7)$$

где $a^2 = (L_0 G_0)^{-1}$.

В этом решении вид функции $U(x, t)$ определяется граничными условиями (5). Из [5] следует, что для этих граничных условий $U(x, t) = 0$. Физически это означает отсутствие принужденной составляющей переходного процесса в рельсовой цепи.

Собственные числа задачи $\mu_k = \lambda_k^2$; числа λ_k являются корнями уравнения

$$\operatorname{ctg} \lambda l = \frac{h^2 \lambda - 1}{2h\lambda}, \quad (8)$$

где $h = L/L_0$.

Собственные функции задачи (2), (3), (5)

$$X_k(x) = h\lambda_k \cos \lambda_k x + \sin \lambda_k x. \quad (9)$$

$u_k(t)$ дается выражением

$$u_k(t) = \frac{1}{(X_k, X_k)} \int_0^t \int_0^l e^{-a^2 \mu_k (t-\tau)} X_k(\xi) \tilde{f}(\tau, \xi) d\tau d\xi. \quad (10)$$

В этом выражении (X_k, X_k) – норма собственных функций

$$(X_k, X_k) = \int_0^l X_k^2 = (h^2 \lambda_k^2 - 1) \frac{1}{4\lambda_k} \sin 2\lambda_k l - \frac{h}{2} \cos 2\lambda_k l + \frac{3}{2} l - \frac{h}{2}. \quad (11)$$

В свою очередь $\tilde{f}(x, t) = f(x, t) + a^2 U_{xx}(x, t) - U_t(x, t)$.

Так как $U(x, t) = 0$, то $\tilde{f}(x, t) = f(x, t)$.

$$f(x, t) = \frac{1}{G_0} \frac{\partial}{\partial t} j(x, t) = -\frac{1}{G_0} I_0 n e^{-nt} \delta(x - x_0). \quad (12)$$

После подстановки (12) в (10), преобразований и интегрирования с учетом свойств дельта-функции Дирака [6] получается

$$u_k(t) = \frac{-nI_0 X_k(x_0)}{(X_k, X_k) G_0 (a^2 \mu_k - n)} \left(e^{-nt} - e^{-a^2 \mu_k t} \right). \quad (13)$$

Подставляя начальное условие (3) и соотношение (13) в общее решение (7) можно убедиться, что для выполнения начального условия (3) должно быть $C_k = 0$.

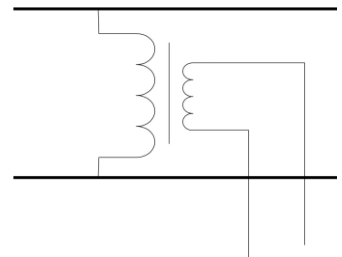
Итак, решение уравнения (2) для заданных граничных и начальных условий имеет вид

$$u(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{-nI_0 X_k(x_0)}{(X_k, X_k) G_0 (a^2 \mu_k - n)} \times \left(e^{-nt} - e^{-a^2 \mu_k t} \right) X_k(x). \quad (14)$$

Это решение представляет собой бесконечную сумму биэкспоненциальных затухающих волн. Следовательно, оно физически корректно, поскольку переходные процессы в рельсовой цепи при ударе молнии должны затухать со временем.

Проанализируем более подробно область применения предлагаемой модели. В тональных рельсовых цепях, разработанных в Российской Федерации, аппаратура сигнальных точек подключается к рельсам через трансформатор по схеме, показанной на рисунке 2 [3].

Рисунок 2 – Подключение аппаратуры сигнальной точки автоблокировки



Первичная обмотка трансформатора образует четырехполюсник, волновое сопротивление которого [1]

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{B}{C}} = 0. \quad (15)$$

С другой стороны, для рельсовой цепи с учетом предположений о ее первичных параметрах, принятых в статье, волновое сопротивление [1]

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{\omega L_0}{G_0}} e^{j45^\circ}. \quad (16)$$

Известно, что можно пренебречь преломлением волн и их проникновением в соседнюю линию, если волновые сопротивления двух участков линии значительно отличаются [1]. Как видно из (15) и (16), для рельсовых цепей реализуется именно такой случай. Этот вывод подтверждается тем, что на практике сигнал смежной РЦ имеет достаточно высокий уровень на расстоянии не более 20 м от конца рассматриваемой РЦ. В тональных рельсовых цепях производителей дальнего зарубежья для разделения соседних рельсовых цепей устанавливаются дополнительные дроссели [7], что приводит к еще большему снижению преломленных сигналов, поступающих в соседнюю РЦ.

Таким образом, при анализе электромагнитных процессов после удара молнии в тональные рельсовые цепи допустимо пренебрегать проникновением волн тока и напряжения в соседние с пораженной цепи и полагать, что рельсовая цепь имеет конечную длину и заключена в пределах блок-участка. Поэтому рассмотренная в статье модель воздействия молнии на рельсовые цепи применима к широкой номенклатуре конструкций рельсовых цепей, импульсно-кодовых и тональных.

Для анализа результатов моделирования по предлагаемой методике был выполнен расчет напряжения в рельсовой цепи длиной 1200 м, в которой уложены рельсы Р75. Параметры рельсовой цепи и путевого приемника определялись по [3]. Параметры импульса молнии по [4] $I_0 = 20000$ А, $n = 6,993 \cdot 10^{-3}$ 1/с. Удар молнии предполагался в точке с координатой 800 м. Вид импульса тока молнии по (6) показан на рисунке 3.

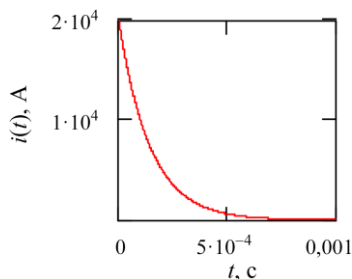


Рисунок 3 – Форма импульса тока молнии в точке поражения рельсовой цепи

Ток молнии вызывает в рельсовой цепи волны перенапряжения, растекающиеся от точки удара к границам блок-участка. На рисунке 4 показано распределение напряжения по длине цепи в момент времени $t = 2 \cdot 10^{-4}$ с, прошедший от начала молниевых разряда.

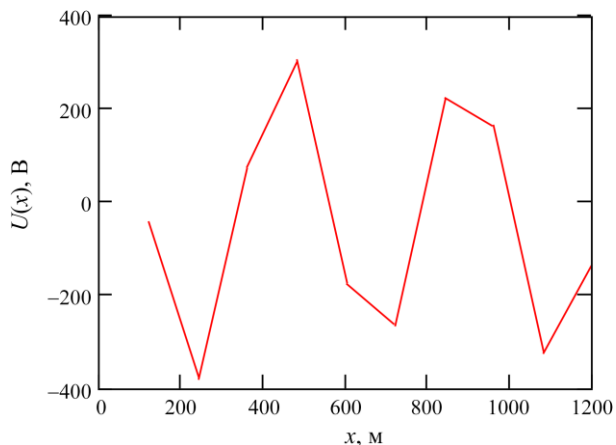


Рисунок 4 – Распределение напряжения вдоль рельсовой цепи

На рисунке 5 приведен график изменения напряжения в точке с координатой 1200 м, то есть в конце рельсовой цепи, за время протекания разряда молнии.

Получено 20.09.2012

D. V. Komnatny. Electromagnetic processes model for lightning stroke into track circuits.

The voltage waves propagation in track circuit under lightning stroke is analyzed in this article. The model of track circuit was developed and model applicability domain was shown. The voltage propagation process in the circuit was fulfilled by separation of variables method. It is shown, that method is sufficiently universal, because the detailed tables of solutions were developed for this method. The calculations of electromagnetic processes in the track circuit of specific construction are presented.

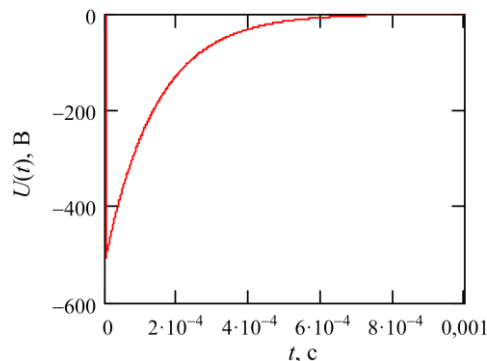


Рисунок 5 – Импульс перенапряжения в фиксированной точке рельсовой цепи

Результаты расчетов показывают, что предлагаемая модель позволяет вычислять параметры волн перенапряжения от молниевых разрядов на рельсовую цепь в любой точке цепи и в любой момент времени. Это дает возможность прогнозировать воздействие волн перенапряжения на входные цепи аппаратуры АБ, АЛС, ПАБ и ЭССО и проектировать для этой аппаратуры защитные блоки от перенапряжений. В конечном итоге это позволяет получить исходные данные для повышения уровня электромагнитной совместимости систем обеспечения безопасности движения поездов на перегонах с окружающей электромагнитной обстановкой.

Список литературы

- 1 **Каллер, М. Я.** Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / М. Я. Каллер, Ю. В. Соболев, А. Г. Богданов. – М. : Транспорт, 1987. – 335 с.
- 2 **Косарев, А. Б.** Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока / А. Б. Косарев. – М. : Интекст, 2004. – 272 с.
- 3 **Аркатов, В. С.** Рельсовые цепи: Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М. : Транспорт, 1990. – 294 с.
- 4 **Кравченко, В. И.** Грозозащита радиоэлектронных средств / В. И. Кравченко. – М. : Радио и связь, 1991. – 264 с.
- 5 **Котляр, Я. М.** Методы и задачи тепломассообмена / Я. М. Котляр, В. Д. Совершенный, Д. С. Стриженов. – М. : Машиностроение, 1987. – 318 с.
- 6 **Арсенин, В. Я.** Методы математической физики и специальные функции / В. Я. Арсенин. – М. : Наука, 1984. – 383 с.
- 7 **Власенко, С. В.** Многообразие рельсовых цепей на железных дорогах мира / С. В. Власенко, Г. Теег // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 6. – С. 42–45.