

УДК 004.942

**Ю.И. Буряк**, канд. техн. наук, начальник подразделения,  
**А.А. Скрынников**, канд. техн. наук, нач. сектора,  
Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва.

**“Алгоритмы расчета зоны покрытия антенны радиочастотного ридера при определении местоположения высокоскоростного объекта”<sup>1</sup>**

*Предложен подход к решению задачи определения местоположения высокоскоростного объекта на основе использования комплекса средств радиочастотной идентификации; причем ряд пассивных радиочастотных меток размещается по пути следования объекта, а радиочастотный ридер (считывающее устройство) устанавливается на самом объекте. Разработан алгоритм расчёта зоны покрытия антенны ридера, величина которой в заданном диапазоне скоростей движения объекта гарантирует требуемое значение вероятности формирования ответного импульса от радиочастотной метки. Проведена оценка вероятности формирования ответного импульса с использованием математического аппарата статистического анализа. Приведены результаты расчетов зоны покрытия антенны в диапазоне допустимых скоростей движения объекта, а также сформированы рекомендации по выбору оптимального варианта, доказывающие применимость предложенного подхода.*

**Ключевые слова:** радиочастотная идентификация, высокоскоростные транспортные средства, точность определения местоположения.

### **Введение**

Прослеживание технического состояния сложной технической продукции в процессах жизненного цикла сегодня является одной из самых актуальных задач повышения ее качественных характеристик (например, выявление контрафактной, фальсифицированной продукции, неаутентичных компонентов и пр.) и безопасности использования (например, движения). Наиболее эффективный метод получения элементов такого состояния, основанный на применении современных средств идентификации материальных объектов и их характеристик, в частности, радиочастотной идентификации (ридеры, радиочастотные

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-08-04342а

метки - РЧМ), находит широкое применение в самых различных областях: в производственных процессах, логистике и на транспорте [1-5].

В основу метода положена стандартная организационно-технологическая схема применения средств радиочастотной идентификации, предполагающая установку радиочастотных ридеров на штатных позициях производственной линии, а РЧМ непосредственно на объектах. Таким образом, при перемещении маркированного объекта по траектории сложно-разветвленного процесса производится как определение его технических характеристик, так и его местоположение.

Известная система автоматической идентификации состояния подвижного состава САИ «Пальма» [6] включает кодовый бортовой датчик и считывающую аппаратуру. Датчик хранит полную информацию о вагоне или локомотиве в закодированном виде: идентификационный номер, направление следования, дату последнего деповского ремонта, пробег, число единиц в составе. Объем памяти датчика – 128 бит. Аппаратура в масштабе реального времени регистрирует в АСУ железнодорожным транспортом факты прохождения оборудованного специальными метками подвижного состава через пикеты, установленные вдоль железнодорожных путей и оборудованные специальной аппаратурой считывания. Эффективность работы новой системы достигается за счет того, что человеческий фактор почти не задействован - информация передается автоматически из разных пунктов нахождения поезда. В рамках пилотного проекта финское транспортное агентство Liikennevirasto и компания Vilant [7] установили четыре ридера Vilant Railroad Reader в нескольких местах вдоль железнодорожных путей в районе городов Оулу и Мантсала. Ридеры были смонтированы на мачтах, размещенных на расстоянии приблизительно 2,5 метра (8,2 фута) от железнодорожного пути, чтобы они могли считывать уникальные идентификационные номера, закодированные в каждой РЧМ Ironside, прикрепленной к стенкам кузова проходящих вагонов. С помощью разработанного Vilant программного обеспечения Train Analyzer, хранящегося на резидентном сервере компании, каждый уникальный идентификационный номер увязывается с серийным номером вагона, а также с информацией об операторе, которому принадлежит вагон, и другими подробными данными. Посредством соотнесения идентификационного номера с временами считывания РЧМ предыдущим и текущим ридерами программный комплекс Vilant Train Analyzer рассчитывает скорость движения поездов. Таким образом, агентство может решать любые проблемы путем контакта с оператором.

Присущие данной схеме недостатки, прежде всего, необходимость обеспечения электропитания, средств передачи данных на перемещаемый объект, защиты от случайных/намеренных повреждений и восстановление работоспособности в случае его нарушения существенно ограничивают применимость такой схемы при построении больших территориально-распределенных транспортных, в частности, железнодорожных систем.

В этой связи рядом исследователей [8-10] предлагается модифицированная схема, включающая установку как минимум двух пассивных РЧМ на пути следования железнодорожного транспортного средства, а ридера, соответ-

ственно, на самом транспортном средстве. При считывании РЧМ ридером производится определение местоположения средства с последующей выработкой необходимых управленческих команд (например, торможение). В ряде случаев, для повышения точности управления и безопасности движения радиочастотный ридер объединяется с дополнительными датчиками, например, измерения скорости перемещения, приема навигационных сигналов со спутников и пр.

В условиях наблюдаемых тенденций [11] по проработке концептов поездов, движущихся на скоростных и высокоскоростных магистралях и в замкнутом пространстве (туннелях), традиционное использование спутниковых радионавигационных технологий [12] становится проблематичным.

В этой связи решение задачи использования технологий радиочастотной идентификации для определения местоположения высокоскоростного поезда является актуальной.

### **Особенности применения технологии радиочастотной идентификации для определения местоположения высокоскоростного поезда.**

Технология радиочастотной идентификации предполагает следующую схему взаимодействия ридера и РЧМ: антенна ридера излучает в окружающее пространство электромагнитный сигнал определенной мощности на установленной частоте в течение некоторого диапазона времени. РЧМ воспринимает энергию излучения, проводит необходимые преобразования и выдает ответный сигнал, который принимается антенной ридера. По результатам его обработки ридер идентифицирует РЧМ и сохраняет в своей памяти записанную в ней информацию. Если ридер перемещается относительно РЧМ, может возникнуть ситуация, при которой отсутствует возможность идентификации РЧМ, а именно: время нахождения РЧМ в поле действия ридера не позволяет собрать достаточное количество энергии его излучения для формирования ответного сигнала и РЧМ формирует ответный сигнал уже после выхода из поля действия ридера.

В силу того, что время попадания РЧМ в поле действия антенны ридера носит случайный характер, а время ее нахождения переменное, то зона покрытия ридера должна иметь размер, гарантирующий формирование ответного импульса от РЧМ во всем диапазоне скоростей движения объекта и с заданным значением вероятности.

Таким образом, формулируется задача определения размера зоны покрытия ридера, гарантирующего формирование ответного импульса от РЧМ с заданным значением вероятности во всем диапазоне скоростей движения объекта.

Для решения данной задачи необходимо реализовать следующую последовательность действий:

- сформировать различные варианты нахождения РЧМ в поле действия антенны ридера;
- рассчитать вероятность формирования отклика РЧМ в интервале скоростей движения объекта.

## Алгоритм расчёта зоны покрытия антенны радиочастотного ридера, гарантирующей формирование ответного импульса от РЧМ с заданным значением вероятности

Рассмотрим объект, движущийся со скоростью  $v$ . На объекте установлена антенна, образующая на поверхности земли зону покрытия длиной  $D$ . По пути следования установлена РЧМ (см. рис. 1).

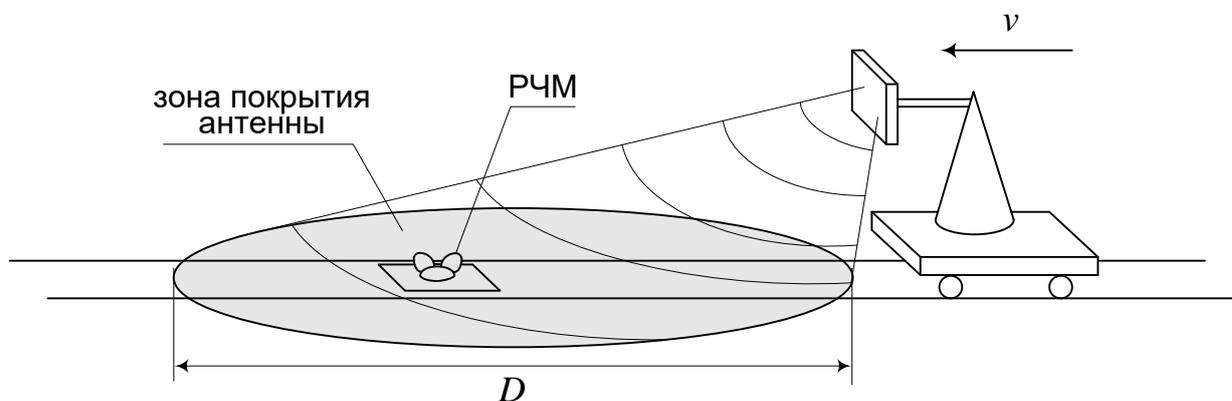


Рис. 1.

Для обнаружения метки антенна периодически в течение  $t_r$  излучает пачку из  $n$  импульсов, а затем в течение  $t_p$  ( $t_p < t_r$ ) ожидает отклик РЧМ, после чего цикл длительностью  $t_c$  повторяется (см. рис. 2).

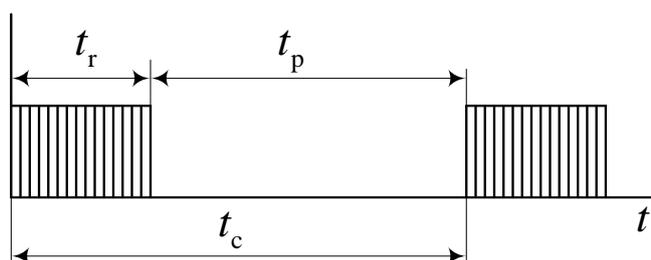


Рис. 2.

РЧМ при попадании в зону покрытия антенны принимает зондирующие импульсы. Число принятых импульсов зависит от времени нахождения РЧМ в зоне покрытия, которое определяется скоростью  $v$  и длиной  $D$  зоны покрытия. При этом в силу влияния сложного переотражения радиоволн, изменения ориентации РЧМ при движении объекта каждый из импульсов пачки принимается РЧ меткой с некоторой вероятностью. После приёма зондирующих импульсов РЧМ формирует ответный импульс.

Время  $\tau$ , в течение которого объект проходит путь, равный длине зоны покрытия, находится из соотношения

$$\tau = D / v. \quad (1)$$

Совместим начало временного интервала  $\tau$  с моментом  $T_0$  попадания РЧМ в зону покрытия антенны. Т.к. зондирование проводится с постоянной

длительностью цикла  $t_c$  независимо от движения объекта, то момент времени  $T_0$  будет величиной случайной, распределённой равномерно в интервале от 0 до  $t_c$  (см. рис. 3). Функция распределения случайной величины  $T_0$  имеет вид:

$$F_0(t_0) = \begin{cases} 0 & \text{при } t_0 < 0; \\ t_0 / t_c & \text{при } t_0 \in (0, t_c); \\ 1 & \text{при } t_0 > t_c. \end{cases}$$

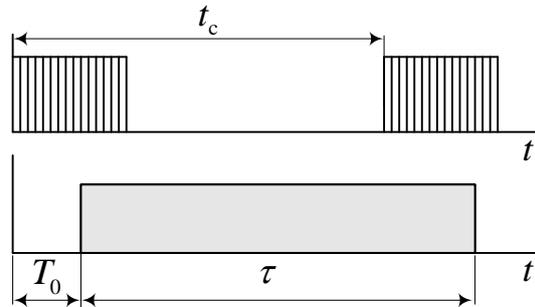


Рис. 3.

Чувствительность РЧМ определяется экспериментально. Так как длина  $t_c$  перекрытия временных интервалов  $t_r$  и  $\tau$  будет случайной величиной, изменяющейся в пределах от 0 до  $t_r$ , то чувствительность представляется зависимостью вероятности появления отклика от длины перекрытия  $t_c$ .

Отклик – бинарная случайная величина  $Y$ , принимающая значения 0 и 1:

$$Y = \begin{cases} 0 & \text{при отсутствии отклика от РЧМ;} \\ 1 & \text{при наличии отклика от РЧМ.} \end{cases}$$

Характеристика чувствительности представляется функцией  $P(Y=1) = F(\beta^T t_c)$ , где  $\beta = (\beta_1, \beta_2)$  – вектор параметров. Наиболее часто используют функцию стандартного нормального распределения, в этом случае модель принято называть пробит. моделью, и функцию логистического распределения, тогда модель принято называть логит. моделью [13].

В случае, когда скорость движения объекта относительно небольшая, интервал  $\tau$  может накрыть (полностью или частично) несколько периодов зондирования, тогда вероятность получения отклика от РЧМ будет определяться как вероятность получения отклика от хотя бы одной пачки зондирующих импульсов, а вероятность получения отклика от конкретной пачки определяется по зависимости  $P(Y=1)$ . Например, если интервал  $\tau$  накрывает две пачки зондирующих импульсов с интервалами перекрытия  $T_c^{(1)}$  и  $T_c^{(2)}$  соответственно (см. рис. 4), то вероятность получения отклика от первой пачки равна  $p_1 = P(T_c^{(1)})$ , а от второй пачки  $p_2 = P(T_c^{(2)})$ . Тогда вероятность получения хотя бы одного отклика будет равна  $p_s = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2)$ .

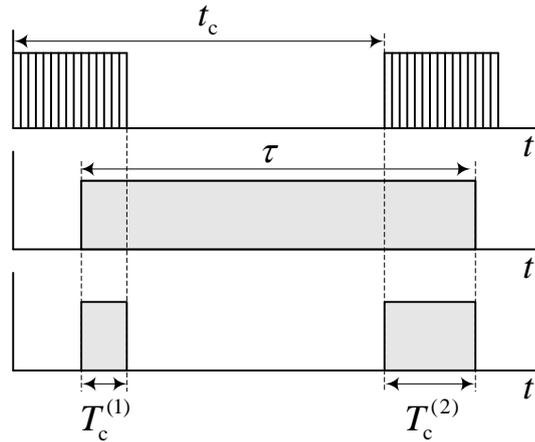


Рис. 4.

При увеличении скорости  $v$  уменьшается длительность интервала  $\tau$ . При  $\tau \leq t_p$  перекрытой может быть не более одной пачки зондирующих импульсов. Поэтому с увеличением скорости снижается вероятность формирования РЧМ ответного импульса.

В этой связи возникает задача обоснования требуемой длины покрытия  $D$ , при которой в заданном диапазоне скоростей движения  $v < v_{\max}$  вероятность формирования РЧМ ответного импульса не была бы меньше заданной величины.

Рассмотрим решение этой задачи при достаточно высокой скорости движения, определяемой из условия  $\tau \leq t_c + t_r$ . В этом случае возможно получение отклика не более чем от двух пачек зондирующих импульсов.

Найдём закон распределения случайных величин  $T_c^{(1)}$  и  $T_c^{(2)}$  – длины перекрытия первой и второй пачки импульсов соответственно.

Случайная величина  $T_c^{(1)}$  принимает значения

$$T_c^{(1)} = \begin{cases} t_r - T_0 & \text{при } T_0 < t_r; \\ 0 & \text{при } T_0 > t_{\text{rad}}. \end{cases}$$

Таким образом, случайная величина  $T_c^{(1)}$  – смешанная. При  $T_c^{(1)}=0$  функция распределения  $F(t_c^{(1)})$  имеет разрыв на величину  $P(T_c^{(1)}=0)$ , а на участке  $(0, t_r)$  функция распределения  $F(t_c^{(1)})$  непрерывна.

Вероятность того, ширина первого интервала перекрытия равна нулю определяется выражением:

$$P(T_c^{(1)} = 0) = P(T_0 > t_r) = \frac{t_p}{t_c}.$$

Случайные величины  $T_c^{(1)}$  и  $T_c^{(2)}$  – функционально связанные, т.к.

$$T_c^{(2)} = \begin{cases} 0 & \text{при } T_0 + \tau < t_c; \\ T_0 + \tau - t_c & \text{при } t_c < T_0 + \tau < t_c + t_r; \\ t_r & \text{при } T_0 + \tau > t_c + t_r. \end{cases} \quad (2)$$

Случайная величина  $T_c^{(2)}$  также смешанная. Вероятности  $P(T_c^{(2)} = 0)$  и  $P(T_c^{(2)} = t_r)$  равны:

$$P(T_c^{(2)} = 0) = 1 - \frac{\tau}{t_c} \quad \text{при } \tau < t_c;$$

$$P(T_c^{(2)} = t_r) = \frac{\tau - t_r}{t_c} \quad \text{при } \tau < t_r.$$

### Расчет вероятности получения отклика РЧМ с заданным уровнем надежности в интервале движения поезда

Рассмотрим в качестве примера решение задачи при следующих условиях:  $t_r = 30$  мс,  $t_p = 100$  мс; зависимость  $P(t_c)$  вероятности получения отклика РЧИ от длины перекрытия пачки импульсов имеет вид логистической функции

$$P(t_c) = \frac{1}{1 + e^{-(t_c - a)/k}},$$

где  $a = 23,0$  мс,  $k = 1,81$  мс. Зависимость  $P(t_c)$  приведена на рис. 5.

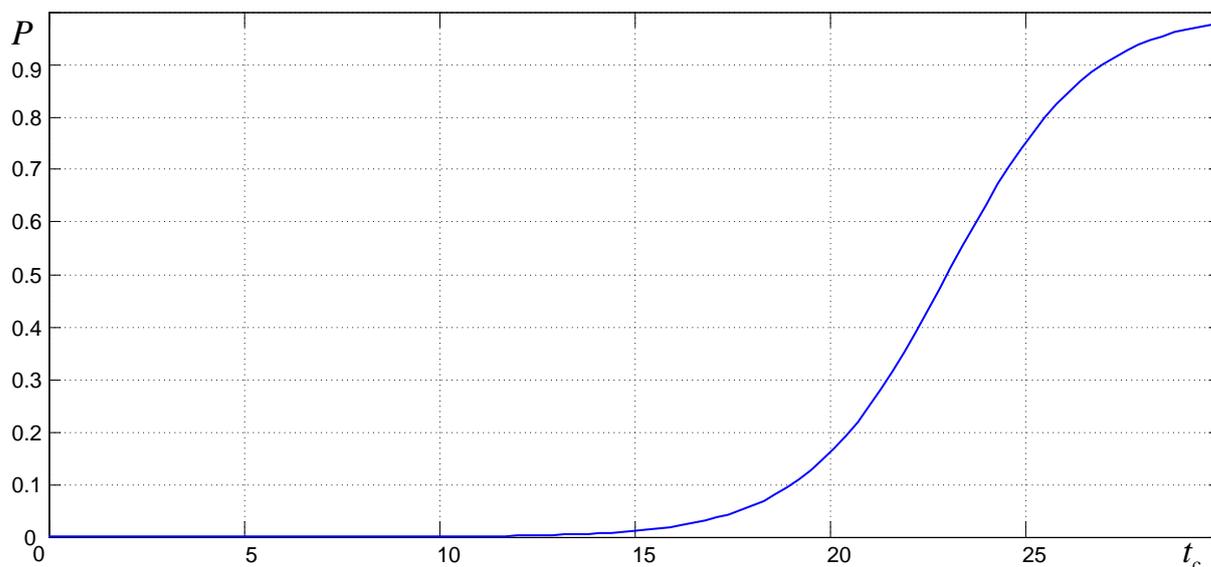


Рис. 5.

Пусть длина зоны покрытия  $D = 10$  м. Зададимся требуемым уровнем надёжности, например, при скорости движения до 125 м/с с вероятностью не ниже 0,95 частота появления хотя бы одного отклика должна быть не менее 0,9. При любом  $\tau > t_r$  функция распределения  $F(t_c^{(1)})$  будет иметь вид (см. рисунок 6):

$$F(t_c^{(1)}) = \begin{cases} 0 & \text{при } t_c^{(1)} < 0; \\ 0.7 & \text{при } t_c^{(1)} = 0; \\ 0.7 + t_c^{(1)} / 30 & \text{при } 0 < t_c^{(1)} \leq 30; \\ 1 & \text{при } t_c^{(1)} > 30. \end{cases}$$

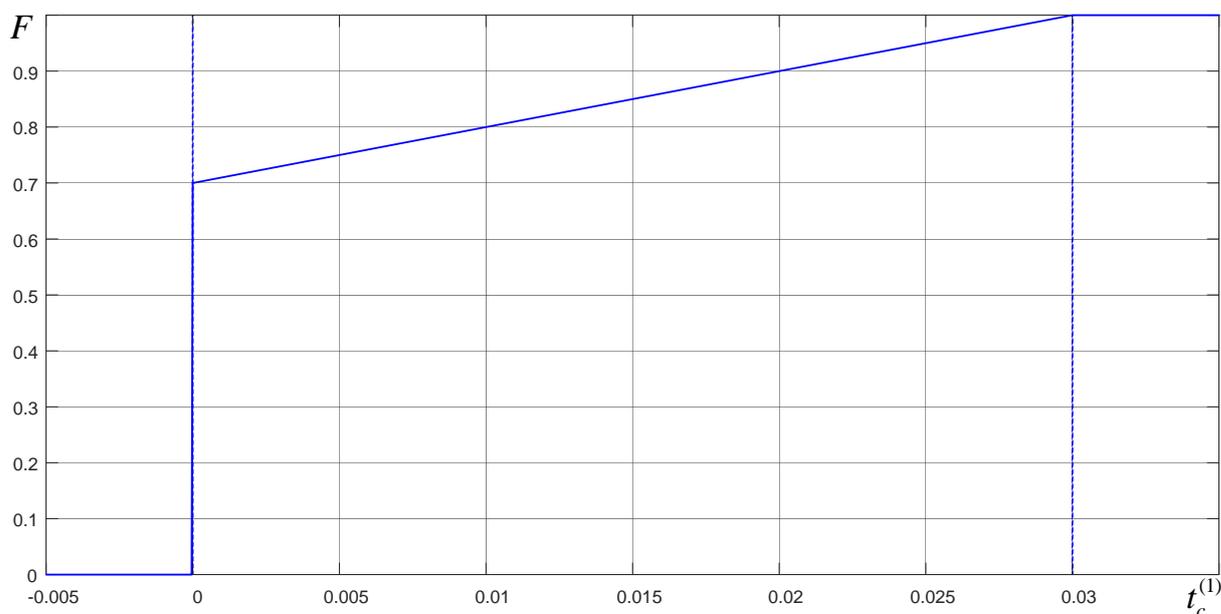


Рис. 6.

Функция распределения  $F(t_c^{(2)})$  зависит от  $\tau$  (т.к.  $T_c^{(2)}$  в соответствии с (2) зависит от  $\tau$ ), а время  $\tau$  в свою очередь определяется скоростью  $v$  (см. (1)). Рис. 7 иллюстрирует зависимость поведения функции распределения  $F(t_c^{(2)})$  при различных значениях скорости  $v$ .

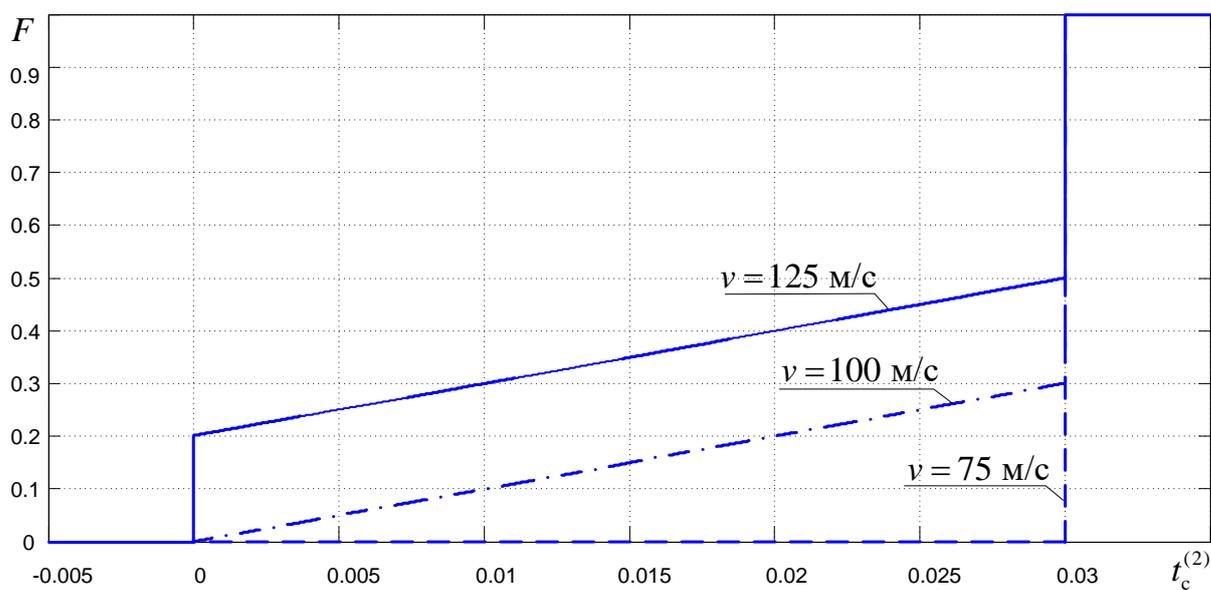


Рис. 7.

Зная  $F(t_{cov}^{(1)})$  и  $F(t_{cov}^{(2)})$  можно найти законы распределения частоты получения отклика на соответствующую пачку импульсов и, следовательно, закон распределения частоты получения хотя бы одного отклика.

Так, при  $\tau = t_c + t_r = 130$  мс возможно перекрытие не более двух пачек зондирующих импульсов. Это соответствует скорости 76,92 м/с (276,92 км/ч.). В этом случае закон распределения частоты  $F(p_s)$  будет иметь вид, представленный на рисунке 8. Как видно из рисунка 8, с надёжностью 0,95 (см. квантиль уровня 0,05) частота получения хотя бы одного отклика будет равна 0,9795.

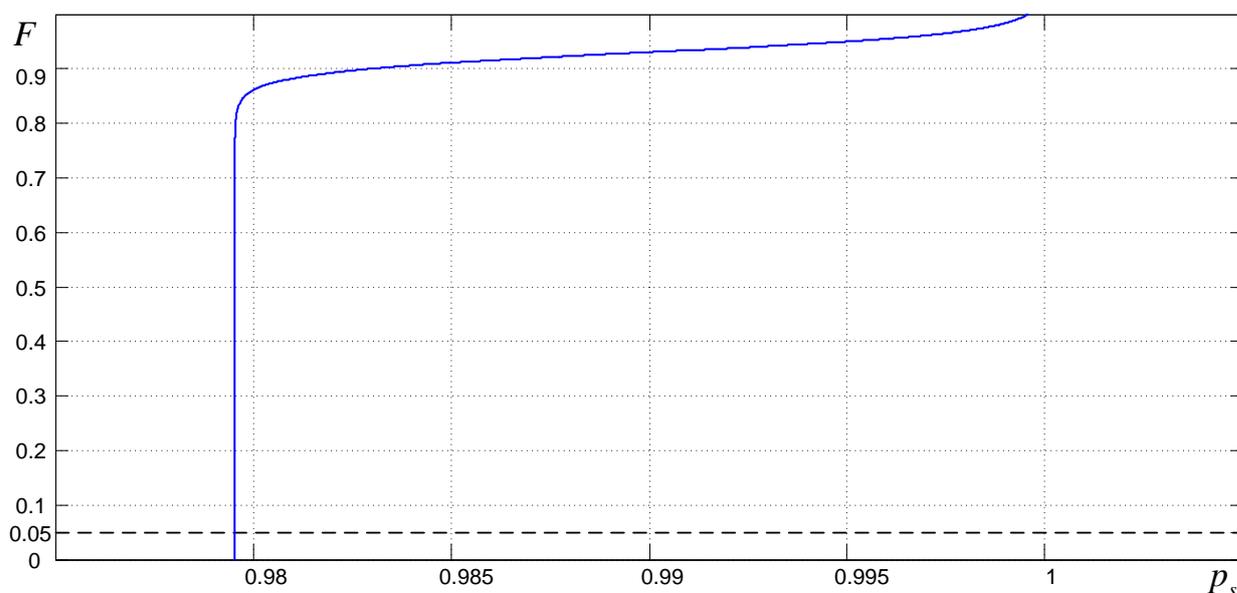


Рис. 8.

При увеличении скорости объекта  $v$  до 85 м/с значение частоты получения хотя бы одного отклика с надёжностью 0,95 снижается до 0,9012 (см. рис. 9). Таким образом, длина зоны покрытия  $D=10$  м не обеспечивает требуемую надёжность при скоростях более 85 м/с.

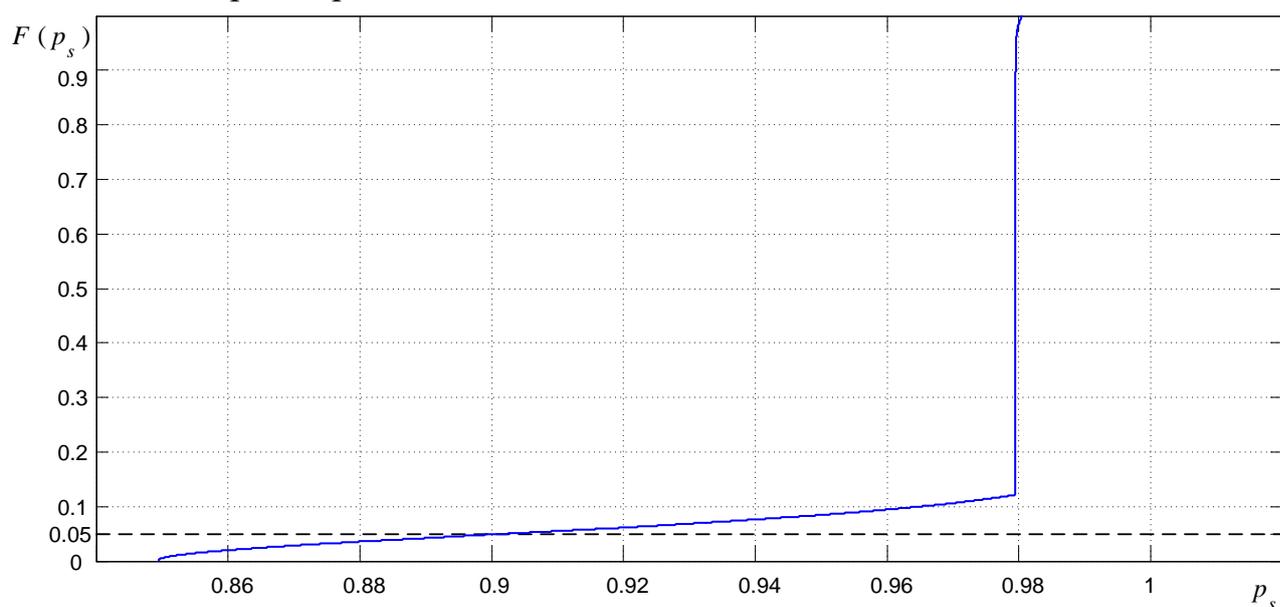


Рис. 9.

Аналогичным образом можно построить зависимость квантили уровня 0,05 частоты получения хотя бы одного отклика при различных значениях скорости  $v$  и длине зоны покрытия  $D$ .

Для максимальной заданной скорости  $v=125$  м/с эта зависимость будет иметь вид, представленный на рисунке 10. Как видно из рисунка 10, длина зоны покрытия  $D$  при заданных значениях  $t_r$ ,  $t_c$  должна быть не меньше 14,7 м.

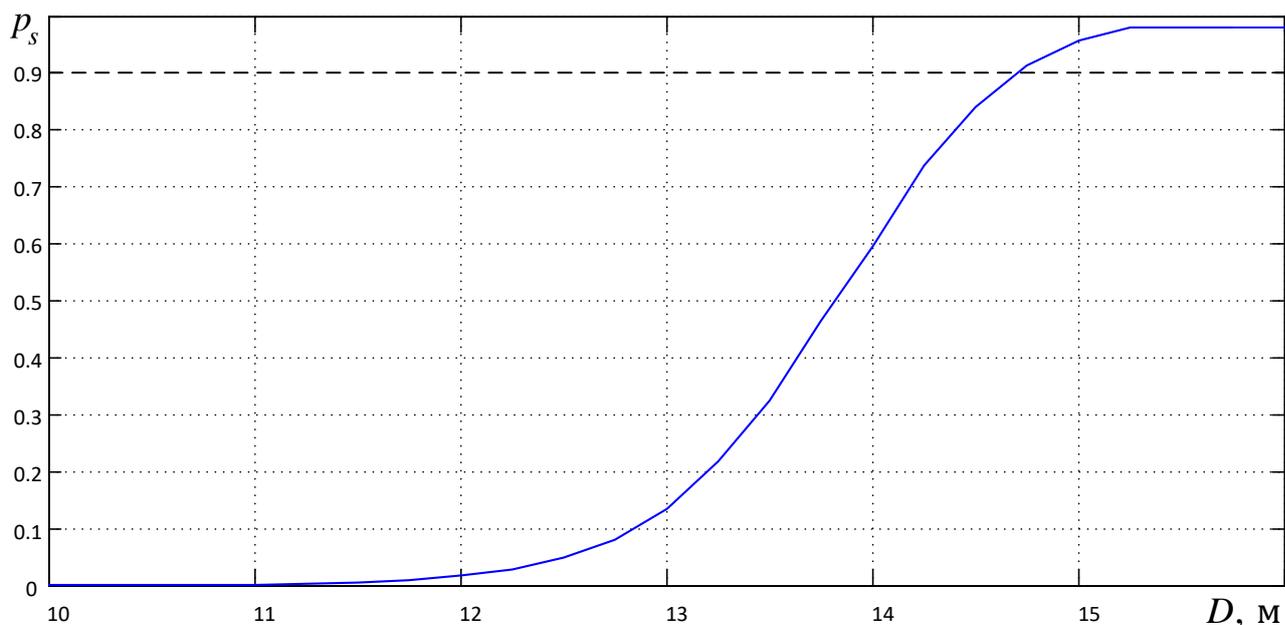


Рис. 10.

Очевидно, что с изменением значения максимальной скорости движения изменится и требуемое значение длины  $D$  зоны покрытия. На рисунке 11 представлены результаты расчётов при варьировании значения максимальной скорости от 80 до 150 м/с.

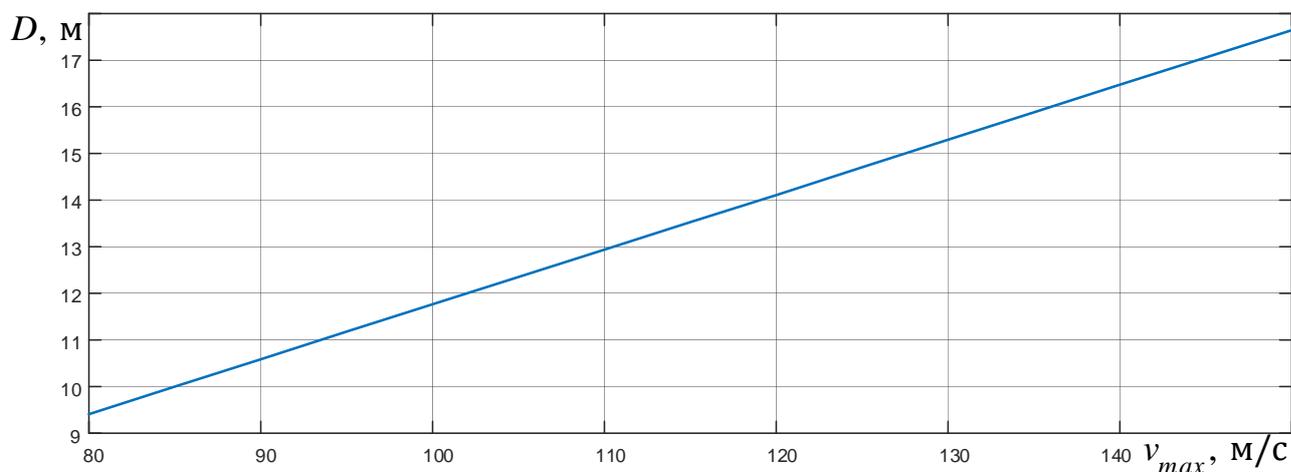


Рис. 11.

Таким образом, разработанные алгоритмы позволяют рассчитать требуемое значение длины  $D$  зоны покрытия антенны ридера при задании максимальной скорости движения объекта и уровня надёжности получения отклика антенны.

### Заключение.

Предложен подход к решению одной из задач повышения эффективности управления движением высокоскоростного транспорта, перемещающегося в туннеле, посредством комплексного использования средств радиочастотной идентификации для определения его местоположения. Разработан алгоритм расчёта зоны покрытия антенны ридера, величина которой в установленном

диапазоне скоростей движения объекта гарантирует получение ответного отклика от каждой радиочастотной метки, расположенной на пути его следования. Проведена оценка вероятности формирования ответного отклика от радиочастотной метки с использованием математического аппарата статистического анализа. Приведены результаты расчетов зоны покрытия антенны в диапазоне допустимых скоростей движения объекта и уровня надежности получения ответного отклика, а также сформированы рекомендации по выбору заданного варианта, доказывающие применимость предложенного подхода.

### **Список литературы**

1. **Буряк Ю.И.** Обеспечение безопасности поставок и эксплуатации промышленной продукции за счет организации непрерывного мониторинга их технических характеристик /Автоматизация в промышленности, № 12, 2009, стр. 7-11

2. **Легкий Н.М.** Активная радиочастотная идентификация в системах позиционирования подвижных объектов // Наука и техника транспорта, 2010, № 2, с.41-45

3. **Легкий Н.М.** Управление перевозочным процессом на основе информации о местоположении транспортного средства // Наука и техника транспорта, 2009, № 3, с.38-40

4. **Буряк Ю.И., Амирханян В.Г., Калинин В.Л.** Разработка программно-технологической платформы для обеспечения контроля за состоянием сложных объектов при построении территориально-распределенных автоматизированных информационных систем производственного назначения //Вестник компьютерных и информационных технологий, 2012г, № 8 , стр. 23 - 28

5. **Буряк Ю.И., Скрынников А.А.** Разработка модели классификатора движущихся в составе группы объектов на базе использования средств радиочастотной идентификации// Мехатроника, автоматизация, управление.-2014.-№3.-С.42-48

6. **Федоров В.Г.** Система радиочастотной идентификации САИД «Пальма» на железнодорожном транспорте// Автоматизация в промышленности. – 2006. - №3, С.53 – 54

7. Финское транспортное агентство использует RFID для отслеживания состояния транспортных вагонов . <http://www.idexpert.ru/reviews/4318/>дата обращения 06.06.2017

8. Способ и система прицельной остановки железнодорожных транспортных средств: пат. 2397094 Рос. Федерация: МПК<sup>51</sup> В62L 25/00 / Н.М. Легкий – №2009109737/11; заявл. 18.03.2009; опубл. 20.08.2010 Бюл.№23.

9. Система для определения местонахождения поездов с проверкой в режиме реального времени достоверности оценки положения: пат. 2584957 Рос. Федерация: МПК<sup>51</sup> В62L 25/02 / А. Сайтто, П. Беллофьоре, А. Болле – №2013105692/11; заявл. 12.07.2011; опубл. 20.05.2016 Бюл.№14.

10. Способ и система радиочастотной идентификации железнодорожного транспорта: пат. 2499714 Рос. Федерация: МПК<sup>51</sup> В62L 25/02 / М.Д. Рабинович и др. – №2012107106/11; заявл. 27.02.2012; опубл. 27.11.2013 Бюл.№33.

11. Материалы сайта <https://hyperloop-one.com/#our-story/> дата обращения 06.06.2017

12. **Легкий Н.М., Линьков В.И., Охинченко А.П.** Использование спутниковых радионавигационных технологий для повышения безопасности движения поездов на скоростных и высокоскоростных магистралях // Научные технологии, №8, 2010, с.20-24

13. **Буре В.М., Парилкина Е.М.** Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 416 с.