УДК 656.25

Вероятностный метод нормирования ЭМС железнодорожной автоматики

Константин БОЧКОВ
Konstantin A. BOCHKOV

Дмитрий КОМНАТНЫЙ
Dmitry V. KOMNATNY

Бочков Константин Афанасьевич *– доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе Белорусского государственного университета транспорта, Гомель, Беларусь.*
Комнатный Дмитрий Викторович *– кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Белорусского государственного университета транспорта, Гомель, Беларусь.*

Probabilistic Method for Rationing of EMC of Railway Automatics
(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 200)

Рассматривается научно-техническая проблема нормирования уровня помехоустойчивости и жёсткости испытаний железнодорожной автоматики и телемеханики. Проблема остается актуальной в связи с широким внедрением микропроцессорных и компьютерных систем автоматики, обеспечивающих безопасность движения поездов. Поставлена задача найти нормы помехоустойчивости на основе учёта вероятностного характера уровня помех и уровня помехоустойчивости элементной базы аппаратуры. Методом «нагрузка–устойчивость» получены уравнения для определения нормируемого значения помехозащищенности. Рассчитанные по предлагаемой методике нормы позволяют оптимизировать жёсткость испытаний и сопутствующие им конструкторские решения.

Ключевые слова: железная дорога, системы автоматики и телемеханики, электромагнитная совместимость, нормирование, вероятностный подход, методы испытаний, вероятность сбоя, безопасность движения поездов.

Микроэлектронные и микропроцессорные системы железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) выполняют ответственные функции обеспечения безопасности движения поездов. Поэтому к ним предъявляются высокие требования по электромагнитной совместимости (ЭМС), отраженные в нормативно-технической документации.

В этой документации по сложившейся практике нормы на ЭМС выбираются по принципу наихудших условий, класс жёсткости испытаний определяется набором качественных признаков окружающей электромагнитной обстановки (ЭМО), а степень жёсткости испытаний взята с целью воспроизводства максимального уровня помех. Основными стандартизированными величинами для описания ЭМС выступают «уровень электромагнитной совместимости», то есть максимальный уровень помех, действующих в условиях эксплуатации, и «уровень невосприимчивости». Для таких величин в нормативно-технической документации задаются фиксированные значения. Поэтому данный подход к установлению норм на ЭМС по принципу построения является детерминистским.

С другой стороны, в современной теории СЖАТ [1–3] уровень безопасности и электромагнитной совместимости выражается вероятностью сбоя аппаратуры во время её эксплуатации.

Следовательно, задача нормирования ЭМС таких систем должна решаться с позиций обеспечения требуемой вероятности сбоя аппаратуры в ЭМО и с учётом вероятностных свойств воздействующих помех и уровней помехоустойчивости. При этом необходимо обращать внимание и на особенности построения микроэлектронных и микропроцессорных СЖАТ. Для обеспечения требуемого уровня безопасности они строятся по принципу «два из двух» или «два из трёх» и включают в себя, помимо собственно вычислительных каналов, блоки схем сравнения и блоки схем отключения. Первые выполняют функцию обнаружения сбоев, вторые – функцию блокировки вычислительного канала в защитном состоянии при обнаружении сбоя. Согласно [2], вероятность сбоя аппаратуры P_{mlf} определяется вероятностью сбоя вычислительного канала P_{mfch}, вероятностью обнаружения этого сбоя P_{dt} и вероятностью перевода канала в защитное состояние P_{dsch}: $P_{mlf} = P_{mfch}(1-P_{dt}P_{dsch})$.

Так как блоки схем сравнения и блоки схем отключения оказывают существенное влияние на безопасность системы и работают по принципу самопроверки, то логично считать заданными величины вероятностей P_{dt} и P_{dsch} наряду с P_{mfch}. Причем вероятности P_{dt} и P_{dsch} должны быть весьма высокими и являются вероятностями безотказной работы соответствующих блоков в данной ЭМО. Тогда для нормирования используются величины вероятностей отказов своего вычислительного канала: $Q_{dt}=1-P_{dt}$, $Q_{dsch}=1-P_{dsch}$, $P_{mfch} = P_{mlf} / (1-P_{dt}P_{dsch})$.

Поскольку электромагнитная обстановка в месте эксплуатации СЖАТ бывает зачастую заданной, то задача нормирования ЭМС может быть поставлена в следующей форме: по заданной вероятности сбоя определить нормированное значение уровня помехозащищенности блока аппаратуры системы при известных параметрах закона распределения плотности вероятности уровня помех и заданных ограничениях на стандартные отклонения помехозащищенности.

Решение этой задачи дает ответ на вопрос, каковы должны быть характеристики уровней помехозащищенности аппаратуры, чтобы она работала с заданной вероятностью сбоя в ЭМО на месте ее эксплуатации.

Для получения решения необходимо иметь математическое выражение, связывающее статистические параметры закона распределения плотности вероятности помех, фиксированное значение среднеквадратического отклонения помехозащищённости, неизвестное математическое ожидание уровня помехозащищенности, которое и является нормированным, а также вероятность сбоя. Такое выражение, аналогично [4], называется функцией связи и имеет вид $P_{mfch}=f(\mu_R, \sigma_R, \mu_N, \sigma_N)$. В этом соотношении μ_R – математическое ожидание помехоустойчивости электронной аппаратуры, σ_R – среднеквадратическое отклонение ее помехоустойчивости, μ_N – математическое ожидание уровня помех в ЭМО на месте эксплуатации, σ_N – среднеквадратическое отклонение уровня помех.

Функции связи получены известным методом «нагрузка–устойчивость» [5]. В [3] приведены результаты применения метода для нормального распределения помехоустойчивости, что соответствует выводам центральной предельной теоремы и наиболее распространенных законов распределения помех [6].

При распределении помех по нормальному закону функция связи имеет вид

$$P_{mlf} = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{\mu_R - \mu_N}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_N^2}}\right), \qquad (1)$$

где Φ – интеграл вероятностей.

При распределении помех по закону Рэлея

$$P_{mlf} = exp\left(-\frac{\mu_R^2}{2\left(\sigma_R^2 + \sigma_N^2\right)}\right)\frac{\sigma_N}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_N^2}} \cdot$$

$$\cdot\left[\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{\mu_R \sigma_N}{\sigma_R\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_N^2}}\right)\right]. \qquad (2)$$

При экспоненциальном распределении помех с показателем λ

$$P_{mlf} = exp\left(-\frac{1}{2}\left(2\mu_R\lambda - \lambda^2\sigma_R^2\right)\right) \cdot$$

$$\cdot\left[\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{\mu_R - \lambda\sigma_R^2}{\sigma_R}\right)\right]. \qquad (3)$$

При логонормальном распределении помех

$$P_{mlf} = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{\mu_R - ln\mu_N}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{lnN}^2}} \right). \quad (4)$$

На практике возможные значения уровня помех и уровня помехозащищенности ограничены сверху и снизу. Поэтому представляет интерес случай, когда уровни помех и помехозащищенности распределены по усечённому нормальному закону с параметрами *a, b, c, d*. Для этого случая функция связи имеет вид

$$P_{mlf} = 1 - \frac{\Phi\left(\frac{b - c - (\mu_R - \mu_N)}{\sigma_R^2 + \sigma_N^2} \right) - \Phi\left(\frac{-(\mu_R - \mu_N)}{\sigma_R^2 + \sigma_N^2} \right)}{\Phi\left(\frac{b - c - (\mu_R - \mu_N)}{\sigma_R^2 + \sigma_N^2} \right) - \Phi\left(\frac{a - d - (\mu_R - \mu_N)}{\sigma_R^2 + \sigma_N^2} \right)}. \quad (5)$$

При этом неизвестное математическое ожидание уровня помех входит в аргумент функции интеграла вероятности, то есть находится в пределах интегрирования неопределенного интеграла. Поэтому для упрощения расчётных соотношений в функции связи выполняется замена переменной.

Для (1) новая переменная $z = \frac{\mu_R - \mu_N}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_N^2}}$.

В (2) новая переменная $z = \frac{\mu_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_N^2}}$.

В (3) новая переменная $z = \mu_R - \lambda\sigma_R^2$.

В (4) соответственно $z = \frac{\mu_R - ln\mu_N}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{lnN}^2}}$.

И в (5) $z = \frac{\mu_R - \mu_N}{\sigma_R^2 + \sigma_N^2}$.

Тогда для отыскания неизвестной переменной z нужно решить трансцендентные уравнения.

При распределении помех по нормальному закону

$$\Phi(z) = \frac{1}{2} - P_{mlf}. \quad (6)$$

При распределении помех по закону Рэлея

$$P_{mlf} = exp\left(-\frac{z^2}{2} \right) \frac{\sigma_N}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_N^2}} \left[\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{\sigma_N z}{\sigma_R} \right) \right]. \quad (7)$$

При распределении помех по экспоненциальному закону

$$P_{mlf} = exp\left(-\frac{1}{2}\lambda\left(2z - \lambda\sigma_R^2\right) \right) \cdot \left[\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{z}{\sigma_R} \right) \right]. \quad (8)$$

При распределении помех по логонормальному закону уравнение для z аналогично (6).

При распределении уровней помех и помехоустойчивости по нормальному усечённому закону уравнение для z

$$P_{mlf} = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{\mu_R - \mu_N}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_N^2}} \right). \quad (9)$$

Для решения уравнений целесообразно применить метод последовательных приближений. Разложение интеграла вероятности в ряд некорректно, поскольку аргумент интеграла вероятности в задачах ЭМС имеет порядок 10^2 [3]. Применение асимптотических приближений приводит к алгебраическим уравнениям высокого порядка для неизвестной величины [7]. Решить такие уравнения можно только численными методами. Таким образом, происходит неконтролируемое накопление погрешности, полученное решение оказывается непригодным для СЖАТ. Поэтому для решения приведённых трансцендентных уравнений используется метод последовательных приближений, который реализован в программе EMCPar, разработанной в лаборатории «Безопасность и ЭМС» НИИЖТ при Белорусском государственном университете транспорта.

Выведенные в статье соотношения позволяют по заданным вероятности сбоя системы и вероятностям безотказной работы схем контроля в составе этой системы вычислить требуемые уровни помехозащищённости электронной аппаратуры. После чего возможен выбор элементной базы схемных и конструктивных решений, обеспечивающих нужный уровень. При этом будут фигурировать показатели уровня безопасности как отдельных схем и блоков

в составе аппаратуры СЖАТ, так и всей системы, с учетом влияния безопасности отдельных схем и блоков на уровень безопасности системы в целом.

Полученные по предлагаемой методике нормы на величину помехозащищенности аппаратуры СЖАТ являются согласованными, а контроль соответствия им помогает поддерживать заданный уровень надежности функционирования микроэлектронных и микропроцессорных СЖАТ в ЭМО. Применение вероятностного метода нормирования позволяет оптимизировать конструкторские мероприятия и жесткость испытаний, направленных на обеспечение ЭМС и безопасности функционирования СЖАТ. Это дает оптимизацию затрат на такое обеспечение и экономический эффект от внедрения современных систем автоматики и телемеханики на железных дорогах России и СНГ.

Иллюстрацией этого вывода является следующий пример. Пусть $P_{mfch} = 10^{-6}$, $\mu_N = 1000$ В, $\sigma_N = 100$ В, $\sigma_R = 10$ В. Уровни помехозащищенности и помех распределены по нормальному закону. Тогда $\Phi(Z) = 0{,}5 - 10^{-6} = 0{,}499999$. По таблице функции Лапласа $Z = 4{,}76$. С учетом замены переменной значение $\mu_R = 1478{,}37$ В.

По существующим нормативам в данном случае была бы назначена жесткость испытания 1000 В или 2000 В. Первое значение является заниженным и приведет к неудовлетворительным результатам испытаний или эксплуатации устройства автоматики и телемеханики. Второе значение существенно завышено. Из примера следует, что завышение требований по параметрам ЭМС ведет к неоправданному росту стоимости аппаратуры за счет дополнительных конструктивных мер для обеспечения помехозащищенности. Занижение же этих требований недопустимо по соображениям условий безопасности.

Достоинством предлагаемого вероятностного подхода является и то, что в нем используются числовые характеристики помех в ЭМО на месте эксплуатации системы, полученные путем сбора статистической информации и последующей её обработки. В этом случае выработанные нормы помехоустойчивости максимально соответствуют условиям эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сапожников В. В. и др. Станционные системы автоматики и телемеханики.– М.: Транспорт, 2000.– 431 с.
2. Лисенков В. М. Безопасность технических средств в системах управления движением поездов.– М.: Транспорт, 1992.– 160 с.
3. Бочков К. А., Рязанцева Н. В. Вероятностный метод определения уровней ЭМС микроэлектронных систем обеспечения безопасности // Испытания систем железнодорожной автоматики и телемеханики на безопасность и электромагнитную совместимость: Материалы междунар. семинара.– Гомель: БелГУТ, 2001.– С. 20–29.
4. Чеканов А. Н. Расчёты и обеспечение надёжности электронной аппаратуры.– М.: КноРус, 2014.– 438 с.
5. Капур К., Ламберсон Л. Надёжность и проектирование систем.– М.: Мир, 1980.– 604 с.
6. Фомин А. Ф., Ваванов Ю. В. Помехоустойчивость систем железнодорожной радиосвязи.– М.: Транспорт, 1987.– 295 с.
7. Крот А. М. Статистическая теория формирования гравитирующих космогонических тел.– Минск: Беларуская навука, 2012.– 448 с. ●

Координаты авторов: **Бочков К. А.** – bochkov1999@mail.ru, priemnay@belsut.gomel.by, **Комнатный Д. В.** – toe4031@gstu.by.

Статья поступила в редакцию 23.12.2016, принята к публикации 21.01.2017.