

## АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

УДК 621.396: 621.391.82

*К. А. БОЧКОВ, доктор технических наук; Белорусский государственный университет транспорта; Д. В. КОМНАТНЫЙ, кандидат технических наук; Производственное управление информационных технологий РУП «ПО Белоруснефть», г. Гомель*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕКОНДУКТИВНЫХ ПОМЕХ НА УСТРОЙСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Рассмотрены вопросы моделирования воздействия некондуктивных помех на аппаратуру железнодорожной автоматики. Проанализированы имеющиеся публикации по проблеме моделирования воздействия электромагнитных помех на электронные приборы. Для построения расчетных моделей выбрана методология системного подхода. Сформулированы операторные соотношения для оценки параметров помех. Рассмотрены характеристики процесса воздействия помех на аппаратуру железнодорожной автоматики с учетом вероятностного характера как параметров помех, так и помехоустойчивости аппаратуры автоматики. Выведены соотношения для расчета вероятности сбоя технических средств автоматики на основе рассмотрения энергии помех, рассеиваемой во входных цепях узлов рецептора помех, в качестве основного параметра помех и показаны преимущества такого подхода.

**П**ри разработке микроэлектронных и микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) в числе мероприятий по обеспечению надежности и безопасности необходимо строгое решение проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) аппаратуры вновь проектируемых систем ЖАТ с окружающей электромагнитной обстановкой (ЭМО).

Многие авторы исследовали различные аспекты проблемы ЭМС систем ЖАТ. Так, К. А. Бочков исследовал воздействие на электронную аппаратуру ЖАТ пачек наносекундных импульсов помех [1]. А. П. Костроминов изучал помехи от коммутации электромагнитных реле и разрядов молнии [2]. М. П. Бадер рассмотрел проблему ЭМС систем ЖАТ с линиями тягового электроснабжения [3]. В. М. Лисенков сосредоточил внимание на анализе помех, специфических для трактов передачи АЛС и автоблокировки [4].

Тем не менее, проблема ЭМС микроэлектронных и микропроцессорных систем ЖАТ далека от исчерпывающего разрешения. Исследования в этой области продолжаются.

На формирование ЭМО в местах эксплуатации аппаратуры ЖАТ существенное влияние оказывают источники некондуктивных помех – электростатические разряды (ЭСР) в корпуса аппаратуры, молнии, высоковольтные линии электропередачи (ЛЭП), контактная сеть железных дорог. Для анализа ЭМС микроэлектронных и микропроцессорных систем различного назначения широко применяются методы математического моделирования. Разработке адекватных и практически применимых моделей воздействия помех на электронную аппаратуру посвящены работы многих авто-

ров [5 – 8]. В частности, в [8] для моделирования воздействия токов в системе молниезащиты здания на электронную технику внутри его предложен системный подход. Авторы рассматривают ток в системе молниезащиты как входную функцию системы, помехи на входах электронной аппаратуры – как выходную функцию. Описание физических процессов воздействия тока молнии на рецепторы помех посредством электромагнитного поля называется функцией преобразования. Эта терминология обычно применяется в процедурах системного анализа [9].

Тем не менее, примененные в чистом виде для моделирования воздействия помех на микроэлектронную аппаратуру ЖАТ методы системного анализа не позволяют математически описать физические и технические особенности рассматриваемых процессов и объектов. С другой стороны, любое моделирование включает в себя выявление существенных связей между объектами, что, в свою очередь, является одной из составных частей методологии системного подхода [10, 11]. Наиболее общую математическую формулировку найденных связей можно провести методами математической теории систем [12].

В рассматриваемом процессе воздействия некондуктивных помех на микроэлектронную аппаратуру ЖАТ между источником и рецептором помех существует паразитная связь по помеховому полю. В случае прямого электростатического разряда на корпус устройства ЖАТ источник ЭСР характеризуется малыми токами и высокими напряжениями. Кроме того, узлы рецептора помех находятся в ближней зоне излучения, и, таким образом, помехонесущее поле является квазистатическим электрическим. Можно выразить связь

между напряжением на источнике помех и помехами в узлах приемника в таком виде:

$$\begin{aligned} B(\alpha, u_u) &= \sigma, \\ S(\alpha_1, \sigma) &= u_p, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $B$  – оператор, с помощью которого вычисляется распределение заряда по корпусу технического средства;  $\alpha, \alpha_1$  – геометрические характеристики задачи;  $\sigma$  – распределение заряда на корпусе технического средства, Кл/м<sup>2</sup>;  $u_u$  – напряжение на корпусе, В;  $S$  – оператор, с помощью которого вычисляется напряжение помехи в узлах приемника;  $u_p$  – напряжение помех в узлах приемника, В.

В случае воздействия на аппаратуру ЖАТ помех от молнии, высоковольтных ЛЭП, контактной сети железных дорог, т. е. источников с большими токами и достаточно удаленных, связь по помеховому полю источника и приемника помех может быть записана в операторной форме с учетом результатов [8, 13, 14]:

$$\begin{aligned} G(\alpha, I_u) &= j, \\ H(\alpha_1, j) &= u_p, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $G$  – оператор, с помощью которого вычисляется распределение плотности тока по корпусу технического средства;  $\alpha, \alpha_1$  – геометрические характеристики задачи;  $j$  – распределение плотности тока по корпусу технического средства, А/м<sup>2</sup>;  $I_u$  – ток источника помех, А;  $H$  – оператор, с помощью которого вычисляется напряжение помехи в узлах приемника;  $u_p$  – напряжение помех в узлах приемника, В.

Выражения (1) и (2) представляют собой математическую модель воздействия некондуктивных помех на электронную аппаратуру ЖАТ, выраженную в терминах аппарата математической теории систем. Вид входящих в эти выражения операторов определяется исходя из выбранного расчетного метода электрофизики [14].

Как известно, характеристики помех изменяются случайным образом. Также случайно изменяется помехоустойчивость от приемника к приемнику. Поэтому для характеристики воздействия помех на приемники разработаны вероятностные модели [15]. В качестве параметров этих моделей целесообразно рассматривать энергию помех, рассеиваемую во входных цепях узлов приемника. Это объясняется тем, что сбой приемника наступает с вероятностью, равной единице, когда энергия помех превышает некоторый уровень:

$$\left. \begin{aligned} P_{сб}(W < W_{пор}) &= 0 \\ P_{сб}(W \geq W_{пор}) &= 1 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где  $P_{сб}$  – вероятность сбоя приемника;  $W$  – энергия помехи, Дж;  $W_{пор}$  – пороговая энергия сбоя данного приемника, Дж.

Выражение (3) представляет собой функцию распределения помехоустойчивости и может быть представлено единичной функцией вида  $P(W) = e(w - w_{пор})$ .

В [15] выведена формула для вычисления вероятности сбоя микроэлектронных приборов по плотности вероятности помех  $p(W)$  и функции распределения помехоустойчивости  $P(W)$

$$P_{сб} = \int_0^{\infty} p(W)P(W) dW, \quad (4)$$

где  $P_{сб}$  – вероятность сбоя.

После подстановки в (4) значения функции распределения помехоустойчивости получается

$$P_{сб} = \int_0^{\infty} p(W)e(W - W_{пор}) dW. \quad (5)$$

По свойству аддитивности несобственного интеграла формулу (5) можно записать в виде

$$\begin{aligned} P_{сб} &= \int_0^{W_{пор}} p(W)e(W - W_{пор}) dW + \\ &+ \int_{W_{пор}}^{\infty} p(W)e(W - W_{пор}) dW \end{aligned} \quad (6)$$

На промежутке  $[0, W_{пор})$  значение единичной функции равно нулю, а на промежутке  $[W_{пор}, \infty)$  – единице. Поэтому вероятность сбоя приемника определяется через плотность вероятности распределения уровней энергии  $p(W)$  следующим образом (рисунок 1):

$$P_{сб} = \int_{W_{пор}}^{\infty} p(W) dW. \quad (7)$$

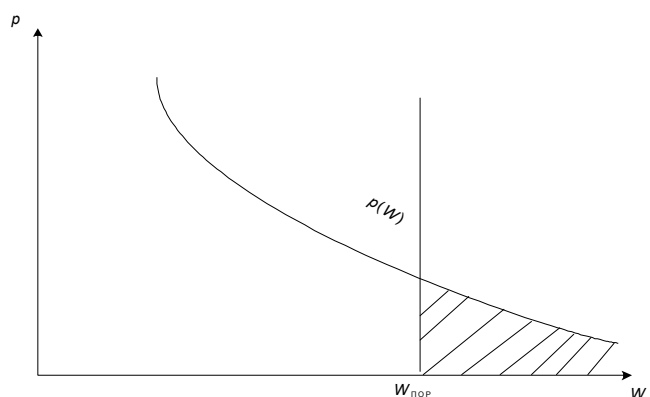


Рисунок 1 – Вероятностная модель помехоустойчивости устройств СЖАТ

Условие помехоустойчивости приемника имеет вид

$$P_{сб} \leq P_3, \quad (8)$$

где  $P_3$  – нормированное значение вероятности сбоя.

Для расчетов по формулам (7) и (8) требуется знать распределение энергии помех в узлах рецептора. Энергия помех может быть вычислена по известным соотношениям [13] через напряжение помех, которое, в свою очередь, рассчитывается по моделям, представленным формулами (1) и (2).

Изложенные результаты позволяют сделать вывод, что для построения моделей ЭМС микроэлектронных СЖАТ наиболее рационально совместное использование вероятностного подхода к моделированию помехоустойчивости и расчета параметров помех на основе математической теории систем. Вероятностный подход позволяет производить рациональный выбор параметров помех и характеристик помехоустойчивости, а операторные модели – выявить и четко формализовать зависимость параметров помех от свойств источников и рецепторов помех. Это дает возможность существенно повысить адекватность математического моделирования воздействия некондуктивных помех на устройства ЖАТ. Следует отметить, что использование энергии помех как параметра модели помехоустойчивости является более обоснованным физическими соображениями, нежели использование напряжения помех в [8], и упрощает расчетные соотношения для вероятности сбоя технических средств ЖАТ.

#### Список литературы

- 1 **Бочков, К. А.** Проблема повышения адекватности испытаний на ЭМС микроэлектронных систем железнодорожной автоматики к воздействию пачек импульсных помех / К. А. Бочков, Н. В. Рязанцева // Испытания систем железнодорожной автоматики и телемеханики на безопасность и электромагнитную совместимость: материалы Второго международного симпозиума / М-во образования Респ. Беларусь, Белстандарт, Белорус. ж.д., Регистр по сертификации МПС РФ, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2003. – С. 58 – 66.
- 2 **Костроминов, А. П.** Защита устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от помех / А. П. Костроминов. – М.: Транспорт, 1997. – 192 с.

Получено 25.10.2005

**K. A. Bochkov, D. V. Komnatny.** Modeling of non-conductive disturbances exposure on railway automatic by methods of mathematical theory of systems.

The questions of modeling of non-conductive disturbances influence on railway automatic equipment is considered in this article. The available publications on problem of electromagnetic noise influences on electronic devices modeling are examined. The system approach methodology is selected for calculation models development. The operator formulas for noise parameters are formulated. The characteristics of disturbances influence on railway automatic equipment are considered, taking into account the probabilistic nature of noise parameters and equipment noise immunity. The expressions for automatic devices malfunction probability is created by consideration of noise energy, as main noise parameter. The advantage of such approach is displayed.

- 3 **Бадер, М. П.** Электромагнитная совместимость: учеб. пособие / М. П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
- 4 **Лисенков, В. М.** Теория автоматических систем интервального регулирования / В. М. Лисенков. – М.: Транспорт, 1995. – 150 с.
- 5 **Хабигер, Э.** Электромагнитная совместимость. Основы ее применения в технике / Э. Хабигер. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
- 6 ЭМС радиоэлектронных средств и систем / В. И. Владимиров [и др.] – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.
- 7 **Gianetti, R.** Two-dimensional Simulation of Conducted Currents Characteristics in Electrical Discharges / R. Gianetti, B. Tellini // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1999. – Vol. 41, № 3. – P. 260 – 264.
- 8 **Orlandi, A.** Systematic Approach for the Analysis of the Electromagnetic Environment Inside a Building During Lightning Strike / A. Orlandi, C. Mazzeti, Z. Flisowski, M. Yarmarkin // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1998. – Vol. 40, № 4. – P. 521 – 535.
- 9 **Оптнер, С. Л.** Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем; пер. с англ. / С. Л. Оптнер. – М.: Советское радио, 1969. – 216 с.
- 10 **Самарский, А. А.** Математическое моделирование. Идеи. Методы. Приложения / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 302 с.
- 11 Техническое творчество: теория, практика, методология: энциклопедический справочник / А. И. Половинкин [и др.]; под ред. А. И. Половинкина, В. В. Попова. – М.: МПО “Информатика”, 1995. – 405 с.
- 12 **Мороз, А. И.** Курс теории систем / А. И. Мороз. – М.: Высшая школа, 1987. – 304 с.
- 13 **Кравченко, В. И.** Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В. И. Кравченко, Е. А. Болотов, Н. И. Летунова. – М.: Радио и связь, 1987. – 255 с.
- 14 **Демирчан, К. С.** Машинные расчеты электромагнитных полей / К. С. Демирчан, В. Л. Чечурин. – М.: Высшая школа, 1986. – 240 с.
- 15 **Бочков, К. А.** Вероятностный метод определения уровней ЭМС микроэлектронных систем обеспечения безопасности / К. А. Бочков, Н. В. Рязанцева // Испытания систем железнодорожной автоматики и телемеханики на безопасность и электромагнитную совместимость: труды международного семинара / М-во образования Респ. Беларусь, Белстандарт, Белорус. ж.д., Регистр по сертификации МПС РФ, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2001. – С. 20 – 29.