

Сведения об авторах

- Сергей Владимирович Алейник** — ООО „ЦРТ-инновации“, Санкт-Петербург; научный сотрудник;
E-mail: aleinik@speechpro.com
- Михаил Борисович Столбов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра речевых информационных систем; ООО „ЦРТ-инновации“, Санкт-Петербург; старший научный сотрудник;
E-mail: stolbov@speechpro.com

Рекомендована кафедрой
речевых информационных систем

Поступила в редакцию
22.10.13 г.

УДК 656.25-52:656.22.05

С. В. БИБИКОВ, Ю. Н. МАТВЕЕВ, Н. Н. СЕМЕНОВ

**ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ОБНАРУЖЕНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА
ПРИБЛИЖАЮЩЕГОСЯ ПОЕЗДА**

Исследована функциональная безопасность обнаружения виброакустического сигнала приближающегося поезда методом энергетического обнаружителя. Найдено нижнее значение порога обнаружения исходя из предложенной вероятности ложной тревоги, доказана достаточность применения разработанного метода обнаружения приближающегося поезда для бесстыковых путей.

Ключевые слова: приближающийся поезд, виброакустический сигнал, энергетический обнаружитель.

Введение. Для того чтобы устройство, обнаруживающее по специфическим виброакустическим колебаниям рельса приближающийся поезд, могло применяться в ОАО „РЖД“ при подаче сигналов оповещения, оно должно удовлетворять достаточно жестким требованиям по надежности и функциональной безопасности. В качестве основного критерия функциональной безопасности используется среднее время наработки на опасный отказ: не менее 10^6 ч. Критериями опасного отказа являются отсутствие включения сигнала оповещения до начала установленного времени упреждения сигнализации (от включения сигнала оповещения до достижения первой осью приближающегося поезда места установки устройства оповещения) или неразборчивый сигнал. Установленное время упреждения сигнализации равно 50 с.

Среднее время наработки на опасный отказ определяется тремя показателями:

- 1) вероятность пропуска обнаруживаемого приближающегося поезда при наличии помех;
- 2) вероятность опасного необнаруживаемого или невозстанавливаемого отказа аппаратной реализации (10^{-11} — 10^{-12} 1/с [1]);
- 3) вероятность восстанавливаемого опасного отказа („сбоя“) с нерегламентированным временем восстановления с учетом обнаружения и восстановления работоспособности средствами операционной системы реального времени.

Поскольку надежность системы оповещения обеспечивается средствами дублирования аппаратуры, показатель 3 можно не оценивать отдельно от показателя 2.

В настоящей статье рассматривается только ситуация пропуска обнаруживаемого приближающегося поезда при наличии помех, так как она является решающей при доказательстве безопасности устройства оповещения. Вследствие случайного характера помех принципиально

невозможно добиться их полного устранения. Путем совершенствования приемных устройств можно снизить вероятность ошибки обнаружения полезного сигнала только до некоторого приемлемого уровня [2].

Классический энергетический обнаружитель. Постановка задачи. Воспользуемся классической постановкой задачи обнаружения сигнала по уровню его энергии U . Пусть на выходе одного частотного канала имеется некий сигнал — случайный процесс:

$$U(t) = V(t) + z(t),$$

он может представлять либо только помеху $z(t)$, либо сумму сигнала $V(t)$ и помехи. Будем считать, что наличие сигнала $V(t)$ тоже случайно.

Для решения вопроса о наличии сигнала в данный момент времени можно принять: сигнал присутствует, если $U(t) > E$, т.е. превышает некоторое пороговое значение, в противном случае сигнал отсутствует.

Ошибочный ответ может быть получен:

1) когда сигнал отсутствует, $V(t) = 0$, но уровень помехи превышает уровень E (событие А, „ложная тревога“);

2) когда сигнал присутствует, $V(t) \neq 0$, но сумма сигнала и помехи не превышает уровня $U(t)$ (событие В, „пропуск сигнала“).

Вероятность ложной тревоги, т.е. того, что будут совмещены отсутствие сигнала и превышение помехой уровня E при отсутствии сигнала, равна априорной вероятности q отсутствия сигнала, умноженной на апостериорную вероятность P превышения уровня E , при условии, что сигнал отсутствует. Зададим значение q , а значение P легко получить по одномерной функции распределения помехи $W(x)$:

$$P(U > E) = \int_E^{\infty} W(x) dx, \quad (1)$$

тогда

$$P_A = q \int_E^{\infty} W(x) dx.$$

Вероятность того, что будут совмещены присутствие сигнала и непревышение уровня E суммарным напряжением (вероятность события В), равна априорной вероятности присутствия сигнала, умноженной на апостериорную вероятность непревышения уровня E при условии, что сигнал присутствует.

Априорная вероятность присутствия сигнала равна:

$$p = 1 - q.$$

Апостериорную вероятность непревышения уровня E можно получить, используя одномерную функцию распределения суммы сигнала и помехи $W_1(x, V)$.

$$P(U \leq E) = \int_{-\infty}^E W_1(x, V) dx,$$

тогда

$$P_B = p \int_{-\infty}^E W_1(x, V) dx.$$

Так как события А и В несовместны, то вероятность получения ошибочного ответа P_A или P_B равна

$$P_{A_или_B} = P_A + P_B = \int_E^\infty W(x)dx + p \int_{-\infty}^E W_1(V, x)dx = 1 - \left[p \int_E^\infty W_1(V, x)dx + q \int_{-\infty}^E W(x)dx \right].$$

Искомая вероятность получения правильного ответа P_0 равна:

$$P_0(E, V) = 1 - P_{A_или_B} = p \int_E^\infty W_1(x, V)dx + q \int_{-\infty}^E W(x)dx. \tag{2}$$

Рассмотрим задачу нахождения оптимальной величины порога E , для которого вероятность получения правильного ответа (2) при заданных функциях распределения сигнала и помехи максимальна. Вычислив производную выражения (2) по E и приравняв ее нулю, получим уравнение для определения оптимального уровня:

$$\frac{dP(E)}{dE} = 0, \tag{3}$$

откуда $qW(E) = pW_1(E, V)$.

Статистический критерий, обеспечивающий максимальную вероятность получения правильного ответа при одном или нескольких измерениях, называется критерием „идеального наблюдателя“. Рассмотрим решение уравнения (3) на примере обнаружения положительной телеграфной посылки (положительного импульса с амплитудой V) на фоне помехи, подчиняющегося нормальному закону распределения, с дисперсией σ^2 . Наличие или отсутствие сигнала скажется только на среднем значении суммарного сигнала.

Соответственно плотности распределения вероятности будут иметь вид:

$$W(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{U^2}{2\sigma^2}\right),$$

$$W_1(U, V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(U - V)^2}{2\sigma^2}\right).$$

В случае, когда априорная вероятность появления сигнала неизвестна, часто полагают $p=1/2$, считая, что равновероятно как наличие, так и отсутствие сигнала. Заметим, что при этом $q=1/2$, тогда для описанных распределений $E= V/2$.

Если уровень E выбран, то для вероятностей ложной тревоги и пропуска сигнала, используя приведенные формулы, получим выражения:

$$P_A = q \left[1 - \Phi\left(\frac{E}{\sigma}\right) \right], \quad P_B = p \left[1 - \Phi\left(\frac{U - E}{\sigma}\right) \right], \tag{3}$$

где $\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$ — функция Крампа.

В радиолокационных системах во избежание ложного обнаружения цели используется критерий Неймана—Пирсона. Обычно задают значение вероятности ложной тревоги порядка 10^{-5} . Эта величина не регламентирована руководящими документами по железнодорожной безопасности, но используется в экспертной практике. При использовании критерия Неймана—Пирсона значение вероятности ложной тревоги фиксируется изначально. Так как эта вероятность функционально связана с относительным порогом, то последний также оказывается заданным.

Такой подход позволяет удовлетворить одновременно двум противоречивым требованиям:

- 1) чтобы вероятность пропуска сигнала не превосходила некоторой заданной величины,
- 2) чтобы вероятность ложной тревоги была минимальной.

Логика такого выбора представлена на рис. 1.

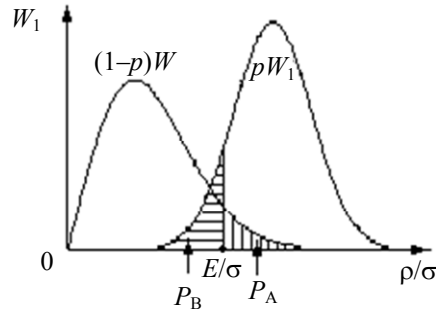


Рис. 1

На рис. 2, а приведена зависимость вероятности ложной тревоги от дисперсии шума случайного процесса σ при отсутствии сигнала поезда. Из рисунка видно, что для достижения $P_A=10^{-5}$ достаточно установить порог обнаружения 3σ .

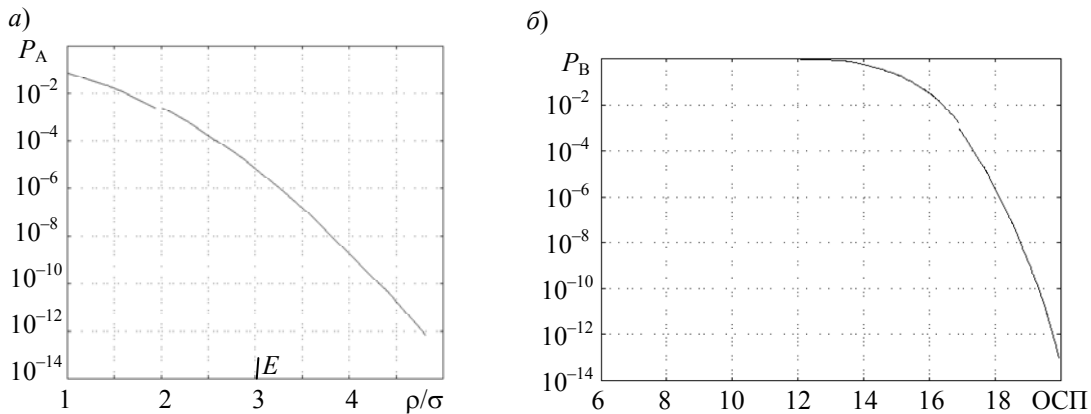


Рис. 2

Рассчитанная зависимость вероятности пропуска цели от отношения сигнал—помеха (ОСП) приведена на рис. 2, б. Видно, что при ОСП=19 дБ вероятность пропуска цели составляет $<10^{-8}$, это значение резко снижается при увеличении ОСП. При ОСП=20 дБ и более вероятность пропуска цели составляет существенно меньшие значения, чем необходимо для безопасного функционирования устройства.

Исследования экспериментальных данных. На рис. 3, а приведена спектрограмма исходного сигнала приближающегося со скоростью 60 км/ч поезда. Фонограмма на бесстыковом пути без неоднородностей с железобетонными шпалами получена устройством оповещения типа „Сигнализатор П“. Запись велась на участке пути с высоким уровнем шума окружающей среды. Проезд проехал место установки устройства 160-й секунде. Из рисунка видно, что до частоты 11 кГц наблюдаются тональные составляющие, являющиеся гармониками наведенных электромагнитных сигналов [3]. Основная часть энергии сигнала поезда расположена в полосе 12 000—19 400 Гц. Резкий рост спектральных компонент на 83-й секунде связан со ступенчатым возрастанием амплитуды входного сигнала на 4—5 дБ при проезде изолирующего стыка и уравнительных пролетов и въезде на блок — участок пути, на котором установлено устройство оповещения. На 140-й секунде происходит насыщение усилительных каскадов устройства, затем — насыщение внутреннего усилителя датчика, в результате чего происходит перераспределение энергии по всему спектру.

Чтобы убрать ненужные и мешающие обнаружению сигналы, проведем полосовую фильтрацию исходного сигнала в диапазоне 11 000—19 400 Гц (рис. 3, б).

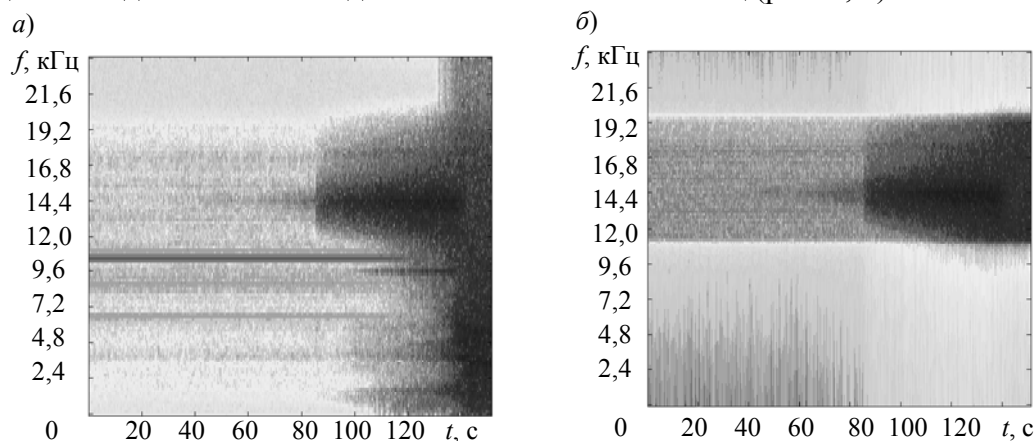


Рис. 3

Полученный полосовой сигнал в начале записи содержит равномерный по спектру шум, затем на фоне этого шума появляется сигнал движущегося поезда.

Рассмотрим процедуру оценки требуемого значения вероятности пропуска цели. Время наработки на опасный отказ, согласно требованиям безопасности, составляет $T_{oo} = 10^6 \text{ ч} = 3,6 \cdot 10^9 \text{ с}$.

Поскольку „Сигнализатор П“ является изделием периодического использования и не может принципиально включать сигнал о приближении поезда ежесекундно, оценим предельную периодичность включения сигнала оповещения: $T_{оп} = T_{ср} \cdot 2 + T_{обн} + T_{пр} = 50 \cdot 2 + 5 \cdot 2 + 1 = 111 \text{ с}$. Здесь $T_{ср}$ — время от срабатывания устройства до проезда поезда по месту установки, в это время оно подает сигналы оповещения и не может обнаруживать другой поезд; $T_{обн}$ — время работы алгоритма (время обнаружения и принятия решения), оно зафиксировано на уровне 5 с. Процесс выключения сигналов оповещения считаем симметричным процессу включения; $T_{пр}$ — время проезда (берется время проезда локомотива на предельной скорости $\approx 1 \text{ с}$).

Рассматривается случай непрерывного (один за одним) движения поездов. В реальности применение изделия и работа на путях перестают быть эффективными при интервале следования поездов менее 10 мин. Коэффициент снижения интенсивности отказов из-за периодичности и уменьшения времени наблюдения: $K_{oo} = T_{оп} T_{наб} = 111$, где $T_{наб} = 1 \text{ с}$ — время наблюдения.

Оценим вероятность опасного отказа с учетом периодичности работы изделия. Интенсивность отказов определяется как:

$$\lambda_{oo} = K_{oo} \cdot 1/T_{oo} = 111/3,6 \cdot 10^9 = 3,08 \cdot 10^{-8} \text{ 1/с.}$$

Учитывая малость $\lambda_{от}$, вычислим требуемое значение вероятности пропуска цели, которое ограничит помехоустойчивость метода в отношении пропуска сигнала приближения поезда.

$$P_{oo} = \lambda_{oo} T_{наб} = 3,08 \cdot 10^{-8} \text{ 1/с.}$$

Согласно рис. 3, момент принятия решения для получения данного значения вероятности ОСП=19 дБ.

На рис. 4 приведена зависимость ОСП сигнала приближения поезда, отфильтрованного полосовым фильтром, от времени (см. рис. 3, б).

Значение энергии помехи вычислялось в паузе перед приближением поезда. Включение оповещения по порогу 3σ происходит на 78-й секунде. Время сигнализации составило 82 с. Из рис. 4 видно, что даже при высокой зашумленности выбранного участка эксперимента и при фиксированной широкополосной фильтрации значение ОСП на 110-й секунде намного больше безопасного порогового значения 19 дБ, обеспечивающего требуемую вероятность пропуска цели и среднее время наработки на опасный отказ.

Среднеквадратичное отклонение времени сигнализации для различных типов поездов в различных погодных условиях (но без снега), при установке устройства оповещения на одном и том же месте на рельсе, составило 4,2 с при общем количестве поездов 34.

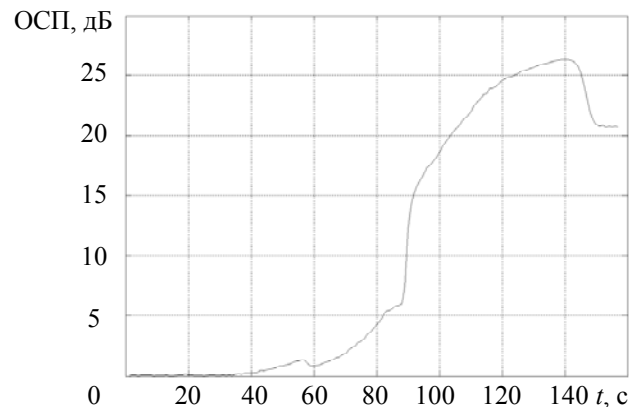


Рис. 4

Заключение. Для бесстыкового пути без неоднородностей и мешающих факторов использования классического энергетического обнаружителя достаточно как для обеспечения требуемого времени сигнализации при обнаружении виброакустического сигнала приближающегося поезда, так и для доказательства надежности алгоритма обнаружения приближающегося поезда по критерию вероятности пропуска цели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатырев В. А., Бибиков С. В. Оценка функциональной безопасности дублированных вычислительных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2(78). С. 146.
2. Бакут П. А., Большаков И. А., Герасимов Б. М. и др. Вопросы статистической теории радиолокации / Под общ. ред. Г. П. Тартаковского. М.: Сов. радио, 1964. Т. 1. 426 с.
3. Бибиков С. В., Шапарь А. В. Движущийся поезд как источник звуковых волн, распространяющихся по рельсовому пути // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 5(81). С. 152.

Сведения об авторах

Сергей Викторович Бибиков

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра речевых информационных систем; ООО „ЦРТ“, Санкт-Петербург; заместитель директора департамента;
E-mail: bibikov@speechpro.com,

Юрий Николаевич Матвеев

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра речевых информационных систем; ООО „ЦРТ-инновации“, Санкт-Петербург; главный научный сотрудник;
E-mail: matveev@mail.ifmo.ru

Николай Николаевич Семенов

— канд. техн. наук, доцент; ООО „ЦРТ“, Санкт-Петербург; руководитель группы; E-mail: semenov-n@speechpro.com

Рекомендована кафедрой
речевых информационных систем

Поступила в редакцию
22.10.13 г.