



УДК 654.924

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ НАРУШИТЕЛЯ ПАССИВНЫМИ ИНФРАКРАСНЫМИ ИЗВЕЩАТЕЛЯМИ

В.В. Волхонский<sup>a</sup>, С.Л. Малышкин<sup>a</sup><sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: volkhonski@mail.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 13.02.15, принята к печати 21.05.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-4-716-721

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Волхонский В.В., Малышкин С.Л. Оценка вероятности обнаружения нарушителя пассивными инфракрасными извещателями // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 4. С. 716–721.

### Аннотация

**Предмет исследования.** Оценка вероятности обнаружения нарушителя извещателями охранной сигнализации при различных скоростях и направлениях движения для использования в задачах автоматизированного анализа эффективности систем физической защиты. **Метод.** Используются аналитические выражения законов распределения расстояния обнаружения, полученных путем аппроксимации экспериментальных гистограмм. **Основные результаты.** Исследована применимость различных законов распределения, таких как распределения Рэлея, Гаусса, Максвелла, Вейбулла, а также логнормальное и гамма-распределения, для оценки расстояния обнаружения нарушителя пассивными инфракрасными извещателями. Для этого проведена проверка гипотез о соответствии экспериментальных гистограмм указанным аналитическим законам по критерию согласия  $\chi^2$  для различных скоростей и направлений движения нарушителя. Первые моменты аппроксимирующих законов распределения выбирались равными экспериментально полученным значениям соответствующих параметров движения. Оценки точности аппроксимации выполнены с уровнем значимости 0,05. Показано, что наиболее полно критерию согласия  $\chi^2$  для разных скоростей и направлений движения нарушителя соответствует аппроксимация гистограмм распределением Рэлея и гамма-распределением. Получены зависимости точности аппроксимации от условий проникновения, позволяющие выбрать аппроксимирующую функцию для конкретной практической задачи. **Практическая значимость.** Аналитические выражения для вероятности обнаружения могут использоваться в задачах моделирования процесса проникновения нарушителя на защищаемый объект, в том числе для оценки эффективности систем физической защиты.

### Ключевые слова

вероятность обнаружения, пассивный инфракрасный извещатель, нарушитель, система физической защиты.

## ESTIMATION OF INTRUSION DETECTION PROBABILITY BY PASSIVE INFRARED DETECTORS

V.V. Volkhonskiy<sup>a</sup>, S.L. Malyshekin<sup>a</sup><sup>a</sup>ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: volkhonski@mail.ru

### Article info

Received 13.02.15, accepted 21.05.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-4-716-721

Article in Russian

**For citation:** Volkhonskiy V.V., Malyshekin S.L. Estimation of intrusion detection probability by passive infrared detectors. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 4, pp. 716–721.

### Abstract

**Subject of Research.** The paper deals with estimation of detection probability of intruder by passive infrared detector in different conditions of velocity and direction for automated analyses of physical protection systems effectiveness. **Method.** Analytic formulas for detection distance distribution laws obtained by means of experimental histogram approximation are used. **Main Results.** Applicability of different distribution laws has been studied, such as Rayleigh, Gauss, Gamma, Maxwell and Weibull distribution. Based on walk tests results, approximation of experimental histograms of detection distance probability distribution laws by passive infrared detectors was done. Conformity of the histograms to the mentioned analytical laws according to fitting criterion  $\chi^2$  has been checked for different conditions of velocity and direction of intruder movement. Mean and variance of approximate distribution laws were equal to the same parameters of experimental histograms for corresponding intruder movement parameters. Approximation accuracy evaluation for above mentioned laws was done with significance level of 0.05. According to fitting criterion  $\chi^2$ , the Rayleigh and Gamma laws are corresponded mostly close to the histograms for different velocity and direction of intruder movement. Dependences of approximation

accuracy for different conditions of intrusion have been got. They are usable for choosing an approximation law in the certain condition. **Practical Relevance.** Analytic formulas for detection probability are usable for modeling of intrusion process and objective effectiveness estimation of physical protection systems by both developers and users.

#### Keywords

detection probability, passive infrared detector, intruder, physical protection system.

### Введение

Создание систем физической защиты (СФЗ) объектов информатизации предполагает анализ эффективности и уязвимости СФЗ как важный этап разработки любой системы. В свою очередь, сложность современных СФЗ, а также многообразие моделей нарушителей и способов проникновения влечет необходимость применения средств автоматизации процессов моделирования таких систем.

Различные методы анализа эффективности СФЗ, такие как детерминистический, метод анализа иерархий и другие [1, 2] базируются на данных экспертных оценок основных параметров и, следовательно, обладают высокой степенью субъективности. Они требуют трудоемких экспериментальных исследований. Кроме того, их сложно использовать в задачах математического моделирования. Более корректные оценки эффективности дает метод вероятностно-временного анализа [2]. При его использовании актуальна задача получения корректных оценок вероятностей обнаружения (ВО), поскольку только своевременное обнаружение нарушителя может обеспечить результативную эффективность СФЗ – ликвидацию угрозы до нанесения существенного ущерба. Таким образом, знание значений ВО в различных условиях проникновения является необходимым для получения корректных оценок эффективности СФЗ.

Другой важный параметр СФЗ, который необходимо учитывать как при разработке СФЗ, так и при оценке ее эффективности – вероятность ложной тревоги (ВЛТ). Как известно [3], основными методами достижения требуемого уровня ВЛТ являются правильный выбор устройств по физическому принципу действия с учетом реальной помеховой обстановки на объекте, а также выбор места их установки, минимизирующий влияние помех [4]. Наиболее эффективным решением является использование комбинированных извещателей, имеющих два канала обнаружения. Однако это приводит к усложнению и удорожанию извещателей. Анализ ВЛТ даже для конкретного типа извещателя требует учета большого количества разнородных факторов, вызывающих ложные срабатывания, и существенно отличается по используемым методам от решения задачи оценки ВО. По этой причине этот вопрос в данной работе не рассматривается.

В любом случае для использования вероятностного метода оценки эффективности СФЗ как для одноканальных, так и для комбинированных извещателей необходима корректная оценка вероятности обнаружения при разных параметрах движения нарушителя.

Несмотря на разнообразие физических принципов существующих типов извещателей, наиболее массовыми устройствами обнаружения являются пассивные инфракрасные (ПИК) извещатели [3–7], обладающие лучшим соотношением цены и возможностей по обнаружению. Кроме того, практически все комбинированные извещатели в настоящее время имеют ПИК-канал обнаружения. Исходя из этого, в настоящей работе мы ограничимся рассмотрением ПИК-устройств, хотя и подход, и (частично) полученные результаты справедливы и для других типов извещателей, например, радиоволновых.

В ряде работ, например, [8–10], приведены результаты экспериментальных исследований ВО ПИК-устройств, в частности, влияние скорости  $v$  и направления движения нарушителя, которое можно характеризовать углом  $\varphi$  относительно направления на извещатель. При этом оценка вероятности обнаружения выполнялась на основе полученных опытным путем гистограмм плотности вероятности расстояния обнаружения цели. Однако недостаток полученных дискретных распределений состоит в отсутствии аналитических выражений для закона распределения, что ограничивает возможности их применения в задачах автоматизированного анализа и синтеза СФЗ. В связи с этим представляется целесообразным выполнить аппроксимацию экспериментальных данных и получить аналитические выражения для законов распределения расстояния обнаружения нарушителя. Полученные аналитические выражения можно использовать для вычисления ВО в задачах компьютерного моделирования процессов проникновения на объект и оценки эффективности СФЗ как разработчиками СФЗ, так и конечными пользователями.

### Методы исследования

Процесс несанкционированного проникновения (НП) может быть представлен с помощью последовательности переходов  $c_{ij}$  между началом и концом зоны объекта или физического препятствия [11] по  $i$ -й зоне до  $j$ -го препятствия или через  $i$ -е препятствие с переходом в  $j$ -ю зону. Совокупность выполненных переходов определяет маршрут  $R_n = \{c_{ij}, c_{jk}, \dots, c_{nm}, c_{ml}\}$  передвижения нарушителя. С точки зрения оценки ВО на маршруте интерес представляют в первую очередь обнаруживаемые переходы, соответствующие зонам, оснащенным извещателями. Вероятность выбора нарушителем того или иного маршрута зависит от различных условий, например, от сложности его прохождения и вероятности обнаружения на нем. Степень соответствия вероятности  $P_{\text{выб } R_n}$  выбора маршрута НП и требуемой вероятности

$P_{об R_n}$  обнаружения на этом маршруте может служить критерием оценки эффективности и уязвимости СФЗ. Для этого можно использовать коэффициент соответствия  $K_C = P_{выб R_n} (1 - P_{об R_n})$  [12].

Необходимо, чтобы его значение стремилось к нулю, что может быть достигнуто, прежде всего, выбором достаточно высокого значения вероятности обнаружения на этом маршруте или применением средств инженерной укрепленности, делающих маршрут малопривлекательным. В противном случае имеет место уязвимость СФЗ, и резульативная эффективность системы будет низка.

Для использования коэффициента соответствия необходимо знание вероятностей  $P_{об R_n}$  и  $P_{выб R_n}$ . В силу существенной разницы в методиках оценки этих параметров (в частности, специфика  $P_{выб R_n}$  требует оценки параметров инженерных средств – дверей, решеток, строительных конструкций и т.п.) в данной работе остановимся только на вопросах оценки  $P_{об R_n}$ .

Будем исходить из предположения, что квалифицированный нарушитель может применять некоторые способы воздействия на извещатель, чтобы свести к нулю вероятность своего обнаружения – например, выбирать направление и скорость движения, минимизирующие ВО для определенного типа извещателя. Известный способ борьбы с этим – многорубежная охрана [13], позволяющая повысить вероятность обнаружения  $P'_{об R_n} = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - P_{об i}(x, v, \varphi))$  при использовании  $I$  рубежей обнаружения НП, соответствующих наличию нескольких обнаруживаемых переходов на маршруте. Но этот способ также требует знания ВО как функции пройденного по зоне обнаружения расстояния, скорости и направления движения нарушителя. В связи с этим для оценки эффективности следует использовать значение вероятности обнаружения  $P_{об i}(v, \varphi)$  несанкционированного проникновения с учетом ряда упомянутых выше основных параметров [14].

Поскольку в настоящее время отсутствуют методики аналитического вычисления ВО, рассмотрим возможности использования других методов.

Методика оценки вероятности обнаружения нарушителя извещателями, в частности ПИК, определена в российском<sup>1</sup> и европейском<sup>2</sup> стандартах и основана на использовании так называемых тест-проходов по зоне обнаружения стандартной цели или ее имитаторов [15] при различных параметрах движения, прежде всего таких, как скорость и направление движения. Однако эти методики лишь частично учитывают возможные направления движения реальной цели. В первую очередь это относится к радиальному направлению движения цели, при котором, как показано в ряде источников [8, 9], вероятность обнаружения существенно падает. А наиболее опасный квалифицированный нарушитель, обладающий априорными сведениями о СФЗ, с высокой вероятностью выберет именно это направление. Кроме того, это не дает количественных значений ВО, что необходимо для корректного применения вероятностных методов.

Другой подход, предложенный в работе [13], основан на использовании плотности вероятности  $p(x_{об})$  расстояния  $x_{об}$ , пройденного целью (нарушителем) по зоне обнаружения. В свою очередь, оценка ее числовых характеристик может быть получена на основе экспериментальных исследований. Тогда вероятность обнаружения НП  $P_{об}$  в некоторой зоне можно характеризовать интегралом  $P_{об} = \int_0^{x_{об}} p(x_{об}) dx_{об}$ , где

$x_{об}$  – расстояние, на котором произошло обнаружение цели. Этот способ дает принципиальную возможность количественной оценки ВО при различных параметрах движения нарушителя и использован в [8–10] для получения экспериментальным путем оценок ВО различных типов извещателей, в том числе и ПИК.

В работах [8, 9] эксперимент проводился в следующих условиях: цель – человек, одетый в джинсовые штаны и рубашку с длинным рукавом, ростом 180 см и массой тела 75 кг; температура фона – 26 °С; направления движения – тангенциальное (перпендикулярно к направлению на ПИК-извещатель), диагональное и радиальное (вдоль сегментов диаграммы направленности, по направлению на извещатель); скорость движения цели – 0,3; 1,5 и 3 м/с. Условия этого эксперимента соответствуют требованиям ГОСТ Р. Таким образом, результаты этих работ могут быть использованы в качестве исходных данных для решения поставленной задачи путем их аппроксимации. Однако их непосредственное использование в предложенном выше подходе к оценке ВО в задачах автоматизированного моделирования затруднено ввиду отсутствия аналитических выражений. Поэтому необходимо решить задачу аппроксимации выборочных экспериментальных данных работ [8, 9].

<sup>1</sup> ГОСТ Р 50777–95. Системы тревожной сигнализации. Часть 2. Требования к системам охранной сигнализации. Раздел 6. Пассивные оптико-электронные инфракрасные извещатели для закрытых помещений и открытых площадок. Введ. 27.12.2006. М.: Госстандарт Российской Федерации. 25 с.

<sup>2</sup> E N 50131-2-2 Alarm systems – Intrusion systems – Part 2-2: Requirements for passive infrared detectors. Approved 2004-05-04. CENELEC. 38 p.

### Исследование применимости законов распределения

Для решения задачи аппроксимации выборочных распределений расстояния обнаружения  $\hat{p}(x_i)$  некоторой функцией, описываемой аналитическим выражением  $p_A(x)$ , необходимо произвести проверку гипотез о соответствии этих выборочных распределений аппроксимирующим функциям с требуемой точностью. В свою очередь, в качестве оценки выборочных распределений используются гистограммы плотности вероятности, полученные по выборке значений расстояния обнаружения на основе экспериментальных исследований [8, 9]. Таким образом, в нашем случае выполняется аппроксимация оценок выборочных распределений  $\hat{p}(x_i)$ , в качестве которых используются гистограммы (рис. 1), известными законами распределения  $p_A(x)$ .

В ходе работы была выполнена проверка гипотезы о соответствии выборочных законов распределения различным аналитическим формам  $p_A(x)$ , в частности, распределениям Гаусса, Рэлея, Максвелла, Вейбулла, а также логнормальному и гамма-распределению. Оценка точности аппроксимации производилась по критерию согласия Пирсона  $\chi^2$  при уровне значимости 0,05, как рекомендуется в [16]. При этом первые моменты (математическое ожидание  $m$  и дисперсия  $D$ ) аппроксимирующих распределений брались исходя из выборочных оценок моментов  $\hat{m}$  и  $\hat{D}$ , вычисленных для исходных экспериментальных распределений  $\hat{p}(x_i)$ .

Как отмечалось выше, вероятность обнаружения нарушителя при движении в радиальном направлении значительно ниже, чем в тангенциальном. В последнем случае значения вероятности обнаружения, практически равные единице, достигаются при перемещении  $x$  нарушителя в пределах не более 2–3 м. С учетом реальных размеров зон защищаемого объекта и соответствующих им размеров зон обнаружения такие значения позволяют использовать детерминированное значение вероятности обнаружения, равное единице, в качестве оценки ВО. Таким образом, для случая тангенциального движения аппроксимация не всегда является необходимой.

На рис. 1 приведены некоторые гистограммы плотности распределения расстояния обнаружения цели, полученные в работах [8, 9], и соответствующие им аппроксимирующие кривые.

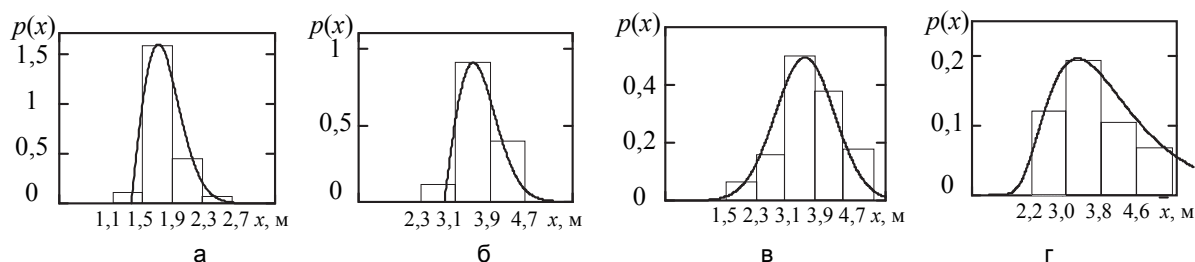


Рис. 1. Аппроксимация гистограмм плотности вероятности расстояния обнаружения:  $v = 3$  м/с, радиальное направление, логнормальное распределение (а);  $v = 0,3$  м/с, тангенциальное, логнормальное (б);  $v = 1,5$  м/с, радиальное, Гаусса (в);  $v = 0,3$  м/с, радиальное, Рэлея (г)

В результате анализа результатов аппроксимации были отобраны следующие аппроксимирующие функции:

- распределение Гаусса  $p_A(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right\}$ , где  $m$  – математическое ожидание,  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение ( $D = \sigma^2$ );
- распределение Рэлея  $p_A(x) = \frac{x}{c^2} \exp\left\{-\frac{x^2}{2c^2}\right\}$ ,  $x \geq 0$ ,  $c > 0$ , где  $c$  – параметр масштаба ( $m = \sqrt{\frac{\pi}{2}}c$ ,  $D = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right)c^2$ );
- логнормальное распределение  $p_A(x) = \begin{cases} \frac{1}{xc\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\ln x - \mu)^2}{2c^2}\right), & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ , где  $c \geq 0$ ,  $-\infty \leq \mu \leq \infty$  ( $m = \exp(\mu + c^2/2)$ ,  $D = (\exp(c^2) - 1) \exp(2\mu + c^2)$ );

– гамма-распределение  $p_A(x) = \begin{cases} \frac{\lambda^k x^{k-1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(k)}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ , где  $\lambda > 0$ ,  $k > 0$ ,  $\Gamma(k)$  – гамма-функция,

$$\Gamma(k) = \int_0^\infty e^{-t} t^{k-1} dt \quad (m = k/\lambda, D = k/\lambda^2).$$

Результаты оценки точности аппроксимации (значения  $\chi^2$ ) для различных значений скорости и направления движения цели для выбранных распределений приведены в таблице. Там же приведены табличные значения  $\chi_{\alpha=0,05}^2$  для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  и значения  $n$  степеней свободы, определяющие значения  $\chi_{\alpha=0,05}^2$  [16].

Направление	Скорость $v$ , м/с	Распределение				$\chi_{\alpha=0,05}^2$	$n$
		Гаусса	Рэлея	Гамма	Логнормальное		
Тангенциальное	0,3	13,45	10,96	9,7	8,1	7,81	3
Радиальное	0,3	0,61	0,15	0,3	72,18	9,49	4
	1,5	1,07	1,93	2,76	14,01	11,07	5
	3,0	14,15	10,5	6,79	5,53	9,49	4

Таблица. Значения  $\chi^2$  для различных параметров движения цели

На основании полученных результатов построены графики зависимости значений  $\chi^2$ , определяющих точность аппроксимации, от параметров движения цели (рис. 2).

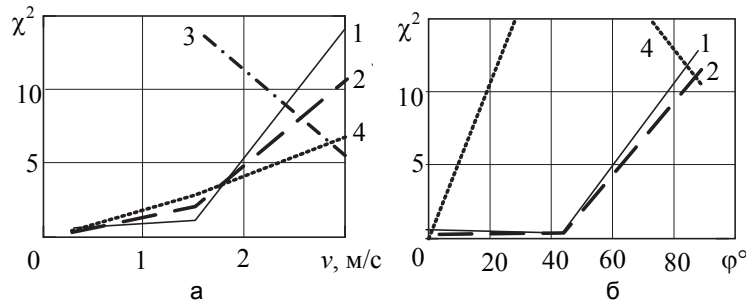


Рис. 2. Зависимости точности аппроксимации от скорости (а) при радиальном направлении и от направления (б) движения цели для распределений Гаусса (1); Рэлея (2); логнормального (3) и гамма (4)

Графики на рис. 2 иллюстрируют влияние направления и скорости движения на точность аппроксимации. На этих графиках  $\varphi = 0$  соответствует радиальному направлению,  $\varphi = 90^\circ$  – тангенциальному направлению движения. Угол  $\varphi = 45^\circ$  соответствует промежуточному направлению движения.

### Обсуждение результатов

На основании полученных результатов можно отметить следующее.

Для радиального направления движения во всем диапазоне скоростей, определенном ГОСТ Р, полностью соответствует установленным критериям аппроксимации гамма-распределение. Незначительное превышение значения параметра  $\chi_{\alpha=0,05}^2$  при скорости цели 3 м/с наблюдается для распределения Рэлея, что говорит также о возможности его применения.

При увеличении скорости движения нарушителя значение  $\chi^2$  растет, т.е. уменьшается степень соответствия аппроксимирующего распределения экспериментальному. Эта тенденция может объясняться уменьшением точности экспериментальных оценок  $\hat{p}(x_i)$  с ростом скорости движения цели.

При необходимости более точной аппроксимации можно использовать различные выражения для разных диапазонов скоростей и направлений движения. В частности, при скоростях движения цели, близких к нижнему пределу (0,3 м/с), большую точность обеспечивают распределения Гаусса, Рэлея и гамма. При скоростях движения цели, близких к верхнему пределу (3 м/с), расстояние обнаружения более точно аппроксимируется логнормальным и гамма-распределениями.

Таким образом, вероятность обнаружения цели может быть вычислена для конкретных направлений и скоростей движения цели по зоне обнаружения как  $P_{об} = \int_0^{x_{об}} p_A(x_{об}, v, \varphi) dx_{об}$ . При этом расстояние, прой-

денное по зоне обнаружения нарушителем, будет определяться конфигурацией и геометрическими размерами зоны объекта и их соотношением с формой и размерами диаграммы направленности извещателя.

### Заключение

В работе рассмотрены особенности получения оценок вероятности обнаружения нарушителя пассивными инфракрасными извещателями. Выполнена аппроксимация закона распределения расстояния обнаружения. Получены зависимости точности аппроксимации для разных условий проникновения, позволяющие выбрать аппроксимирующую функцию для конкретной практической задачи. Показано, что в наиболее полной мере выбранным критериям соответствуют распределение Рэлея и гамма-распределение, которые могут использоваться в задачах компьютерного моделирования систем физической защиты для вычисления вероятности обнаружения нарушителя при разных скоростях и направлениях движения.

### Литература

1. Гарсия М.Л. Проектирование и оценка систем физической защиты. М.: Мир, 2003. 392 с.
2. Малышкин С.Л. Вероятностный подход к анализу эффективности систем физической защиты // Альманах научных работ молодых ученых XLII научной и учебно-методической конференции НИУ ИТМО. 2013. С. 215–218.
3. Волхонский В.В. Извещатели охранной сигнализации. 4-е изд., доп. и перераб. СПб.: Экополис и культура, 2004. 272 с.
4. Волхонский В.В. Критерии выбора контролируемых средствами обнаружения параметров в системе безопасности // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 1. С. 8–12.
5. Kaushik A.R., Lovell N.H., Celler B.G. Evaluation of PIR detector characteristics for monitoring occupancy patterns of elderly people living alone at home // Conference Proceeding IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2007. P. 3802–3805.
6. Ulvila J.W., Gaffney J.E. Jr. Evaluation of intrusion detection system // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. 2003. V. 108. N 6. P. 453–473.
7. Gaffney J.E. Jr., Ulvila J.W. Evaluation of intrusion detectors: a decision theory approach // Proc. IEEE Computer Society Symposium on Research in Security and Privacy. Los Alamitos, USA, 2001. P. 50–61.
8. Волхонский В.В., Воробьев П.А. Методика оценки вероятности обнаружения несанкционированного проникновения оптикоэлектронным извещателем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 1 (77). С. 120–123.
9. Волхонский В.В., Воробьев П.А. Анализ характеристик обнаружения нарушителя ПИК датчиками охранной сигнализации // Алгоритм безопасности. 2012. № 1. С. 44–46.
10. Богданов А., Багров В. Особенности характеристик обнаружения ПИК и совмещенных ПИК+РВ датчиков для помещений // Алгоритм безопасности. 2012. № 4. С. 72–73.
11. Волхонский В.В. Особенности оценки продолжительности несанкционированного проникновения на охраняемый объект // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. 2011. № 1(22). С. 10–15.
12. Волхонский В.В., Гатчин Ю.А. Подход к задаче анализа эффективности системы безопасности на основе вероятностных оценок временных параметров процесса проникновения на защищаемый объект // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2012. № 2. С. 35–39.
13. Волхонский В.В. К вопросу повышения вероятности обнаружения несанкционированного проникновения на охраняемый объект // Вестник Воронежского института МВД России. 2011. № 4. С. 35–44.
14. Волхонский В.В., Воробьев П.А., Трапш Р.Р. Критерии оценки эффективности функционирования оптикоэлектронных датчиков систем физической защиты // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 3(117). С. 24–29.
15. Полещук Р. Европейские стандарты EN50131 для систем охранной сигнализации // Алгоритм безопасности. 2010. № 4. С. 28–31.
16. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов / под ред. И.Н. Коваленко. М.: Мир, 1971. 408 с.

<b>Волхонский Владимир Владимирович</b>	– доктор технических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, volkhonski@mail.ru
<b>Малышкин Сергей Леонидович</b>	– аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, malyshkin-sl@mail.ru
<b>Vladimir V. Volkhonskiy</b>	– D.Sc., Associate professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, volkhonski@mail.ru
<b>Sergey L. Malyshekin</b>	– postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, malyshkin-sl@mail.ru