

## ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПЕЗДОВ

Кандидат техн. наук, старший научный сотрудник **Комнатный Д. В.**  
(Белорусский государственный университет транспорта)

### PROBABILISTIC MODELLING OF TRAIN TRAFFIC SAFETY SUPPORT SYSTEMS ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

Ph. D. (Tech), Senior research fellow **Komnatny D. V.**  
(Byelorussian State University of Transport)

*Электромагнитная совместимость, вероятностная модель, риск, системы обеспечения безопасности движения поездов*  
*Electromagnetic compatibility, probabilistic model, risk, traffic safety support system*

*В статье предложена методика вероятностно-логического моделирования и оценка риска эксплуатации микроэлектронных и микропроцессорных систем обеспечения безопасности движения поездов в данной электромагнитной обстановке. Рассмотрен способ оценки риска эксплуатации указанных систем, позволяющий качественно классифицировать значения риска на научной основе. Обсуждаются способы расчета показателей риска по характеристикам электромагнитной обстановки и помехоустойчивости аппаратуры систем железнодорожной автоматики.*

*The method of probabilistic-logical modeling and risk estimation for microelectronic and microprocessor train traffic safety support systems in given electromagnetic environment is offered in the article. The method of shown systems operation risk estimation allowing classify qualitatively the risk values on scientific proof is considered. The methods of risk index calculation on electromagnetic environment and railway automatic systems noise immunity characteristics are discussed.*

Современный уровень развития техники характеризуется широким распространением в различных отраслях народного хозяйства сложных технических систем. Высокую актуальность приобрела проблема обеспечения надежности и безопасности таких систем. Поэтому в настоящее время созданы и успешно применяются вероятностно-логические методы расчета показателей надежности, безопасности и техногенного риска эксплуатации таких систем, в том числе и систем управления ответственными технологическими процессами. С помощью этих методов рассматривались вопросы безопасности атомных электростанций [1] и безопасности движения поездов [2, 3].

В теории систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) с проблемой безопасности неразрывно связывается проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) указанных систем с окружающей электромагнитной обстановкой (ЭМО). Поэтому возникает обоснованное стремление применять для анализа ЭМС СЖАТ аналогичный вероятностный подход. Это подтверждается тем соображением, что как параметры электромагнитных помех, так и параметры элементной базы микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры ЖАТ, обуславливающие помехоустойчивость, имеют вероятностный характер.

По данной проблематике выполнено достаточно большое количество исследований. Работы [4, 5, 6] посвящены рассмотрению различных аспектов ЭМС электронного оборудования методами теории вероятностей. В диссертации [7] создана методика решения задач ЭМС известным в теории надежности методом «нагрузка-устойчивость». Тем не менее, по сравнению с анализом безопасности сложных технических систем, методы исследования ЭМС СЖАТ с помощью вероятностного подхода разработаны недостаточно. Существует несколько разнообразных методик, ни одна из которых в настоящее время не стала общепринятой. Вместе с тем, широкая разработка и повсеместное внедрение микроэлектронных и микропроцессорных СЖАТ требует наличия адекватных методик и моделей для строгого решения проблемы ЭМС этих систем, поскольку последствия воздействия электромагнитных помех на эти системы сравнимы с последствиями внутриаппаратурных отказов и сбоев. Те и другие приводят к недопустимому снижению уровня безопасности перевозочного процесса. Поэтому в настоящей статье рассматривается применение известных методик теории безопасности и теории надежности к решению задач ЭМС систем обеспечения безопасности движения поездов (СОБД).

На основании работ [1, 2, 3] можно записать логическое условие успешного функционирования объекта железнодорожного транспорта, на котором осуществляется движение поездов (станции, перегона, блок-участка).

$$A = A_{\text{ИПС}} \wedge A_{\text{ИПП}} \wedge A_{\text{СЖАТ}} \wedge A_{\text{ч}}, \quad (1)$$

где  $A$  – событие успешного функционирования;  
 $A_{\text{ИПС}}$  – событие успешного функционирования подвижного состава;  
 $A_{\text{ИПП}}$  – событие успешного функционирования пути;  
 $A_{\text{СЖАТ}}$  – событие успешного функционирования систем ЖАТ;  
 $A_{\text{ч}}$  – событие успешного функционирования персонала.

В рамках данной статьи рассматривается только событие успешного функционирования СОБД. С учетом того что современные системы обеспечения безопасности состоят из нескольких подсистем различной функциональности и являются распределенными, событие  $A_{\text{СЖАТ}}$  можно представить в виде [1]

$$A_{\text{СЖАТ}} = B_1 \wedge B_2 \wedge B_3 \wedge \dots \wedge B_j, \quad j \in (1 \dots m), \quad (2)$$

где  $B_j$  – событие успешного функционирования подсистемы номер  $j$  в данной ЭМО;

$m$  – число подсистем в данной СОБД.

Выражение (2) является первым приближением, допустимым, тем не менее, для описания широкого набора систем ЖАТ. Более точные представления события  $A_{\text{СЖАТ}}$  могут быть получены путем анализа структуры системы ЖАТ методами вероятностно-логического моделирования [1, 3].

При рассмотрении вопросов ЭМС каждое событие  $B_j$  можно представить следующим образом

$$B_j = G_{1j} \wedge G_{2j} \wedge G_{3j} \wedge \dots \wedge G_{lj}, \quad l \in (1 \dots k), \quad (3)$$

где  $G_{lj}$  – событие успешного выполнения подсистемой  $j$  ее функций под действием  $l$ -того типа помех;

$k$  – число помех, действующих на подсистему  $j$ .

Тогда по [1] вероятность успешного функционирования СОБД в данной ЭМО для событий (2) и (3)

$$P(B) = 1 - \prod_{j=1}^m \left( \prod_{l=1}^k P(G_{lj}) \right), \quad (4)$$

где  $P(G_{lj})$  – вероятность отказа подсистемы  $j$  под действием  $l$ -того типа помех.

Степень безопасности сложной технической системы оценивается вероятностью ее успешного функционирования [1]

$$C = P(B). \quad (5)$$

Однако в теории систем ЖАТ принято оценивать помехоустойчивость СОБД вероятностью сбоя системы в данной ЭМО [7].

$$P_{сб} = 1 - P(B) = Q(B). \quad (6)$$

Для систем управления ответственными технологическими процессами весьма популярна оценка техногенного риска эксплуатации этих систем [1, 8]

$$R = 1 - C = Q(B), \quad (7)$$

и, как следует из (5), применительно к системам железнодорожной автоматики риск их эксплуатации в данной ЭМО оценивается следующим образом

$$R = P_{сб}. \quad (8)$$

Для СОБД такая оценка является наиболее адекватной [8, 9], поскольку:

- отказы или сбои в СОБД случаются с очень малой интенсивностью, но последствия каждого отказа могут нести значительную опасность;
- последствия отказа или сбоя столь велики, что необходимо минимизировать возможность отказа или сбоя;
- экономические последствия отказа или сбоя чрезвычайно велики;
- существует угроза здоровью и жизни большого числа людей (пассажиров и работников железной дороги).

Тем не менее, рассмотренная оценка помехоустойчивости аппаратуры СЖАТ и риска эксплуатации СЖАТ в данной ЭМО не удобна для нормирования. По ней затруднительно установить границы допустимого риска, поэтому в различных странах количественная и качественная оценка приемлемого риска устанавливается не технически, а политически, на основе концепции, особенной в каждом отдельно взятом государстве [9]. Для исключения такого ненаучного вмешательства может применяться оценка риска по [10], где в качестве указанной оценки принято отношение вероятности сбоя к вероятности безотказной работы. Так как сумма этих вероятностей равна единице, то оценка риска определяется по формуле

$$R = \frac{1}{\frac{1}{P_{сб}} - 1}. \quad (9)$$

Для значений риска выделяются следующие условия эксплуатации:

- $0 < R < 1$  – ограниченная безопасность;
- $R = 1$  – критическое состояние, наличие отказов;
- $R > 1$  – опасное состояние, угроза аварии;
- $R \gg 1$  – запредельное состояние, угроза катастрофы.

Наличие в данной оценке риска качественной классификации условий эксплуатации упрощает нормирование риска эксплуатации СЖАТ и уровня помехоустойчивости СЖАТ в ЭМО на месте эксплуатации.

Вероятности  $P(G_{ij})$  отказа (сбоя) аппаратуры микроэлектронных и микропроцессорных СЖАТ под действием электромагнитных помех могут быть вычислены методом «нагрузка-устойчивость» по методике, разработанной в [7]. В общем случае вероятность сбоя вычисляется по формуле

$$P_{сб} = \int_0^{\infty} p(y)P(x)dy, \quad (10)$$

где  $y$  – характеристика помех;

$x$  – характеристика помехоустойчивости;

$p(y)$  – плотность вероятности распределения характеристики помех;

$P(x)$  – функция распределения помехоустойчивости.

Для практических расчетов по методике «нагрузка-устойчивость» необходимы наиболее адекватные и удобные характеристики помех и помехоустойчивости. В качестве таких характеристик целесообразно выбрать энергию помех, рассеиваемую во входных цепях элементной базы узлов аппаратуры СЖАТ. Как известно, энергия помех определяется по формуле

$$W = \frac{1}{R_{вх}} \int_0^{\tau} u^2(t) dt, \quad (11)$$

где  $W$  – энергия помех, Дж;

$R_{вх}$  – входное сопротивление, Ом;

$\tau$  – длительность импульса помехи, с;

$u(t)$  – выражение формы импульса;

$t$  – время, с.

Из формулы (11) видно, что такая характеристика электромагнитных помех зависит от формы, амплитуды и длительности импульса помех, а также от свойств электронной аппаратуры рецептора помех, которые обуславливают ее помехоустойчивость. Следовательно, оказываются принятыми во внимание все основные факторы, от которых зависит помехоустойчивость аппаратуры СЖАТ.

Кроме того, допустимо считать, что отказ или сбой электронных технических средств происходит с вероятностью, равной 1, если энергия помехи превосходит некоторый пороговый уровень. Это обстоятельство позволяет использовать функцию распределения устойчивости простой математической формы

$$P(W) = \begin{cases} 0 & W < W_{пор} \\ 1 & W \geq W_{пор} \end{cases} = e(W - W_{пор}), \quad (12)$$

где  $W_{пор}$  – пороговое значение энергии помех, Дж;

$e$  – единичная функция.

Выражение (12), в свою очередь, позволяет упростить выражение (10) для  $P_{сб}$ , используя свойство аддитивности несобственных интегралов.

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

Для расчетов по описанной методике характеристики сбоев и отказов, вызванных электромагнитными помехами, необходимо знать параметры закона распределения  $p(W)$ . Их определение наталкивается на значительные трудности. Современная нормативная документация не содержит норм на параметры помех. В связи с этим отсутствует аппаратура измерения этих параметров. Проведение измерений внутри рецептора помех затруднительно. Поэтому для систем, критичных по безопасности, необходимо выполнять расчетные оценки плотности распределения энергии помех.

Из (11) видно, что энергия помех зависит от нескольких параметров, которые изменяются случайным образом. Причем параметры импульса помехи во входных цепях рецептора в свою очередь зависят от изменяющихся случайным образом параметров канала проникновения помех. Таким образом, выполнение расчетных оценок с учетом случайного характера всех влияющих факторов оказывается крайне сложной задачей. В качестве пути реализации указанных оценок может быть предложено следующее.

Предполагается, что форма и длительность импульса помехи конкретного вида являются постоянными. Параметры канала распространения помехи, входных цепей рецептора выбираются наихудшими с позиции помехоустойчивости. Тогда случайной величиной остается только амплитуда импульсов помех во входных цепях рецептора. Принимается, что закон распределения этой величины такой же, как и закон распределения амплитуды импульсов помех в источнике. Согласно [7] для распределения амплитуд импульсов помех наиболее целесообразно выбирать усеченный нормальный либо логарифмический нормальный законы распределения. Значения амплитуд импульсов помех во входных цепях рецептора могут быть рассчитаны по значениям амплитуд импульсов источника помех на основе известных свойств канала распространения.

Закон распределения энергии помех определяется на основании этих предположений по известной теореме теории вероятности о случайной величине, функционально зависящей от другой случайной величины [11], в данном случае от амплитуды импульса.

Изложенная методика вероятностного моделирования ЭМС СЖАТ позволяет учитывать структуру системы, свойства элементной базы, типы помех, воздействующих на систему, характеристики каждого типа помех. В ней отражена вероятностная природа как параметров помех, так и параметров помехоустойчивости систем. Методика позволяет оценивать помехоустойчивость СЖАТ и последствия воздействия помех на эти системы путем оценки риска эксплуатации. Полученные

результаты могут найти применение при доказательстве безопасности СЖАТ и при принятии решений управления риском эксплуатации СЖАТ [9]. Поэтому данная методика может использоваться в практике работы конструкторских организаций и испытательных лабораторий железнодорожного транспорта.

#### Литература

1. Острейковский, В. А., Швыряев Ю. В. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ. – М. : Физматлит, 2008. – 352 с.
2. Лисенков, В. М. Безопасность технических средств в системах управления движением поездов. – М. : Транспорт, 1992. – 160 с.
3. Лисенков В. М. Статистическая теория безопасности движения поездов. – М. : ВИНТИ РАН, 1999. – 332 с.
4. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее применения в технике. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
5. Orlandi A., Mazzeti L., Flisowski Z., Yarmarkin M. Systematic approach for the Analysis of the Electromagnetic environment Inside a Building During Lightning Strike // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1998. – Vol. 40. № 4. – P. 521–535.

6. Кечиев Л. Н., Степанов В. В., Арчаков В. В. Предотвращение катастроф электромагнитного характера в информационных системах // Технологии ЭМС. – 2005. – № 4(8). – С. 7-19.

7. Бочков К. А. Теория и методы контроля электромагнитной совместимости микроэлектронных систем обеспечения безопасности движения поездов. Дисс. на соискание уч. степ. доктора техн. наук. – М. МИИТ, 1993. – 379 с.

8. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений. – М. : Мир, 1990. – 208 с.

9. Малкин В. С. Надежность технических систем и техногенный риск. Ростов н/Д : Феникс, 2010. – 432 с.

10. Сосновский Л.А. Риск. Механотермодинамика необратимых повреждений. – Гомель : БелГУТ, 2004. – 317 с.

11. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 2002. – 575 с.

#### Сведения об авторе

**Комнатный Дмитрий Викторович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Белорусского государственного университета транспорта, НИЛ «Безопасность и ЭМС»

246653, Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Кирова, 34.  
Тел. (375-232) 95-39-06.