

УДК 519.87; 534.2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА УТЕЧКИ РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Сагдеев К.М., Оленев А.А.

ГБОУ ВПО «Ставропольский государственный педагогический институт»,
Ставрополь, e-mail: mail@sspi.ru

Для обеспечения защиты конфиденциальной информации существует задача по оценке состояния защищенности для потенциальных акустических каналов утечки речевой информации расчетным методом. Цель работы – разработка математической модели, учитывающей всевозможные пространственные и энергетические условия разведывательного контакта в канале и обеспечивающей высокую точность оценки защищенности речи. Решение достигается путем разработки структурно-пространственной модели исследуемого канала и математического описания закономерностей в нем. Для оценки словесной разборчивости речи выбран формантный метод. Математическая модель устанавливает функциональную зависимость разборчивости речи от характеристик сигнально-помеховой обстановки в канале. Для обеспечения адекватности физических процессов, протекающих в канале, математическая модель представлена в виде совокупности четырех взаимосвязанных моделей, достаточно точно описывающих акустический сигнал, создаваемый источником речи, акустические преднамеренные помехи и естественные шумы, влияние неоднородной среды распространения и возможности акустического приемника по распознаванию речи. Достоинство модели заключается в универсальности, математической точности и функциональной применимости. Модель может быть использована для разработки программного обеспечения, применяемого в автоматизированных системах аудиомониторинга.

Ключевые слова: математическая модель, акустический канал утечки речевой информации, разборчивость речи, формантный метод, акустический сигнал, среда распространения, акустические помехи и шумы, акустический приемник

MATHEMATICAL MODEL OF THE ACOUSTIC CHANNEL OF LEAKAGE OF SPEECH INFORMATION

Sagdeev K.M., Olenev A.A.

Stavropol State Pedagogical Institute, Stavropol, e-mail: mail@sspi.ru

For ensuring protection of confidential information there is a task of an assessment of a condition of security for potential acoustic channels of leakage of speech information a calculation method. The purpose of work is development of mathematical model that takes into account all sorts of spatial and energy conditions prospecting contact in the channel, and ensuring high accuracy of the assessment of the security of the speech. The decision is reached by development of structural and spatial model of the studied channel and the mathematical description of regularities in it. For the assessment of verbal speech intelligibility is selected method of the formant. The mathematical model establishes a functional dependence of the intelligibility on the characteristics of the signal-noise situations in the channel. For ensuring adequacy of the physical processes occurring in the channel, the mathematical model is presented in the form of set of four interconnected models, accurately describing an acoustic signal generated by the source of the speech, acoustic deliberate hindrances and natural noise, influence of the non-uniform environment of distribution and possibility of the acoustic receiver on speech recognition. Advantage of model consists in universality, mathematical accuracy and functional applicability. The model can be used for development of software, used in the automated systems of audio monitoring.

Keywords: mathematical model, acoustic channel of leakage of speech information, intelligibility of speech, method of the formant, acoustic signal, distribution environment, acoustic hindrances and noise, acoustic receiver

В проблемах обеспечения информационной безопасности важное место занимает задача оценки эффективности защиты информации от утечки по акустическим каналам. Это вызвано тем, что акустические сигналы (АС) несут семантическую информацию конфиденциального характера, легко воспринимаемую слуховым аппаратом человека, а при наличии технических средств акустической разведки (ТСАР) она может быть подслушана на расстояниях, превышающих границы контролируемых зон (КЗ).

Рекомендуемая нормативными документами [6] методика инструментального контроля не позволяет оценить потенциальное состояние акустического канала утечки речевой информации (АКУРИ) на стадиях

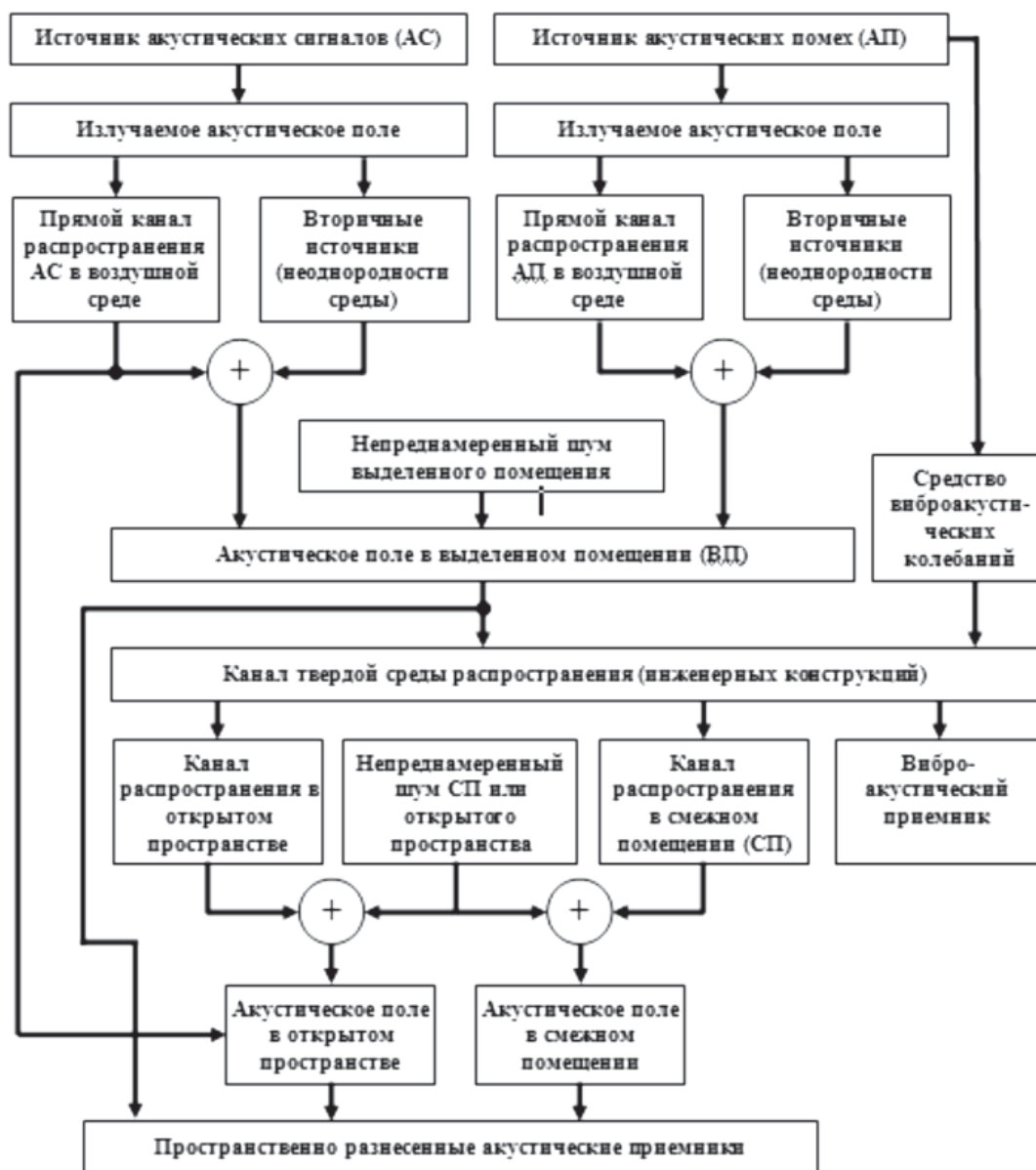
предварительного специального обследования или проектирования выделенного (защищаемого) помещения (ВП). К тому же расчетная часть методики является упрощенной, т.к. не учитывает неравномерность спектров речи и шума, размеры и неоднородности звукоизолирующих ограждений, АЧХ среды распространения и слухового аппарата. Таким образом, наличие практическая потребность в оценке состояния потенциальных АКУРИ расчетным методом. Реализация данной задачи возможна путем разработки математической модели АКУРИ, позволяющей расчетным методом априорно оценить состояние этого канала для конкретного ВП. Для обеспечения адекватности и высокой точности оценки математическая модель должна учитывать

всевозможные пространственные и энергетические условия разведывательного контакта с учетом акустических свойств помещений и технических возможностей современных ТСАР.

Структурно-пространственная модель акустического канала утечки речевой информации (АКУРИ). С учетом специфики распространения акустических колебаний существует 2 простых (несоставных) АКУРИ: воздушный и виброакустический каналы. В обоих каналах основным оцениваемым параметром, влияющим на защищенность информации, является разборчивость речи, которая основана на оценке биологического сигнала, генерируемого человеком и воспринимаемого органами слуха [2, 4]. Разборчивость речи в АКУРИ непосредственно

зависит от структурно-пространственных условий, т.е. от составных элементов канала, влияющих на распространение речевого сигнала и его разборчивость за пределами КЗ, а также от взаимного пространственного расположения источника и приемника АС и других влияющих элементов.

Обобщенная структурно-пространственная модель АКУРИ приведена на рисунке. Из которой следует, что создаваемые источниками акустические поля, ослабленные средой распространения, замаскированные естественными шумами и преднамеренными помехами, распространяются за пределы КЗ и могут быть перехвачены ТСАР, располагаемыми в ВП, или за его пределами в соседнем помещении (СП) или даже на открытом пространстве.



Структурно-пространственная модель АКУРИ

В зависимости от энергетических условий разведывательного контакта речевая информация может быть распознана с определенным качеством или не распознана. Следовательно, математическая модель АКУРИ должна представлять собой совокупность взаимосвязанных математических выражений, адекватно и достаточно точно описывающих состояние разборчивости речи на выходе ТСАР при различных пространственных и энергетических условиях разведывательного контакта.

Общие положения математического моделирования. Адекватность и точность модели АКУРИ зависит от выбора метода оценки словесной разборчивости речи. В настоящее время на практике используются три группы объективных методов оценки: формантные, модуляционные и эмпирические. В работах [1, 3] установлено, что наиболее адекватным методом оценки является формантный метод, в котором анализ речи осуществляется в 20-частотных полосах с равноартикуляционным распределением разборчивости либо в 21-й третьоктавной полосе (в упрощенном вари-

анте в 7-октавных полосах). В пределах октавных полос (ОП) спектры речи и шума, а также плотность распределения вероятностей формант, принято считать практически неизменными [3, 7]. Поскольку отечественной наукой и промышленностью разработаны и созданы третьоктавные и октавные фильтры, то математическая модель АКУРИ должна представлять собой математическое выражение словесной разборчивости речи, описываемое в виде массива спектральных уровней речевого сигнала в 21-й третьоктавной полосе (1/3 ОП).

С учетом специфики структурно-пространственной модели АКУРИ математическую модель целесообразно декомпозировать на 4 взаимосогласованные частные модели: источника акустического сигнала (ИАС); акустических помех и шумов (АПШ); среды распространения (СР) АС и акустического приемника (АПРм).

Модель источника акустического (речевого) сигнала. Значение спектрального уровня акустического сигнала $L_{s_i}(f_{cp_i})$ в 1/3 ОП определяется выражением

$$L_{s_i}(f_{cp_i}) = L_s + 10 \cdot \lg \left(\frac{\int_{f_{ni}}^{f_{vi}} g_s \partial f}{G_s(f)} \right) = L_s + V_i, \text{ [дБ]}, \quad (1)$$

где L_s – интегральный уровень АС, измеряемый на расстоянии 1 м; $G_s(f)$ – усредненный энергетический спектр АС; $g_s(f)$ – усредненная спектральная плотность мощности АС; V_i – весовой энергетический коэффициент i -й полосы, показывающий ее вклад в интегральную мощность АС, при оценке в дБ он имеет отрицательный знак; f_{cp_i} – среднегеометрическая частота i -й полосы; f_{ni} и f_{vi} – соответственно нижняя и верхняя граничные частоты i -й полосы. Расчет значений данных частот производится по формулам, приведенным в ГОСТ 1716–82:

$$f_{cp_i} = 10^{\frac{X+it}{10}}, \quad f_{ni} = \frac{f_{cp_i}}{\sqrt[2t]{2}},$$

$$f_{vi} = f_{cp_i} \cdot \sqrt[2t]{2}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где i – номер полосы; N – число полос, равное 7 для ОП и 21 для 1/3 ОП; X – число, равное 18 для ОП и 19 для 1/3 ОП; t – число, равное 1 для ОП и 3 для 1/3 ОП.

Итак, математическая модель ИАС описывается выражением (1), осуществляющим преобразование интегрального уровня речевого сигнала L_s в его спектральные уровни $L_{s_i}(f_{cp_i})$ в 1/3 ОП. Результат преобразования представляет собой 21-мерный массив данных.

Модель акустических помех и шумов. Важнейшими факторами, влияющими на разборчивость речи, являются акустические естественные шумы и преднамеренные помехи, т.к. процесс восприятия речи в шуме сопровождается потерями составных элементов (формант и фонем) речевого сообщения. При этом разборчивость речи будет зависеть от уровня и вида помех (шума) в месте размещения приемника ТСАР. Спектральный уровень суммарного шума $L_{ш_i}$, наводимый на входе АПРм, определяется выражением

$$L_{ш_i} = Le_i + \chi \cdot Ln_i, \quad (3)$$

где Le_i , Ln_i – соответственно спектральные уровни естественного шума и преднамеренных помех в АКУРИ, которые измеряются на входе АПРм в i -й 1/3 ОП; χ – формализованный параметр, уточняющий условия разведывательного контакта и характеризующий применение активных помех при $\chi = 1$. Усредненные (среднестатистические) спектральные уровни Le_i акустических шумов в ОП для типовых помещений и территорий приведены в СНиП 23-03–2003 «Защита от шума».

Для защиты речи от подслушивания с помощью ТСАР активно применяются генераторы преднамеренных АП, которые соз-

дают шумовые помехи типа белый, розовый или окрашенный шум, а также речеподобные помехи. Математически преднамеренная АП описывается спектральной плотностью мощности шума $g_{ш}$ и средними спектральными уровнями шума $L_{ш}$ в 1/3 ОП. Рассмотрим ма-

тематическое описание приведенных помех, подробно изложенное в работе [5].

Так, средний спектральный уровень белого шума в 1/3 ОП определяется выражением (4), розового шума – выражением (5), т.е.

$$L_{бш_i} = 10 \cdot \log \left[g_{бш} \cdot (f_{в_i} - f_{н_i}) \right], \text{ [дБ]}, \quad (4)$$

где $g_{бш} = \frac{10^{0,1 \cdot L_{п}}}{f_{в_N} - f_{н_1}}$.

$$L_{рш_i} = 10 \cdot \log \left[g_{рш} \cdot \left(\ln(f_{в_i}) - \ln(f_{н_i}) \right) \right], \text{ [дБ]}, \quad (5)$$

где $g_{рш} = \frac{10^{0,1 \cdot L_{п}}}{\ln\left(\frac{1}{f_{н_1}}\right) - \ln\left(\frac{1}{f_{в_N}}\right)}$,

где $L_{п}$ – интегральный уровень преднамеренной помехи, создаваемый источником помех.

Для речи, близкой к оптимальной помехе, считается окрашенный шум, спектр которого близок к усредненному спектру речи. Средний спектральный уровень окрашенного шума в 1/3 ОП равен

$$L_{ош_i} = 10 \cdot \log \left(k_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_{п}} \right), \text{ [дБ]}, \quad (6)$$

где k_i – весовой коэффициент, характеризующий вероятность наличия формант речевого сигнала в i -й полосе частот.

Наиболее эффективной помехой для речевой информации является речеподобная помеха (речевой хор) [7] со спектральным уровнем в 1/3 ОП, равным

$$L_{px_i} = 10 \cdot \log \left(k_i \cdot \frac{10^{0,1 \cdot L_{п}}}{S + 1} + \sum_{s=1}^S \left(1 - \exp\left(\frac{-225}{L_{s_i}} \right) \cdot Rsn_{i,s} \right) \right), \text{ [дБ]}, \quad (7)$$

где S – количество помеховых речеподобных сигналов (фонограмм); L_{s_i} – спектральный уровень исходного (передаваемого) речевого сигнала в 1/3 ОП; $Rsn_{i,s}$ – коэффициент корреляции между спектрами переданного и сгенерированных речевых сигналов в 1/3 ОП.

Итак, выражения (3)–(7) представляют собой математическую модель, описывающую спектральный уровень суммарного шума на входе АПрм, создаваемый за счет наличия естественных шумов и действия системы подавления, генерирующей одну из типовых помех. При этом величина спектрального уровня преднамеренной помехи $L_{п_i}$ в выражении (3) определяется с помощью выражений (4)–(7) в зависимости от типа генерируемого шума.

Модель среды распространения АС. Эта модель должна, учитывая простран-

ственные условия разведывательного контакта, описывать неравномерное зависимость от частоты ослабление речевого сигнала в процессе его распространения с учетом особенностей акустики конкретных ВП, их звукоизолирующих и звукопоглощающих возможностей. Из структурно-пространственной модели АКУРИ следует, что возможны 4 варианта пространственных условий разведывательного контакта, задаваемых формализованными параметрами p_1, p_2 : подслушивание в открытом пространстве ($p_1 = p_2 = 0$); подслушивание в ВП ($p_1 = 0, p_2 = 1$); подслушивание за пределами ВП в открытом пространстве ($p_1 = 1, p_2 = 0$); подслушивание в СП ($p_1 = p_2 = 1$). Исходя из таких условий, спектральный уровень L_{c_i} АС в точке размещения АПрм определяется системой:

$$L_{c_i} = \begin{cases} L_i - 20 \lg(r_0) - \beta_i r_0 / 1000, & \text{if } p_1 = p_2 = 0; \\ 10 \lg(10^{0,1 L_{н_i}} + 10^{0,1 L_{и}}) = L_{н_i}, & \text{if } p_1 = 0, p_2 = 1; \\ L_{н_i} - Z_i - 20 \lg(r_2), & \text{if } p_1 = 1, p_2 = 0; \\ 10 \lg(10^{0,1(L_{н_i} - Z_i)} + 10^{\lg(S_n / \alpha_{2i} S_2)}), & \text{if } p_1 = p_2 = 1; \end{cases} \quad (8)$$

где L_i – спектральный уровень АС на выходе источника, дБ; r_0 – расстояние от ИАС до АПрм в открытом пространстве, м; β – значение коэффициента затухания звука в воздухе; L_{nv_i} – спектральный уровень АС в точке приема в ВП, создаваемый прямой волной, дБ; L_{d_i} – спектральный уровень АС в точке приема в ВП, создаваемый диффузной составляющей поля, дБ; L_{n_i} – спектральный уровень АС на границе сред воздух – ограждающая конструкция (ОК) в ВП, дБ; Z_i – потери (затухание) АС в твердой среде распространения (звукоизолирующей ОК), дБ; r_2 – расстояние от наружной поверхности ОК до точки приема АС в открытом пространстве, м; S_n – площадь ОК между ВП и СП, м²; S_1 – площадь внутренних поверхностей СП, в котором размещается АПрм, м²; α_{2i} – средний спектральный коэффициент звукопоглощения звука в СП.

Значения спектральных уровней АС, создаваемых прямой волной и диффузионной составляющей поля, в точке приема определяются согласно формулам

$$L_{nv_i} = L_i - 20 \cdot \lg(r_i),$$

$$L_{d_i} = 10 \cdot \lg \left[\frac{10^{0,1L_i} \cdot 4 \cdot (1 - \alpha_1)}{\alpha_1 \cdot S_1} \right], \quad (9)$$

где S_1 – площадь внутренних поверхностей ВП, м²; α_{1i} – средний спектральный коэффициент звукопоглощения звука в ВП.

$$Q_i = q_i - \Delta A_i = Lc_i - Lш_i - \Delta A_i + \Theta \cdot K_{нд_i} + m \cdot K_{ош_i}, \quad \text{дБ}, \quad (11)$$

где q_i – энергетическое соотношение уровней АС и АП; ΔA_i – формантный параметр, характеризующий энергетическую избыточность дискретной составляющей АС; Θ и m – формализованные параметры, уточняющие энергетические условия разведывательного контакта, если $\Theta = 1$, то прослушивание речи осуществляется с использованием ТСАР (остронаправленных микрофонов), если $m = 1$, то прослушивание речи осуществляется с использованием технических средств

С помощью модели среды распространения АС, описываемой выражениями (8) и (9), рассчитываются спектральные уровни Lc_i речевого сигнала на входе АПрм для различных вариантов пространственного разведывательного контакта.

Модель акустического приемника. Особенность АКУРИ состоит в том, что семантический анализ речи, перехваченной с помощью ТСАР, производит человек. С учетом этой особенности, а также выбранного формантного метода оценки математическая модель АПрм должна описывать функциональную зависимость интегральной величины, характеризующей разборчивость (артикуляцию) речи, от отношения уровней сигнал/шум на входе приемника, т.е. от энергетических условий разведывательного контакта.

Для удобства вычисления данный интегральный функционал следует заменить взвешенной суммой, позволяющей производить расчет формантной разборчивости речи R :

$$R = \sum_{i=1}^n k_i \cdot r_i(Q_i), \quad (10)$$

где i – номер 1/3 ОП, n – их число, k_i – весовые коэффициенты, характеризующие вероятность наличия формант в 1/3 ОП, т.е. их весовой вклад в разборчивость, $r_i(Q_i)$ – коэффициент восприятия формант, зависящий от относительного уровня Q_i сигнал/шум, т.е.

шумовой очистки речи; $K_{нд}$ – коэффициент направленного действия (КНД) микрофона в 1/3 ОП, характеризующий энергетический выигрыш за счет его применения, дБ; $K_{ош}$ – коэффициент улучшения отношения сигнал/шум в 1/3 ОП за счет применения средств шумовой очистки, дБ.

Значения коэффициентов $r_i(Q_i)$ и k_i определяются с помощью аналитических соотношений, обеспечивающих ошибку аппроксимации менее 1%:

$$r_i = \left| \gamma_i - \left(\frac{0,78 + 5,46 \cdot \exp(-4,3 \cdot 10^{-3} \cdot (27,3 - |Q_i|)^2)}{1 + 10^{0,1|Q_i|}} \right) \right|, \quad (12)$$

где $\gamma_i = \begin{cases} 1, & \text{if } Q_i > 0, \\ 0, & \text{if } Q_i \leq 0, \end{cases}$

$$k_i = \begin{cases} 2,57 \cdot 10^{-8} \cdot [f_{в.i}^{2,4} - f_{н.i}^{2,4}], & \text{iff } \leq 400 \text{ Гц}, \\ 1,074 \cdot [\exp(-10^{-4} \cdot f_{в.i}^{1,18}) - \exp(-10^{-4} \cdot f_{н.i}^{1,18})]. \end{cases} \quad (13)$$

Теперь, расчет словесной разборчивости речи W легко осуществляется с помощью следующего выражения:

$$W = \begin{cases} 1,54 \cdot R^{0,25} \cdot [1 - \exp(-11 \cdot R)], & \text{if } R < 0,15; \\ 1 - \exp\left(-\frac{11 \cdot R}{1 + 0,7 \cdot R}\right), & \text{if } R \geq 0,15. \end{cases} \quad (14)$$

Выражения (10)–(14) представляют собой математическую модель АПрм, при этом выражение (11) определяет энергетические условия разведывательного контакта, от которого зависит форматная разборчивость речи, а выражение (14) описывает зависимость величины словесной разборчивости речи от форматной разборчивости. Рассчитанная с помощью модели, словесная разборчивость речи позволит сделать вывод о состоянии защищенности речи в исследуемом АКУРИ, оценить эффективность принимаемых мер защиты.

Выводы

Математическая модель АКУРИ, разработанная на основе введенной структурно-пространственной модели, устанавливает функциональную зависимость разборчивости речи от характеристик сигнально-помеховой обстановки в канале. Достоинство модели:

- универсальность, т.е. возможность применения для различных условий пространственного и энергетического разведывательных контактов;

- математическая точность в отображении физических процессов генерации, распространения и восприятия АС в любых условиях обстановки;

- функциональная применимость, заключающаяся в возможности использования ее для расчетного и инструментально-расчетного контроля защищенности речи в ВП.

На основе модели разработана программа для расчета словесной разборчивости речи, на которую получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617339 от 3 ноября 2010. Математическая модель может быть положена в основу разработки программного обеспечения для автоматизированных систем аудиомониторинга.

Список литературы

1. Дворянкин С.В., Макаров Ю.К., Хорев А.А. Обоснование критериев эффективности защиты речевой информации // Защита информации. Инсайд. – 2007. – № 2. – С. 18–25.
2. Железняк, В.К., Макаров Ю.К., Хорев А.А. Некоторые методические подходы к оценке эффективности защиты речевой информации // Специальная техника. – 2000. – № 4. – С. 39–45.
3. Каргашин В.Л. Некоторые особенности реализации пассивных мер защиты в виброакустических каналах утечки речевой информации // Специальная техника. 2002. №5. – С. 55–60.

4. Покровский Н.Б. Расчет и измерение разборчивости речи. – М.: Изд-во литературы по вопросам связи и радио, 1962. – 392 с.

5. Сагдеев К.М. Усовершенствование математической модели для оценки акустических каналов утечки речевой информации // Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности и защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. – Ставрополь: Сервисшкола, 2010. – С. 195–203.

6. Сборник временных методик оценки защищенности конфиденциальной информации от утечки по техническим каналам. – М.: Изд-во Гостехкомиссии, 2002. – 71 с.

7. Хорев А.А. Оценка возможностей средств акустической (речевой) разведки // Специальная техника. – 2009. – № 4. – С. 49–63.

References

1. Dvoryankin S.V., Makarov Yu.K., Khorev A.A. Justification of criteria of efficiency of protection of speech information // Protection of information. Insider. 2007. no. 2. pp. 18–25.

2. Zheleznyak, V.K., Makarov Yu.K., Khorev A.A. Some of the methodological approaches to the assessment of the effectiveness of protection of speech information // Special technique. 2000. no. 4. pp. 39–45.

3. Kargashin V.L. Some peculiarities of the passive measures of protection in vibroacoustical the channels of the leakage of speech information // Special technique. 2002. no. 5. pp. 55–60.

4. Pokrovsky N.B. Raschet and measurement of legibility of speech. – M.: Literature publishing house concerning communication and radio, 1962. 392 p.

5. Sagdeev K.M. Improvement of mathematical model for the evaluation of acoustic channels of the leakage of speech information // The collection of scientific papers on materials of the international scientific-practical conference «Actual problems of safety of life and protection of the population and the territories in emergency situations». – Stavropol: Serviceschool, 2010. pp. 195–203.

6. The collection of temporary techniques of an assessment of security of confidential information from leak on technical channels. – M.: Gostekhcomissia publishing house, 2002. 71 p.

7. Khorev A.A. Assessment of possibilities of means of acoustic (speech) investigation // Special technique. 2009. no. 4. pp. 49–63.

Рецензенты:

Копытов В.В., д.т.н., профессор, начальник управления информатизации, профессор кафедры организации и технологии защиты информации ФГБОУ ВПО «Ставропольский государственный университет», г. Ставрополь;

Будко П.А., д.т.н., профессор кафедры информационных систем и технологий ФГБОУ ВПО «Ставропольский государственный аграрный университет», г. Ставрополь.

Работа поступила в редакцию 25.06.2012.