

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

УДК 656.254.7

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

**ПЕРЕДАЧА ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА
В СИСТЕМАХ ИНДУКТИВНОЙ СВЯЗИ С ПОЕЗДАМИ**

Рассматривается процесс передачи сигналов в антеннах системы индуктивной связи с поездами. Предполагается, что частота сигнала в системе такова, что все размеры передающей и приемной антенны меньше, чем длина волны. Тогда ЭДС в приемной антенне определяется по закону электромагнитной индукции. Рассмотрена передача сигнала с дискретной частотной модуляцией. Для этого сигнала выведены расчетные соотношения для ЭДС в приемной антенне, для наводящих ЭДС токов и модулирующих функций. Выявлены особенности передачи сигнала в системе индуктивной связи, которые необходимо учитывать при использовании такой системы для обеспечения безопасности движения поездов.

В настоящее время на железных дорогах Европейского союза широкое распространение получили приборы индуктивной связи с поездами для организации системы интервального регулирования движения поездов [1]. В СССР И СНГ принцип индуктивной связи большей частью применялся при разработке систем технологической связи [2], а в [3, 4] исследовалась возможность его применения для интервального регулирования.

Для железнодорожного транспорта стран Евразийского сообщества актуальной задачей является организация трансконтинентальных транспортных коридоров с Дальнего Востока в Западную Европу. При этом требуется унификация технических решений, используемых в системах интервального регулирования. Следовательно, становятся актуальными опытно-конструкторские разработки в этой области, в частности, индуктивной связи с поездами. Для разработки поездной приемной аппаратуры требуется, помимо прочего, исследовать форму сигнала, возникающего в приемной антенне на подвижном составе.

Уже полученные в этой области результаты имеют некоторые недостатки. Так, в [3] и [4] основным параметром модели передачи сигнала на подвижной состав принята взаимная индуктивность поездной и напольной антенн. Расчет взаимной индуктивности является сложной электродинамической задачей, точное решение которой во многих случаях затруднительно [5]. В [2] приведен анализ передачи сигнала на основе закона электромагнитной индукции. В этом подходе расчет электромагнитных процессов в системе «напольная и поездная антенна» упрощается, так как наведенная в поездной антенне ЭДС вычисляется непосредственно. Но при выводе расчетных соотношений не учтено движение поезда над напольной антенной и не получено конечное выражение для сигнала в приемной антенне. Поэтому в настоящей статье поставлена задача выполнить анализ передачи управляющего сигнала в системе индуктивной связи, основанный на законе электромагнитной индукции, при этом устранить отмеченные выше недостатки.

Для решения этой задачи предполагается, что напольная антенна индуктивной связи лежит на шпалах между рельсами и может быть аппроксимирована пря-

моугольным витком провода. Виток изолирован от земли. Порядок размеров витка составляет единицы метров и менее. Частота сигнала в напольной антенне такова, что все расстояния в задаче меньше длины волны, следовательно, связь между передающей и приемной антеннами осуществляется магнитным полем в индуктивном режиме [2].

Приемная антенна движется над осью симметрии витка с постоянной скоростью и расположена на достаточно малой высоте – высоте колесной пары. Наличие колесных пар и днища подвижного состава не учитывается [3, 4]. Размеры приемной антенны значительно меньше размеров антенны передающей.

Тогда при движении приемной антенны в магнитном поле передающей антенны в поездной антенне возникает ЭДС по закону электромагнитной индукции [2]

$$e(t) = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

где e – электродвижущая сила, В; Φ – магнитный поток, Вб; t – время, с.

Магнитный поток определяется через вертикальную составляющую напряженности магнитного поля передающей антенны

$$\Phi = \mu S w H_z, \quad (2)$$

где μ – магнитная проницаемость среды, Гн/м; S – площадь приемной антенны, м²; w – число витков приемной антенны; H_z – вертикальная составляющая напряженности магнитного поля передающей антенны, А/м.

Так как высоту расположения приемной антенны нельзя считать много меньшей размеров витка (шлейфа) напольной антенны, то вертикальная составляющая напряженности магнитного поля, созданная одной стороной шлейфа, определяется по формуле [2, 5]

$$H_{zi} = \frac{i(t)}{4\pi R_i} (\sin \alpha_{1i} + \sin \alpha_{2i}) \cos \theta_i, \quad (3)$$

где i – ток в напольной антенне, А; R_i – расстояние от стороны шлейфа до основания перпендикуляра, опущенного от приемной антенны, м; α_{1i} , α_{2i} , θ_i – угловые

геометрические параметры, рад; i – номер стороны шлейфа.

Геометрическая конфигурация задачи показана на рисунке 1.

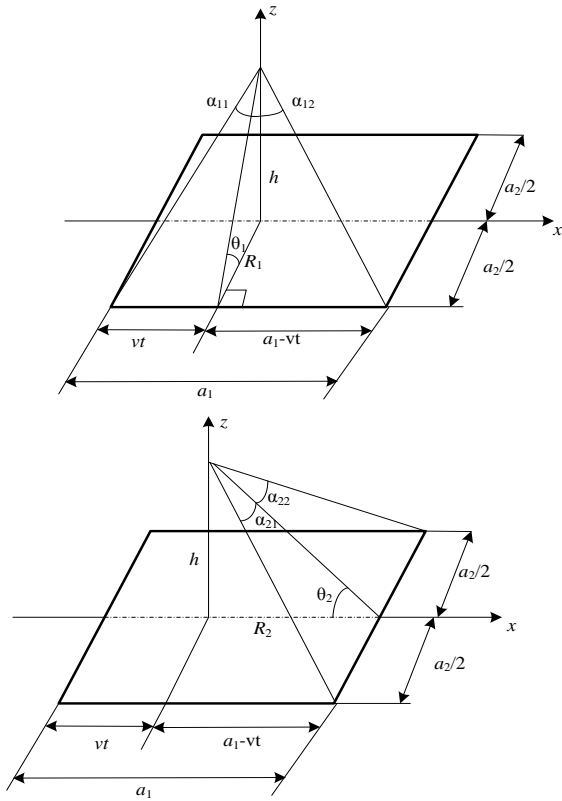


Рисунок 1 – Геометрическая конфигурация напольной антенны системы индуктивной связи

Напряженность магнитного поля и магнитный поток в приемной антенне зависят от изменяющегося во времени тока антенны и изменяющихся во времени при движении поезда угловых геометрических параметров. Для описания зависимости геометрических параметров в (3) от времени вводится модулирующая функция. Тогда после подстановки (3) в (2) и затем в (1) по правилу дифференцирования произведения получается формула для ЭДС приемной антенны [3, 4]

$$e(t) = \mu S w \left[-i(t) \frac{dF(t)}{dt} + \left(-\frac{di(t)}{dt} \right) F(t) \right] K_p, \quad (4)$$

где $F(t)$ – модулирующая функция; K_p – поправочный коэффициент, учитывающий влияние рельс.

Так как учет влияния рельс на магнитное поле передающей антенны является сложной задачей, не имеющей точного решения, то такое влияние рационально учитывать с помощью поправочного коэффициента. Этот коэффициент определяется путем натурных измерений [6].

В европейских системах индуктивной связи применяется дискретная частотно-импульсная модуляция [1]. Представление такого сигнала имеет вид [7] с учетом умножения на -1 в (4).

$$-i(t) = A \sum_{j=1}^n u \cos(\omega_j t + \varphi_j + \pi),$$

$$u = \begin{cases} 1 & \text{при } t \leq (j-1)k\tau \\ 0 & \text{при } t \geq (j-1)k\tau \end{cases}, \quad (5)$$

где A – амплитуда сигнала, A ; j – номер посылки в сигнале; n – число посылок в сигнале; u – параметр модуляции; ω_j – круговая частота посылки, рад/с; φ_j – начальная фаза, рад; k – счетная переменная импульсов; τ – длительность передачи одной посылки, с.

Тогда производная сигнала с учетом умножения на -1

$$-\frac{di(t)}{dt} = A \sum_{j=1}^n u \cos\left(\omega_j t + \varphi_j + \frac{\pi}{2}\right). \quad (6)$$

Модулирующая функция находится по рисунку 1 из геометрических соображений с учетом симметрии сторон шлейфа. Для этого угловые геометрические параметры выражаются через размеры шлейфа напольной антенны, высоту расположения поезда антенны с учетом ее местонахождения на оси симметрии шлейфа. Это местонахождение изменяется при движении поезда. В результате для модулирующей функции получается выражение

$$F(t) = \left(\frac{vt}{\sqrt{(vt)^2 + \left(\frac{a_2}{2}\right)^2 + h^2}} + \frac{a_1 - vt}{\sqrt{(a_1 - vt)^2 + \left(\frac{a_2}{2}\right)^2 + h^2}} \right) \times \frac{1}{2\pi \sqrt{\left(\frac{a_2}{2}\right)^2 + h^2}} + \frac{1}{4\pi} \frac{a_2}{\sqrt{\left[(a_1 - vt)^2 + \left(\frac{a_2}{2}\right)^2 + h^2\right] \left[(a_1 - vt)^2 + h^2\right]}} + \frac{1}{4\pi} \frac{a_2}{\sqrt{\left[(vt)^2 + \left(\frac{a_2}{2}\right)^2 + h^2\right] \left[(vt)^2 + h^2\right]}}, \quad (7)$$

где a_1 , a_2 – длины сторон шлейфа, м; v – скорость движения поезда, м/с.

Производная модулирующей функции имеет вид

$$\frac{dF(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\left(\frac{a_2}{2}\right)^2 + h^2}} \times \left(\frac{v - v^3 t^2}{\left[(vt)^2 + \left(\frac{a_2}{2}\right)^2 + h^2\right]^{3/2}} - \frac{v(1 + (a_1 + vt)^2)}{\left[(a_1 - vt)^2 + \left(\frac{a_2}{2}\right)^2 + h^2\right]^{3/2}} \right) +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{-va_2(a_1 - vt)}{2\pi \sqrt{[(a_1 - vt)^2 + h^2] \left[(a_1 - vt)^2 + \left(\frac{a_2}{2}\right)^2 + h^2 \right]}} + \\
& + \frac{a_2 v^2 t}{2\pi \sqrt{[(vt)^2 + h^2] \left[(vt)^2 + \left(\frac{a_2}{2}\right)^2 + h^2 \right]}}. \quad (8)
\end{aligned}$$

Анализ соотношений позволяет сделать следующие выводы.

ЭДС в приемной антенне состоит из двух групп колебаний, одна из которых вызвана током передающей антенны, а вторая – производной тока.

Колебания в каждой группе сдвинуты по фазе относительно тока в передающей антенне. Для каждой из двух групп имеется свой сдвиг. Токи в (5) имеют сдвиг фаз π радиан, а токи в (6) – $\pi/2$ радиан.

Амплитуды колебаний каждой группы модулируются непериодической функцией скорости поезда, времени и геометрических размеров шлейфа напольной антенны. Причем зависимости имеют достаточно сложную математическую форму.

Эти особенности являются существенным отличием передачи сигнала по индуктивной связи от передачи сигнала по радиоканалу.

Полученные в статье выводы в существенных моментах совпадают с результатами, полученными в [3, 4]. Это является подтверждением адекватности примененного в статье метода расчета магнитной индукции, поскольку различные методы расчета магнитных полей не должны приводить к существенно различным выводам при анализе одинаковых технических систем. Отличие состоит в том, что в настоящей статье исследован

сигнал с дискретной частотной модуляцией, как представляющий наибольший практический интерес [1].

Полученное в результате работы математическое описание сигналов в приемной антенне системы индуктивной связи с поездами является определяющим при проектировании приемной аппаратуры. Так как системы интервального регулирования являются основным средством обеспечения безопасности движения поездов на перегонах, то при использовании в этих системах индуктивной связи должны учитываться все возможные источники ошибок приема, в том числе и связанные с особенностями принимаемого сигнала. Поэтому допустимо заключить, что полученные результаты имеют большое значение для решения вопросов практического применения индуктивной связи в системах автоматики и телемеханики на перегонах.

Список литературы

- 1 Системы автоматики и телемеханики на железных дорогах мира / Э. Андрус [и др.]; под ред. Г. Тега и С. Власенко. – М. : Интекст, 2010. – 496 с.
- 2 Радиотехнические системы железнодорожного транспорта / Ю. В. Ваванов [и др.]. – М. : Транспорт, 1991. – 303 с.
- 3 Лисенков, В. М. Индуктивная связь с поездами / В. М. Лисенков. – М. : Транспорт, 1976. – 112 с.
- 4 Системы управления движением поездов на перегонах : в 3 ч. / В. М. Лисенков [и др.]; под ред. В. М. Лисенкова. – М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2009. – Ч. 2 : Принципы, методы и способы реализации систем управления. – 320 с.
- 5 Аполлонский, С. М. Расчеты электромагнитных полей / С. М. Аполлонский, А. Н. Горский. – М. : Маршрут, 2006. – 992 с.
- 6 Поездная и станционная радиосвязь / Г. Н. Зражевский [и др.]. – М. : Транспорт, 1978. – 344 с.
- 7 Клюев, Л. А. Теория электрической связи / Л. А. Клюев. – Минск : Новое знание; М. : Инфра-М, 2016. – 448 с.

Получено 01.04. 2020

D. V. Komnaty. Frequency-modulated signal transmission in the train inductive carrier service systems.

The process of signal transmission in train inductive carrier system antennas is examined. It is suspended, that signal frequency such, that all overall dimensions of transmitting and receiving aerials are less then wave-length. The electromotive force in receiving aerial can be defined by law of electromagnetic induction. The discrete frequency-modulated signal transmission is examined. The computational relationships for electromotive force in receiving aerial, for current in transmitting aerial, and for modulate functions are obtained. The peculiarities of signal transmission in the inductive carrier service systems are examined. It is necessary to take into consideration this peculiarities for using such system in train safety control.