

УДК 656.25

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

## ВЕРОЯТНОСТНО-ЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПоеЗДОВ

Предложена методика вероятностно-логического анализа помехоустойчивости микроэлектронных и микропроцессорных систем обеспечения безопасности движения поездов в данной электромагнитной обстановке. Указанная методика является необходимой составляющей системного подхода к исследованию систем обеспечения безопасности. Рассмотрен способ оценки риска эксплуатации указанных систем, позволяющий качественно классифицировать значения риска на научной основе. Обсуждаются способы расчета показателей помехоустойчивости и риска по характеристикам электромагнитной обстановки и параметров аппаратуры систем железнодорожной автоматики.

На современном этапе развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) происходит не просто широкое внедрение микропроцессорных и микроэлектронных систем, но переход к новым концепциям разработки и эксплуатации систем управления движением поездов – цифровизации и интеллектуализации. Это объясняется необходимостью на новом уровне решить две основные задачи функционирования железнодорожного транспорта: обеспечение требуемой провозной способности и высокого уровня безопасности движения поездов. Наиболее эффективным путем решения этих задач является создание комплексной системы управления и обеспечения безопасности движения поездов. В современных условиях повышение безопасности движения требует не только развития традиционных систем ЖАТ, но и привлечения дополнительных ресурсов на основе информационных технологий и цифровых систем. Таким образом, на базе систем СЦБ организуется система обеспечения безопасности движения, а на базе АСУ – система управления процессами перевозок. Взаимодействуя между собой, эти системы образуют комплексную систему управления; кроме того независимо они выходят на региональный уровень управления. Следовательно, система управления процессами перевозок в настоящее время является единым комплексом, основанным на единой вычислительной среде и единой цифровой сети. В ней образуются три контура безопасности. Первый – централизованный, он заключается в централизации управления маршрутами и координатного управления в диспетчерском центре управления. Второй – децентрализованный, его образуют системы СЦБ и технической диагностики. Третий – бортовой, в составе которого имеются системы АЛС и автоведения [1, 2]. Архитектура современной цифровой сети передачи данных отличается наличием большого числа электронной аппаратуры, а именно: главных станций, распределительных узлов (хаб), узлов доступа (нод), усилителей [3].

Вместе с тем микроэлектронная элементная база оказывается весьма чувствительна к электромагнитным помехам. Это связано с увеличением сложности схемотехнических решений, наряду с уменьшением габаритов, увеличением плотности монтажа, повышением быстродействия и расширением спектров сигналов,

уменьшением потребляемой мощности электронных элементов [3].

Таким образом, налицо ухудшение электромагнитной обстановки на объектах СЦБ и обострение проблемы электромагнитной совместимости. Последствия воздействия электромагнитных помех сравнимы с последствиями отказов аппаратуры и ошибками программного обеспечения и заключаются в том, что системы ЖАТ не могут обеспечивать требуемый уровень безопасности движения.

Указанные системы являются сложными человеко-машинными системами с высокой зависимостью от конфигурации и количества объектов управления. Поэтому для строгого решения проблемы электромагнитной совместимости необходимы адекватные методы и модели. Используемый для систем, построенных на реле I класса надежности, метод экспертных оценок для систем микроэлектронных и микропроцессорных оказывается недостаточным [4].

Для анализа и проектирования сложных радиотехнических систем и систем автоматического управления наиболее адекватным является системный подход. В нем предполагается, что предметом исследования является сложное взаимодействие многих подсистем между собой и с окружающей средой. При этом необходимо учитывать случайные изменения, отклонения параметров и характеристик этих подсистем, что невозможно без использования вероятностных методов. Такое заключение особенно справедливо для проблемы электромагнитной совместимости, так как ошибки, помехи, помехоустойчивость являются случайными величинами [5].

В литературе по анализу безопасности систем управления ответственными технологическими процессами (атомные электростанции, железнодорожные станции и узлы, космические комплексы) описана применяемая разными авторами независимо методика вероятностно-логического анализа безопасности [6–8]. Представляется, что эта методика достаточно апробирована практикой, таким образом, может использоваться и для решения проблемы электромагнитной совместимости систем обеспечения безопасности движения поездов (СОБД).

На основании указанных работ, а также [9] можно записать логическое условие успешного функционирования объекта железнодорожного транспорта, на котором осуществляется движение поездов (станции, перегона, блок-участка):

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

где  $A$ ,  $A_{\text{ПС}}$ ,  $A_{\text{ПП}}$ ,  $A_{\text{СЖАТ}}$ ,  $A_{\text{ч}}$  – событие успешного функционирования соответственно подвижного состава, пути, систем ЖАТ, 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 следующем виде [7]:

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

где  $B_j$  – событие успешного функционирования подсистемы номер  $j$  в данной электромагнитной обстановке (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 [6, 7].

При рассмотрении вопросов электромагнитной совместимости 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  $l$ -го типа помех;  $k$  – число помех, действующих на подсистему  $j$ .

Тогда вероятность успешного функционирования СОБД в данной электромагнитной обстановке 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  $l$ -го типа помех.

Степень безопасности сложной технической системы оценивается вероятностью ее успешного функционирования

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

Однако в теории систем ЖАТ принято оценивать помехоустойчивость СОБД вероятностью сбоя системы в данной ЭМО

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

Для систем управления ответственными технологическими процессами весьма популярна оценка технологического риска эксплуатации этих систем

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

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

$$R = P_{\text{сб}}. \quad (8)$$

Для СОБД такая оценка является наиболее адекватной, 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 (пассажиры и работники 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 [10]. Для исключения такого ненаучного вмешательства может применяться оценка риска по [11], 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

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

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  $P(G_{lj})$  отказа (сбоя) аппаратуры микроэлектронных и микропроцессорных СЖАТ под действием электромагнитных помех могут быть вычислены методом «нагрузка – устойчивость» по методике, разработанной в [12]. В общем случае вероятность сбоя вычисляется по формуле

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

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

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

где  $W$  – энергия помех, Дж;  $R_{\text{вх}}$  – 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 помехоустойчивости простой математической формы

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

где  $W_{\text{пор}}$  – пороговое значение энергии помех, Дж;  $e$  – единичная функция.

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

$$P_{\text{сб}} = \int_{W_{\text{пор}}}^{\infty} p(W) dW. \quad (13)$$

При выполнении расчетных оценок необходимо учитывать характеристики канала распространения помех, источника и рецептора помех, от которых зависят параметры импульса помехи на входе рецептора. В [13] отмечается, что эта задача может быть решена только приближенным методом разложения в ряд Эджворта по полиномам Эрмита. Причем расчет коэффициентов требует многократного вычисления несобственных интегралов. С другой стороны, в [3] указывается, что распределение поглощаемой при воздействии электростатического разряда на микроэлектронные узлы энергии подчиняется закону Гаусса. Поэтому для упрощения аппарата модели, не снижающего ее адекватности, допустимо применить метод линеаризации. В этом методе предполагается, что случайная величина, зависящая от множества других случайных величин, подчиняется нормальному закону распределения плотности вероятности. Параметры этого закона [14] применительно к поглощаемой в узлах рецептора энергии помех определяются по формуле

$$W_{\mu} = W(U_{\mu}, \tau_{\mu}, \alpha_{\mu}, R_{\text{вх}\mu}) \quad (14)$$

и дисперсий

$$\sigma_W = \frac{\partial W}{\partial U} \sigma_U + \frac{\partial W}{\partial \tau} \sigma_{\tau} + \frac{\partial W}{\partial \alpha} \sigma_{\alpha} + \frac{\partial W}{\partial R} \sigma_R, \quad (15)$$

где  $W_{\mu}$  – математическое ожидание энергии помехи, Дж;  $U_{\mu}$  – математическое ожидание амплитуды помехи, В;  $\tau_{\mu}$  – математическое ожидание длительности помехи, с;  $\alpha_{\mu}$  – математическое ожидание временных параметров помехи, с<sup>-1</sup>;  $R_{\text{вх}\mu}$  – математическое ожидание входного сопротивления рецептора, Ом;  $\sigma_W, \sigma_U, \sigma_{\tau}, \sigma_{\alpha}, \sigma_R$  – дисперсии энергии, амплитуды, длительности, временных параметров помехи и входного сопротивления рецептора.

Тогда вероятность сбоя легко определить по известному из теории вероятности соотношению

$$P_{\text{сб}} = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{W_{\text{пор}} - W_{\mu}}{\sigma_W}\right). \quad (16)$$

Из (14) и (15) следует, что параметры закона распределения плотности вероятности энергии помех зависят от параметров распределения плотности вероятности большого числа случайных величин. Математические ожидания этих величин могут быть найдены расчетным путем по известным моделям каналов распространения помех [15]. Расчет дисперсий более сложен. Наиболее трудоемким является способ расчета гистограмм распределения параметров помех на входе рецептора и определения закона распределения и его параметров, который реализован в [16]. Зачастую значения дисперсий принимаются из опытных данных или определяются через стандартный коэффициент вариации [17]. Например, для амплитуды импульса дисперсия определяется следующей формулой:

$$\sigma_U = \delta_U U_{\mu}, \quad (17)$$

где  $\delta_U$  – коэффициент вариации.

Также допустимо некоторые из величин считать детерминированными и значение их принять по принципу наилучших условий. К таким величинам относятся первичные электрические параметры каналов проникновения помех, входные сопротивления рецепторов и др. [18].

Изложенная методика вероятностного анализа помехоустойчивости 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 и помехоустойчивость СЖАТ, и последствия воздействия помех на эти системы путем расчета риска эксплуатации. Методика является составной частью системного подхода к анализу электромагнитной совместимости сложных технических систем. Полученные результаты могут найти применение при доказательстве безопасности СЖАТ и при принятии решений управления риском эксплуатации СЖАТ [10]. Поэтому данная методика может использоваться в практике работы конструкторских организаций и испытательных лабораторий железнодорожного транспорта.

#### Список литературы

- 1 **Рогачева, И. Л.** Эксплуатационная надежность систем электрической централизации нового поколения / И. Л. Рогачева. – М. : Маршрут, 2006. – 230 с.
- 2 **Высокоскоростной железнодорожный транспорт.** Общий курс. В 2 т. / И. П. Киселев [и др.]. – М. : ФБГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. – Т. 1. – 398 с.
- 3 **Соколов, С. А.** Воздействие внешних электромагнитных полей на оптические кабели связи и гибридные линии / С. А. Соколов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2018. – 214 с.
- 4 **Бочков, К. А.** Микропроцессорные системы автоматики на железнодорожном транспорте / К. А. Бочков, А. Н. Коврига, С. Н. Харлап. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 254 с.
- 5 **Пестряков, Б. В.** Радиотехнические системы / Б. В. Пестряков, В. Д. Кузнецов. – М. : Радио и связь, 1985. – 376 с.
- 6 **Лисенков, В. М.** Статистическая теория безопасности движения поездов / В. М. Лисенков. – М. : ВИНТИ РАН, 1999. – 332 с.

- 7 **Острейковский, В. А.** Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ / В. А. Острейковский, Ю. В. Швыряев. – М. : Физматлит, 2008. – 252 с.
- 8 **Шибанов, Г. П.** Обитаемость космоса и безопасность пребывания в нем человека / Г. П. Шибанов. – М. : Машиностроение, 2007. – 544 с.
- 9 **Комнатный, Д. В.** Вероятностное моделирование электромагнитной совместимости систем обеспечения безопасности движения поездов / Д. В. Комнатный // Транспорт: Наука, техника, управление. – 2011. – № 9. – С. 25–27.
- 10 **Малкин, В. С.** Надежность технических систем и техногенный риск / В. С. Малкин. – Ростов н/Д : Феникс, 2010. – 432 с.
- 11 **Сосновский, Л. А.** Риск. Механотермодинамика необратимых повреждений / Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2004. – 317 с.
- 12 **Бочков, К. А.** Элементы моделирования электромагнитной совместимости устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / К. А. Бочков, Д. В. Комнатный. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 185 с.
- 13 **Левин, Б. Р.** Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин. – М. : Радио и связь, 1989. – 656 с.
- 14 **Вентцель, Е. С.** Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Высш. шк., 2002. – 575 с.
- 15 **Кравченко, В. И.** Грозозащита радиоэлектронных средств / В. И. Кравченко. – М. : Радио и связь, 1990. – 261 с.
- 16 **Арайс, Е. А.** Моделирование неоднородных цепей и систем на ЭВМ / Е. А. Арайс, В. М. Дмитриев. – М. : Радио и связь, 1982. – 160 с.
- 17 **Синицын А. П.** Расчет конструкций на основе теории риска / А. П. Синицын. – М. : Стройиздат, 1985. – 304 с.
- 18 **Лисенков, В. М.** Методы анализа и синтеза рельсовых цепей (статистический подход) / В. М. Лисенков. – М. : ВИНТИ РАН, 2014. – 202 с.

Получено 07.10.2020

**D. V. Komnatny.** Probabilistic-logical analysis of train traffic safety support systems noise immunity.

The method of probabilistic-logical modeling for microelectronic and microprocessor train traffic safety support systems noise immunity in given electromagnetic environment is offered in the article. This method is a part of system approach for safety safety-support systems investigations. 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.