

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость, Ф/м;  $x, y, z$  – декартовы локальные координаты точки наблюдения, м;  $E_x, E_y, E_z$  – декартовы составляющие вектора напряженности электрического поля, В/м;  $H_x, H_y$  – декартовы составляющие вектора напряженности магнитного поля, А/м.

Координаты точки наблюдения задаются, как правило, в глобальной системе координат. Для упрощения расчета следует перевычислить координаты точки наблюдения в локальной системе координат по формулам

$$\begin{aligned}x &= x_1 - r_0 \cos \varphi_0 \sin \theta_0, \\y &= y_1 - r_0 \sin \varphi_0 \sin \theta_0, \\z &= z_1 - r_0 \cos \theta_0,\end{aligned}\tag{7}$$

где  $x_1, y_1, z_1$  – глобальные координаты точки наблюдения, м;  $r_0$  – расстояние между центрами систем координат, м;  $\theta_0, \varphi_0$  – угловые сферические координаты центра локальной системы координат в глобальной системе координат, рад.

Выражения (2)–(7) являются примером дипольной модели источника электромагнитных помех.

В монографии Б. Б. Акбашева, Н. В. Балюка и Л. Н. Кечиева приведены общие выражения для напряжения помех, наведенного в рецепторах, модели которых представлены в виде электрического или магнитного диполей. Для расчета гармонических полей в частотной области эти выражения могут быть преобразованы по теореме о спектре производной. В результате получаются расчетные формулы:

$$\begin{aligned}\text{– для магнитного диполя } U(j\omega) &= -j\mu S \frac{R}{L} H(j\omega) \quad R \ll \omega L, \\U(j\omega) &= -j\mu S H(j\omega) \quad R \gg \omega L, \\ \text{– для электрического диполя } U(j\omega) &= -j\omega h R C E(j\omega) \quad R \ll \frac{1}{\omega C}, \\U(j\omega) &= -j\omega h E(j\omega) \quad R \gg \frac{1}{\omega C},\end{aligned}$$

где  $U$  – напряжение, В;  $S$  – площадь дипольной антенны, м<sup>2</sup>;  $R$  – сопротивление нагрузки антенны, Ом;  $L$  – индуктивность антенны, Гн;  $H$  – составляющая напряженности магнитного поля, перпендикулярная контуру дипольной антенны, А/м;  $h$  – длина антенны, м;  $C$  – емкость антенны, Ф;  $E$  – составляющая напряженности электрического поля, перпендикулярная длине антенны, В/м.

Приведенные расчетные соотношения являются дипольной моделью рецептора электромагнитных помех.

Отличительной особенностью рассмотренных в докладе дипольных моделей является простой математический аппарат. Расчетные соотношения не используют специальных функций математической физики. Вместе с тем, как показывает анализ литературных источников, дипольные модели позволяют получить достаточные для практики оценки электромагнитных помех от промышленного оборудования и транспортных систем. Поэтому можно сделать вывод по докладу, что рассмотренный способ получения дипольных моделей ЭМО является оптимальным для решения актуальных задач, возникающих как составная часть проблемы электромагнитной безопасности современных и перспективных электрифицированных железных дорог.

УДК 621.372.5

## **ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПУТЕВЫХ ФИЛЬТРОВ**

*Д. Д. МЕДВЕДЕВ, С. И. ХОМЕНКО, И. О. ЖИГАЛИН*  
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Классические рельсовые цепи (РЦ) имеют ряд недостатков, одним из которых является наличие изолирующих стыков, дающих 30 % отказов по работе рельсовых цепей. В настоящее время приме-

няют рельсовые цепи без изолирующих стыков, обладающие рядом достоинств по отношению к рельсовым цепям с изолирующими стыками:

- укладка цельносварных рельсов;
- сокращение числа дроссель-трансформаторов;
- централизованное размещение аппаратуры;
- использование для любого вида тяги;
- высокая защищенность от воздействия помех;
- уменьшение энергопотребления.

Рельсовая цепь тональной частоты (ТРЦ) является сложным элементом железнодорожной автоматики и телемеханики, состоящим из множества электронных устройств. Одним из сложнейших элементов (с точки зрения определения первичных параметров) РЦ является путевой фильтр (ФПМ).

ФПМ предназначен для эксплуатации в составе аппаратуры контроля рельсовых цепей для передачи сигналов рабочих резонансных частот и согласования приборов питающего конца с рельсовой цепью. ФПМ выполнен в виде последовательного контура с трансформаторной связью (рисунок 1) для подключения к путевому генератору. ФПМ выпускают двух вариантов исполнения: ФПМ 8, 9, и ФПМ 11, 14, 15.

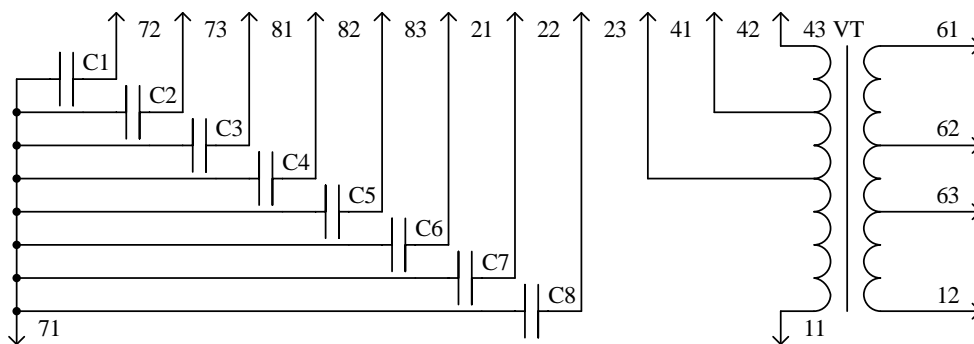


Рисунок 1 – Принципиальная схема фильтра ФПМ

Целью расчета РЦ является определение номинальных параметров источника питания, при которых обеспечивается устойчивая работа РЦ во всех режимах. При расчете должны быть известны схема РЦ, а также диапазоны изменения условий ее функционирования, например, состояния изоляции рельсовой линии (РЛ), пределы колебаний напряжения питания, возможный разброс параметров элементов.

При анализе и расчете РЦ предполагается, что РЛ и элементы аппаратуры являются линейными, то есть их параметры не зависят от протекающих токов. Для упрощения расчетов РЦ представляют соответствующей математической моделью (схемой замещения) для каждого режима. В зависимости от вида применяемой схемы замещения различают четырех- и многополюсные модели. Классический метод расчета основан на использовании четырехполюсных моделей [1].

Использование классического метода для расчета ТРЦ затрудняется отсутствием в справочной литературе первичных параметров элементов аппаратуры, входящей в её состав.

Определение параметров четырехполюсника модели ФПМ сталкивается с проблемой низкого сопротивления со стороны входа в режиме холостого хода на выходе. Это объясняется тем, что входная цепь представляет последовательный колебательный контур из набранной емкости и первичной обмотки трансформатора VT (см. рисунок 1), настроенный на частоту резонанса. Измерительный генератор при реализации метода трех вольтметров [2] должен иметь большую мощность выходного сигнала. В противном случае параметры выходного сигнала (частота и напряжение) нестабильные. Также, входное сопротивление фильтра имеет фазу близкую к нулю, поэтому метод дает высокую погрешность при измерениях.

Существуют методики [3], позволяющие для подобных устройств аналитически рассчитать параметры эквивалентного четырехполюсника. Но для фильтра ФПМ данных, приведенных в справочной литературе, недостаточно для расчета. Также в приведенной методике используется четырехполюсник идеального трансформатора с коэффициентом трансформации  $n$ . Это упрощает расчет, но приводит к неверному определению выходного сопротивления фильтра.

Один из путей устранения недостатков рассмотренных методов заключается в определении параметров ФПМ в несколько этапов. Используя стандартные методы [2], необходимо определить входные сопротивления в режимах холостого хода и короткого замыкания трансформатора VT для заданного режима подключения. При этом  $Z_{вх.хх}$  (сопротивление со стороны входа в режиме холостого хода) представляет собой эквивалентное сопротивление в цепи последовательного колебательного контура. Это позволяет осуществить промежуточную проверку индуктивной составляющей  $Z_{вх.хх}$  по формуле

$$L_{\phi} = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_{\phi}},$$

где  $f$  – частота настройки путевого фильтра;  $C_{\phi}$  – суммарная набранная емкость для настройки на частоту.

Активная составляющая  $Z_{вх.хх}$  близка к величине сопротивления фильтра на частоте настройки.

Представим путьевой фильтр в виде двух четырехполюсников: конденсатора с резонансной ёмкостью и реального трансформатора, включенных каскадно (рисунок 2). Тогда матрицу коэффициентов четырехполюсника фильтра можно определить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} A_{\phi} & B_{\phi} \\ C_{\phi} & D_{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{j\omega C_{\phi}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{тр} & B_{тр} \\ C_{тр} & D_{тр} \end{bmatrix},$$

где  $C_{\phi}$  – емкость конденсатора для заданных параметров включения;  $A_{тр}, B_{тр}, C_{тр}, D_{тр}$  – первичные параметры трансформатора для заданных режимов включения.

Корректность определённых параметров для фильтра ФПМ подтверждается результатами математического моделирования и измерений параметров в различных режимах работы.

Предложенная методика позволяет наиболее точно опередить параметры четырехполюсника путевого фильтра ТРЦ. Это способствует проведению более точного расчета РЦ, в частности в шунтовом режиме и режиме короткого замыкания работы ТРЦ. Предоставляет возможность исследовать влияние нагрузки на амплитудно-частотную характеристику ФПМ. Сформированная более адекватная модель учитывает особенности схемы замещения для задач схемотехнического и математического моделирования.

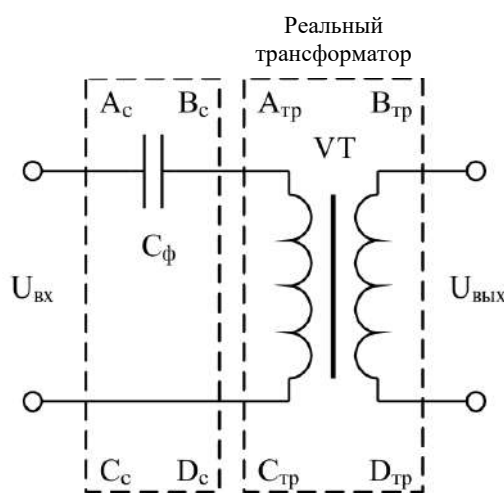


Рисунок 2 – Схема замещения путевого фильтра ФПМ

#### Список литературы

- 1 Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справочник / В. С. Аркатов [и др.]. – 3-е изд. – М. : ООО Миссия-М, 2006. – 496 с.
- 2 Дмитриенко, И. Е. Измерения в устройствах автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте / И. Е. Дмитриенко, А. А. Устинский, В. И. Цыганков. – М. : Транспорт, 1982. – 312 с.
- 3 Гончаров, К. В. Исследование переходных процессов в тональных рельсовых цепях / К. В. Гончаров // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2013. – Вип. 4. – С. 8–17.

УДК 629.4.053

### СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОДСИСТЕМ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ БУКС КОМПЛЕКСА КТСМ-03

Д. Д. МЕДВЕДЕВ, В. Ю. ШЕВЧУК

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Контроль перегретых букс в подвижном составе на Белорусской железной дороге осуществляется с помощью аппаратуры ПОНАБ, ДИСК, КТСМ-1Д, КТСМ-02. Данные системы физически и морально устарели и уже не выпускаются. Аппаратура нового поколения КТСМ-03 построена с