

В.Б. АВДЕЕВ, В.А. ТРУШИН, М.А. КУНГУРОВ
**УНИФИЦИРОВАННАЯ РЕЧЕПОДОБНАЯ ПОМЕХА ДЛЯ
СРЕДСТВ АКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Авдеев В.Б., Трушин В.А., Кунгуров М.А. Унифицированная речеподобная помеха для средств активной защиты речевой информации.

Аннотация. Рассматривается возможность создания речеподобной помехи для средств виброакустической защиты речевой информации на основе таблиц слогов и слов русского языка. Обосновывается выбор направлений исследований и условий проведения эксперимента: синтез звуковых файлов путем случайной выборки элементов речи из базы данных, исследование спектров синтезированных помех, алгоритм создания помехи типа «речевой хор», исследование автокорреляционных функций синтезированных РП-помех, а также их плотности распределения вероятностей. Показано, что спектральные и статистические характеристики синтезированных речеподобных помех типа «речевой хор» из пяти голосов близки к аналогичным характеристикам реальных речевых сигналов. При этом речевой хор формировался путем усреднения мгновенных значений временных реализаций звуковых файлов. Показано, что спектральная плотность мощности речеподобной помехи типа «речевой хор» практически не изменяется при числе усредняемых «голосов» начиная с пяти. Плотность распределения вероятностей значения речеподобной помехи при увеличении числа голосов в «речевом хоре» приближается к нормальному закону (в отличие от реального речевого сигнала, чья плотность вероятности близка к распределению Лапласа). Оценка автокорреляционной функции показала интервал корреляции в несколько миллисекунд. Проведенные артикуляционные испытания разборчивости речи при использовании синтезированных речеподобных помех с различными отношениями «сигнал/шум» показали возможность снижения интегрального уровня помехи на 12-15 дБ по сравнению с шумоподобной помехой. Построены зависимости словесной разборчивости от интегрального отношения «сигнал/помеха» на основе полиномиальной и кусочно-линейной аппроксимации. Проведена предварительная оценка возможного влияния речеподобных помех на психоэмоциональное состояние человека. Обсуждается направление дальнейших исследований по повышению эффективности алгоритмов формирования речеподобных помех.

Ключевые слова: защита речевой информации, разборчивость речи, унифицированная речеподобная помеха, базы слогов и слов, спектральная плотность мощности, плотность распределения вероятностей, автокорреляционная функция, артикуляционные испытания

1. Введение. Для защиты речевой информации от утечки по техническим каналам широко применяются активные средства защиты – генераторы акустического и виброакустического шума. Такие генераторы построены в основном с использованием в качестве задающего белого шума с нормальным законом распределения вероятности значений. Естественно, что встает вопрос о выборе такой помехи, которая при обеспечении требуемого показателя защищенности (в общем случае – это коэффициент словесной разборчивости речи W) дает минимальное значение интегрального уровня помехи, то есть вносит минимальные дискомфорт и демаскирующие признаки при

проведении переговоров. Так, доказано, что для шумовых помех такими являются формантоподобные, то есть помехи, имеющие огибающую спектра, подобную спектру формант [1].

Исследования в области психоакустики показали [2], что гораздо более эффективной является речеподобная помеха, имеющая не только огибающую спектра подобную речевому сигналу, но и его «тонкую» структуру. При этом наибольшей эффективностью обладает помеха типа «речевой хор».

Известные на рынке активные средства защиты информации – генераторы речеподобной помехи (ГРП) используют разные алгоритмы ее формирования. Например, в комплексе виброакустической защиты «Барон», речеподобная помеха формировалась от трех внешних радиостанций с использованием дополнительного фонемного клонера из голосов говорящих. В генераторах «Факир», «Шаман», «Бубен» используется псевдослучайный сигнал типа «речевой хор». Однако принципы формирования речеподобных (РП) помех в этих устройствах не раскрываются.

Вместе с тем анализ публикаций по данному вопросу позволяет выявить два основных подхода в формировании РП-помехи:

1. От различных внешних источников.
2. От внутренних источников прибора.

В первом случае на внешний вход ГРП (например, микрофонный) подаются реальные речевые сигналы конкретных лиц (участников переговоров) или сигналы от других источников (например, радиостанций) [3-8]. Во втором случае РП-помеха формируется внутри ГРП самыми различными способами: синтез РП-помехи из заранее записанных в память ГРП элементов речи с выборкой по случайному закону; формирование РП-помехи из «псевдотекстов» с оптимизацией помехи путем клонирования основных фонемных составляющих голосов конкретных лиц; с использованием заранее сформированных баз аллофонов и тому подобное [9-15].

Естественно, существуют и комбинированные решения, совмещающие два указанных подхода. Необходимо отметить, что не существует какой-либо классификации РП-помех. Наиболее полные обзоры методов формирования РП-помех приведены в работах [7, 8].

К сожалению, в большинстве перечисленных работ не приводятся количественные данные об эффективности формируемых РП-помех. Исключение составляют работы [9, 10]. Так в работе [9] говорится об энергетическом выигрыше в 9 дБ при использовании помехи типа «фонемный хор» по сравнению с белым шумом (для слоговой разборчивости); в работе [10] – о выигрыше порядка 15 дБ для обеспечения словесной разборчивости 0,1-0,3.

Что касается самого понятия РП-помехи, в работах [8, 16] дается следующее определение: «Синтезируемый по случайному закону акустический сигнал, который по своим основным характеристикам соответствует речевому сигналу, но не содержит смысловой информации». При этом под основными характеристиками понимается их усредненные спектральные и временные характеристики без раскрытия этих понятий и критериев соответствия.

На данный момент не существует нормативной базы, регулирующей принципы формирования РП-помехи в средствах виброакустической защиты речевой информации, что не позволяет их унифицировать и делает невозможной сертификацию таких устройств.

Целью настоящей работы является исследование возможности создания унифицированной РП-помехи для ее дальнейшего использования при создании средств активной защиты речевой информации.

Суть предлагаемого подхода заключается в следующем:

1. Для формирования РП-помехи используются базы элементов русской речи: слогов и слов из ГОСТ.

2. Выборка элементов речи из баз осуществляется по случайному алгоритму.

3. Из случайной выборки с помощью программы-звукосинтезатора формируются звуковые файлы.

4. Формируется РП-помеха типа «речевой хор» из нескольких голосов путем наложения их звуковых файлов.

При этом необходимо решить следующие задачи:

– оценить влияние длительности аудиосигнала на его энергетический спектр;

– оценить влияние вида элементов речи (слоги, слова и др.) на его энергетический спектр;

– выбрать механизм создания РП-помехи типа «речевой хор» и оценить его энергетический спектр;

– провести артикуляционные испытания разборчивости речи с различными видами РП-помехи при разных отношениях «сигнал/помеха»;

– оценить плотности вероятностей и автокорреляционные функции синтезированных РП-помех.

2. Основные условия проведения исследований. За основу при создании РП-помех взяты артикуляционные слоговые и словесные таблицы из ГОСТ 16600-72 [17]. Для сравнения рассматривались также связные (смысловые) тексты [11, 18]. Формирование РП-помехи на основе звуков не рассматривалось, так как разборчивость звуков зависит от их сочетаний с другими звуками [19].

В качестве алгоритма случайной выборки речи из соответствующей базы использовался метод RNGCrypto-ServiceProvider, реализованный на языке C#.

Программа-синтезатор – Vocalizer. Выбор данной программы обусловлен возможностью изменения таких параметров, как частота дискретизации, установка скорости речи, добавление других голосов и сохранение записи в файл.

Запись аудиофайлов производилась с частотой дискретизации 44,1 кГц, 16 бит, моно. Для обработки аудиосигналов и получения их спектров использовалась программа Adobe Audition 3.0. Создание РП-помехи производилось при среднем уровне речи 70 дБ.

3. Оценка влияния длительности аудиосигнала на его энергетический спектр. Для оценки влияния длительности аудиосигнала были использованы различные по длительности (1, 5, 15 и 30 минут) отрезки звуковых файлов, записанные одним диктором. С помощью программы Adobe Audition 3.0 для каждого отрезка построены спектры речевых сигналов и рассчитаны интегральные уровни в 7 октавных полосах. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние длительности аудиосигнала на спектр

Октавные полосы, Гц	Интегральные уровни спектра речи, дБ			
	1 мин	5 мин	15 мин	30 мин
125	54,21	54,71	55,00	54,93
250	65,76	66,06	66,09	66,14
500	67,23	67,04	66,99	66,97
1000	55,40	54,09	54,18	54,27
2000	48,74	48,25	47,94	47,90
4000	50,38	50,59	50,36	50,06
8000	51,76	52,46	52,50	52,24

Различия спектров речи от длительности аудиосигнала составляет примерно 1 дБ. Таким образом, можно сделать вывод, что длительность аудиосигнала не имеет существенного влияния на спектр речевого сигнала (при времени усреднения не менее 1 минуты).

4. Оценка влияния вида элементов речи на его спектр. Слоги и слова были взяты из ГОСТ 16600-72, связный текст – отрывок из произведения М. А. Булгакова «Мастер и Маргарита». Длительность записи аудиофайлов – одна минута. Эксперимент проводился для 5 «синтезированных» дикторов. Пример полученных результатов для диктора Алёны по слогам, словам и связным текстам приведен в таблице 2 и на рисунке 1.

Таблица 2. Спектральные уровни речи для диктора Алена по октавным полосам для слогов, слов и связных текстов

Октавные полосы, Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Слоги, дБ	54,16	65,75	67,25	55,01	48,56	51,05	51,87
Слова, дБ	55,66	66,00	66,94	55,43	48,23	50,98	52,17
Связные тексты, дБ	55,96	66,44	66,67	53,63	47,00	49,74	52,36

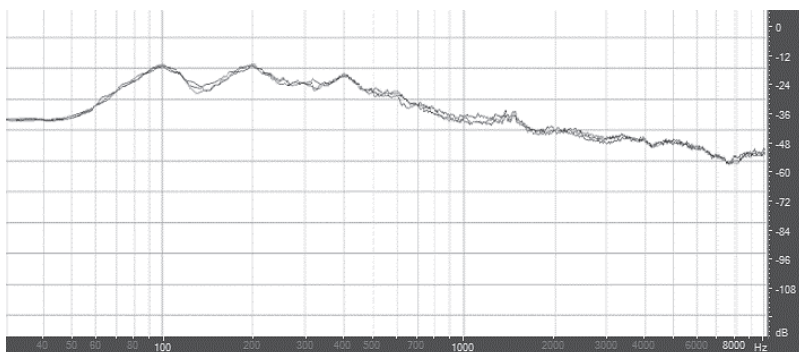


Рис. 1. Спектры речи Алены по слогам, словам и связным текстам

Приведенные результаты показывают, что разница спектров при использовании различных элементов речи составляет примерно 1 дБ.

5. Создание РП-помехи типа «речевой хор». Для создания речевого хора в качестве дикторов использовались компьютерные голоса, записанные с помощью программы-синтезатора Vocalizer. Запись производилась с одинаковой скоростью произношения, громкостью (небольшие расхождения в спектрах были выровнены по общему интегральному уровню) и длительностью в одну минуту (табл. 3). Создание речевого хора осуществлялось путем усреднения мгновенных значений временных реализаций (табл. 3, 4, рис. 2).

Таблица 3. Интегральные уровни спектров речи пяти дикторов

Октавные полосы, Гц	Интегральные уровни спектра речи, дБ				
	Алёна	Юрий	Милена	Катя	Николай
125	55,98	65,70	56,56	65,12	63,61
250	66,06	66,01	67,13	66,47	65,06
500	66,83	62,23	64,81	62,48	63,97
1000	55,53	53,12	59,58	54,86	61,07
2000	48,95	52,59	51,03	51,19	57,83
4000	51,37	52,95	50,99	49,36	48,85
8000	52,56	46,06	53,10	43,13	46,31

Таблица 4. Интегральные уровни в октавных полосах речевого хора с разным количеством дикторов

Октавные полосы, Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Хор из 3 голосов, дБ	63,48	65,77	64,62	56,93	54,52	52,40	51,42
Хор из 5 голосов, дБ	62,27	65,91	65,04	57,63	54,44	53,08	52,12
Хор из 10 голосов, дБ	62,31	65,70	65,07	57,61	55,84	52,58	53,56
Усредненный спектр речи по Покровскому, дБ	53,00	66,00	66,00	61,00	56,00	53,00	49,00

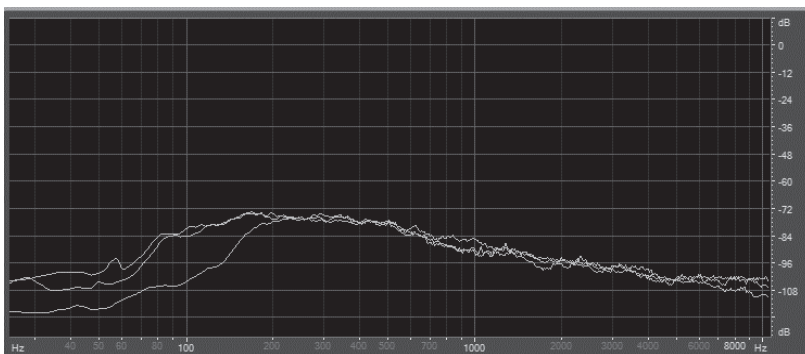


Рис. 2. Спектры речевого хора из 3, 5 и 10 голосов

Из таблицы 4 следует, что увеличение количества голосов в речевом хоре свыше пяти практически не влияет на его спектр и интегральные уровни в октавных полосах (различия около 1 дБ). Вместе с тем, имеются существенные различия октавных уровней в первой и седьмой полосе между спектром речевого хора и усредненным спектром по Покровскому [19] (10 и 4 дБ соответственно). По-видимому, это объясняется различием подходов в получении усредненных спектров. Дело в том, что в работе [19] фактически усреднялись сами спектры конкретных голосов (5 мужских и 5 женских) [19]. Однако такого спектра в природе не существует. На практике происходит суммирование мгновенных значений речевых сигналов (т.е. временных сигналов) на барабанной перепонке уха человека или чувствительном элементе первичных преобразователей – микрофона, акселерометра.

6. Организация артикуляционных испытаний с РП-помехой.

Согласно требованиям ГОСТ [17] испытания проводятся бригадой

операторов, которая включает в себя как дикторов, так и аудиторов в возрасте от 18 до 30 лет, не имеющих явных дефектов речи и слуха. Каждый аудитор во время испытаний заполняет принятые элементы в специальный бланк, после чего для каждого измерения вычисляется среднее значение разборчивости W по формуле (1):

$$W_{cp} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K W_i, \quad (1)$$

где W_i – результат единичного измерения, выраженный в процентах; $K = m * n$ – общее число таблиц, принятых всеми аудиторами; m – число аудиторов; n – число таблиц.

Далее происходит обработка результатов, а именно выявление сомнительных значений W_i , которые отбрасывают и вычисляют новое значение W . Среднеквадратическое отклонение рассчитывают по формуле (2):

$$\sigma_W \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (W_i - W_{cp})^2}. \quad (2)$$

Если $|W_i - W_{cp}| \geq 3\sigma_W$, то данные результаты следует исключить и вычислить повторно по формуле (1) с учетом уменьшенного числа измерений.

При заданном классе качества разборчивости, при обработке результатов измерений используют метод доверительного интервала:

С доверительной вероятностью 95% определяют по формуле (3) нижнюю границу разборчивости:

$$W_n = W_{cp} - C_K \sigma_W, \quad (3)$$

где C_K – коэффициент, учитывающий доверительную вероятность (находится по специальной таблице).

При проведении артикуляционных испытаний в качестве помехи использовался речевой хор из трех голосов, а в качестве сигналов – аудиозаписи четырех дикторов, созданные в программе-синтезаторе Vocalizer:

Диктор 1 – синтезированный женский голос не участвующий в помехе;

Диктор 2 – отрывок из фильма, в котором присутствуют и мужские и женские голоса, отличающиеся по уровню громкости;

Диктор 3 – синтезированный мужской голос, не участвующий в помехе;

Диктор 4 – синтезированный мужской голос, участвующий в помехе.

В аудиоредакторе Adobe Audition путем наложения двух аудиозаписей (РП-помехи и сигнала) были получены аудиозаписи с определенными отношениями сигнал/шум q (-15, -12, -10, -8, -5, -2, 0, 2, 5, 8, 10дБ), после чего группа auditors в составе семи человек прослушала их. В связи с очень большим объемом проведенных артикуляционных испытаний (более 900) ниже в качестве примера представлены результаты испытаний с РП-помехой «речевой хор» на основе таблицы слов для диктора 4 (табл. 5).

Таблица 5. Результаты артикуляционных испытаний для Диктора 4 с помехой типа речевой хор, созданной на основе слов

q, дБ	W _{ауд1}	W _{ауд2}	W _{ауд3}	W _{ауд4}	W _{ауд5}	W _{ауд6}	W _{ауд7}	W _{ср.}
10	0,96	0,96	0,94	0,96	0,82	1,00	0,88	0,93
8	0,96	0,96	0,94	0,90	0,67	0,98	0,77	0,88
5	0,93	0,93	0,91	0,81	0,49	0,89	0,62	0,80
2	0,90	0,87	0,87	0,61	0,16	0,80	0,33	0,65
0	0,74	0,64	0,60	0,52	0,02	0,29	0,09	0,41
-2	0,48	0,44	0,27	0,33	0,00	0,04	0,06	0,23
-5	0,24	0,13	0,09	0,02	0,00	0,02	0,00	0,07
-8	0,09	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
-10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

По усредненным значениям артикуляционных испытаний семи auditors для всех дикторов созданы графики аппроксимаций для РП-помех из слогов и слов, представленные на рисунках 3-6.

Средняя ошибка аппроксимации – среднее отклонение расчетных значений от фактических:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \frac{|y_i - y_x|}{y_i} * 100\%, \quad (4)$$

где y_i – фактические значения; y_x – значения аппроксимирующей функции.

При этом средняя ошибка аппроксимации не определена для нулевых значений. Значение ошибки аппроксимации до 15% свидетельствует о хорошо подобранной модели уравнения.

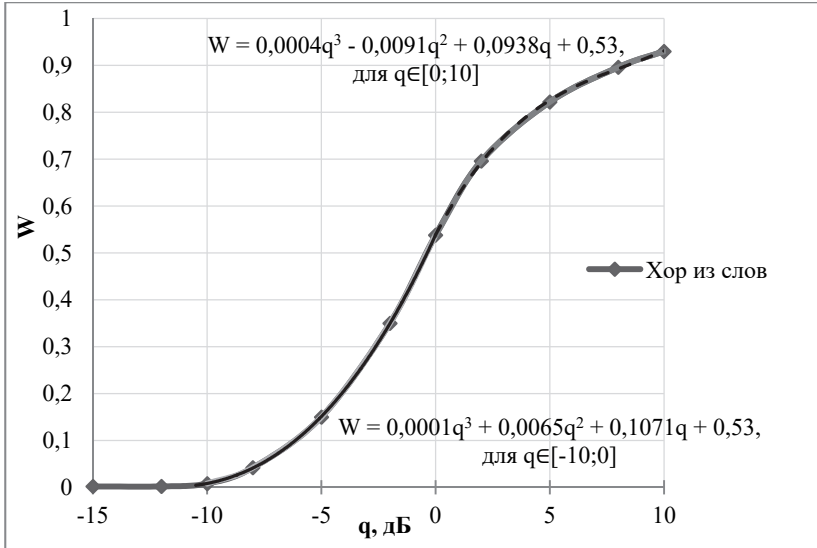


Рис. 3. График аппроксимации для РП помехи из слов

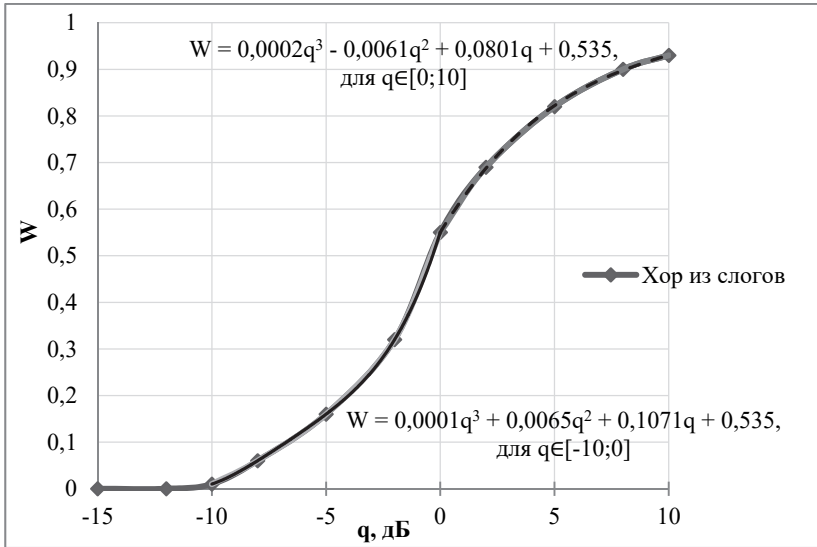


Рис. 4. График аппроксимации для РП помехи из слогов

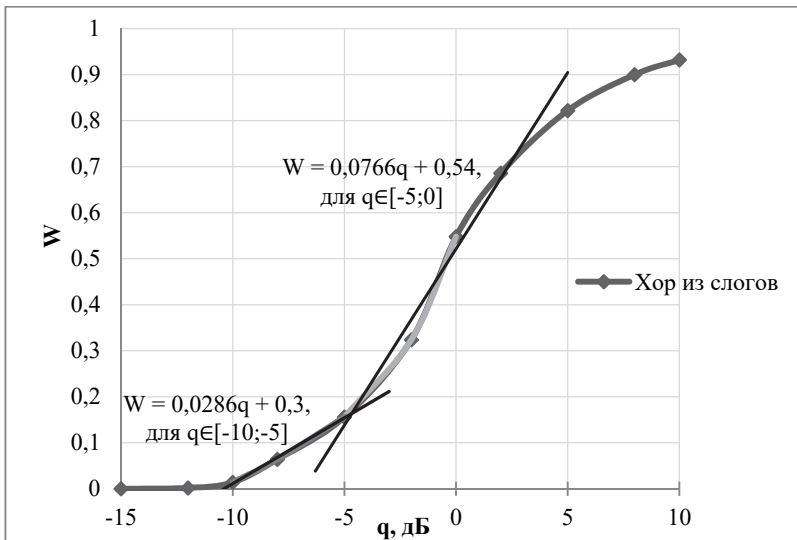


Рис. 5. График составной линейной аппроксимации для РП помехи из слогов

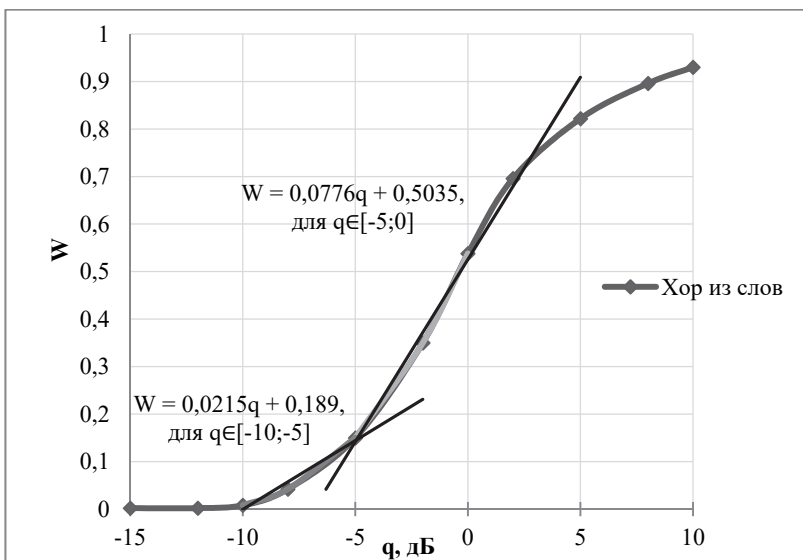


Рис. 6. График составной линейной аппроксимации для РП помехи из слов

Средняя ошибка аппроксимаций графиков 3-6 лежит в пределах 5-10%.

7. Оценка влияния вида элементов речи на разборчивость.

Для проведения такой оценки были построены зависимости разборчи-

ности W от интегрального отношения сигнал/шум q для РП-помех, полученных из различных элементов речи для всех дикторов. Примеры таких графиков приведены на рисунках 7, 8.

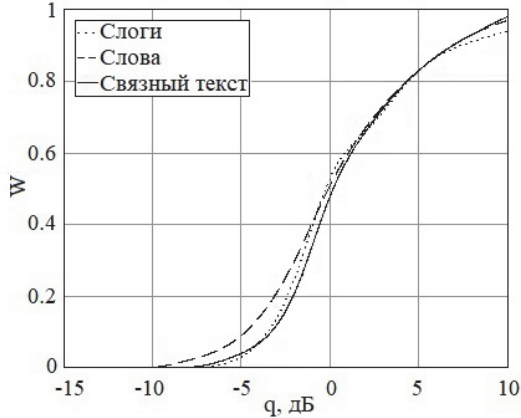


Рис. 7. Зависимость W для синтезированного женского голоса Катя и РП-помехи «речевой хор» по слоговым и словесным таблицам и связным текстам

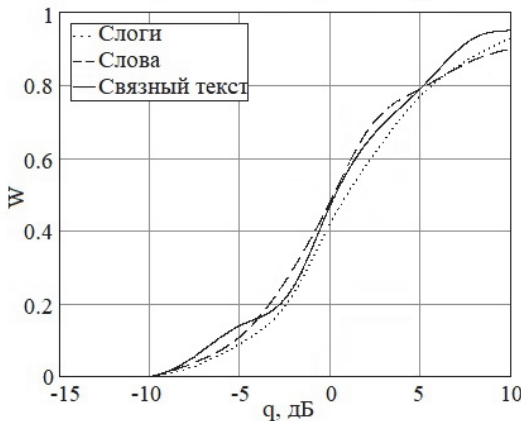


Рис. 8. Зависимость W для синтезированного мужского голоса Николай и РП-помехи «речевой хор» по слоговым и словесным таблицам и связным текстам

Анализ всех полученных зависимостей не выявил значительных различий в разборчивости при использовании РП-помех разного ви-

да (разброс по q не превышает 2-3 дБ). При этом выигрыш в интегральном отношении сигнал/шум по сравнению с помехой «белый шум» [10, 18, 20, 21] составляет 10-15 дБ.

8. Оценка плотности распределения вероятностей синтезированных РП-помех. Важной статистической характеристикой речи является плотность распределения вероятностей ее значений, которая чаще всего аппроксимируется распределениями Лапласа (двойная экспонента) или многочленом третьего порядка по системе экспоненциальных функций [22, 23]. На рисунке 9 для примера приведена экспериментальная плотность вероятностей значений РП-сигнала (слоги), построенная по 10000 отчетам с частотой дискретизации 44,1 кГц [23]. Очевидно визуальное сходство с распределением Лапласа.

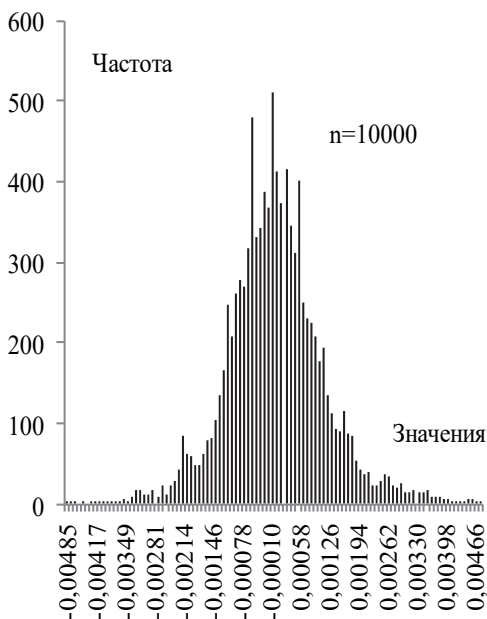


Рис. 9. Частотная гистограмма, построенная по 10000 значений сигнала «слова»

Однако для РП-сигнала (помехи) типа «речевой хор» плотность распределения вероятностей изменяется и при увеличении числа голосов приближается к нормальному закону (рис. 10-12), что естественно согласно центральной предельной теореме.

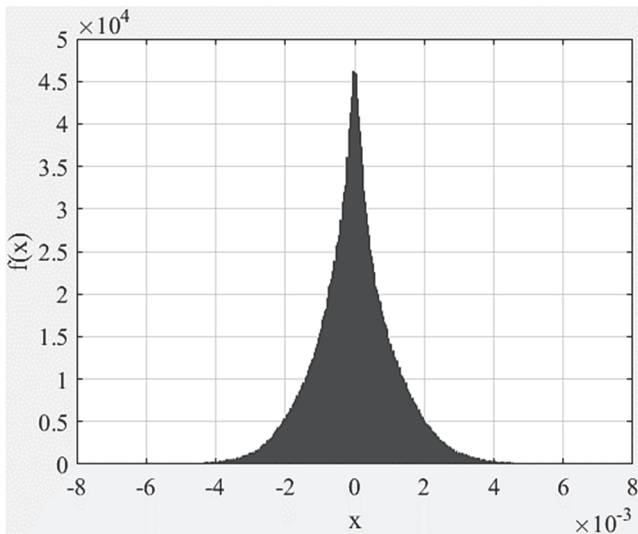


Рис. 10. Гистограмма плотности вероятности речевого хора из 3 голосов

Исходя из результатов сравнения спектров речевого хора для различного числа голосов (табл. 4, рис. 2) наибольший интерес для дальнейшего количественного анализа представляет плотность распределения вероятностей речевого хора из 5 голосов (рис. 11).

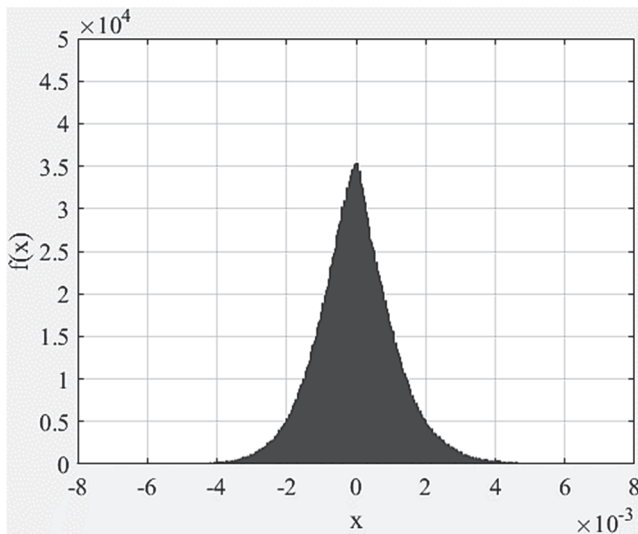


Рис. 11. Гистограмма плотности вероятности речевого хора из 5 голосов

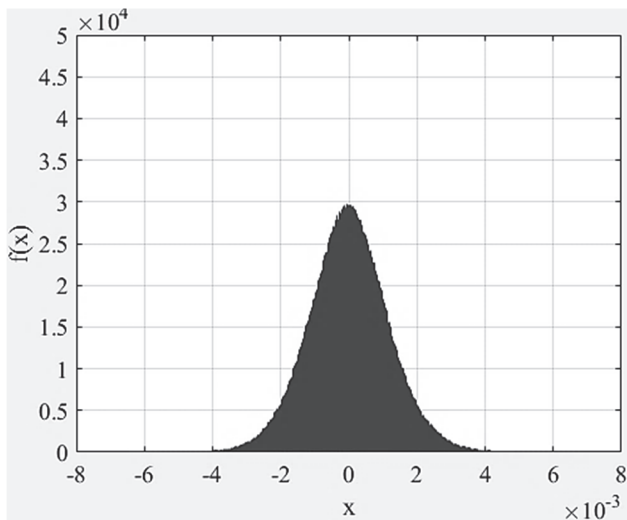


Рис. 12. Гистограмма плотности вероятности речевого хора из 10 голосов

9. Оценка автокорреляционной функции синтезированных РП-помех. На рисунке 13 представлена типичная автокорреляционная функция (АКФ) речевого сигнала в частотном диапазоне 100 Гц-8 кГц, полученная по известному спектру русской речи [19]. При этом интервал корреляции оценивается от 1 мс до 8 мс [24].

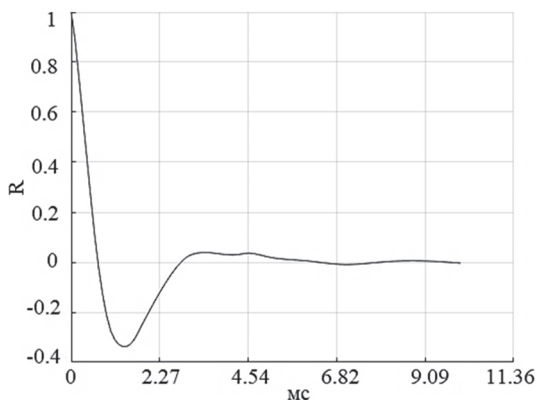


Рис. 13. АКФ русской речи [19]

Для сравнения на рисунке 14-16 приведены графики АКФ РП-сигналов типа «речевой хор» для различного количества голосов (3, 5, 10). Графики построены в среде Matlab с помощью стандартных средств. При этом частота дискретизации аудиозаписей равнялась 44,1 кГц, длина аудиофайла 1 мин., количество отсчетов – 1000.

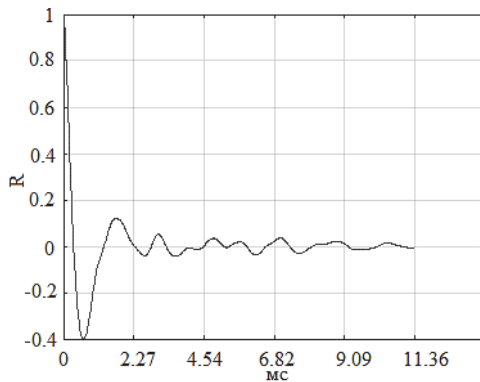


Рис. 14. АКФ речевого хора из 3 голосов

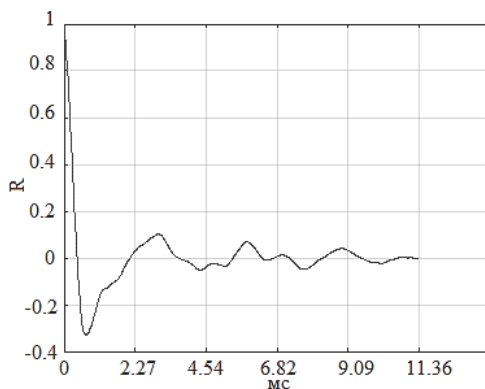


Рис. 15. АКФ речевого хора из 5 голосов

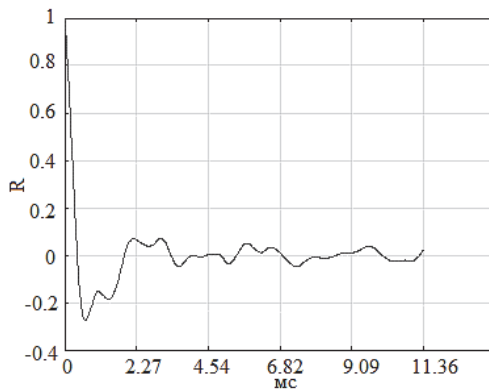
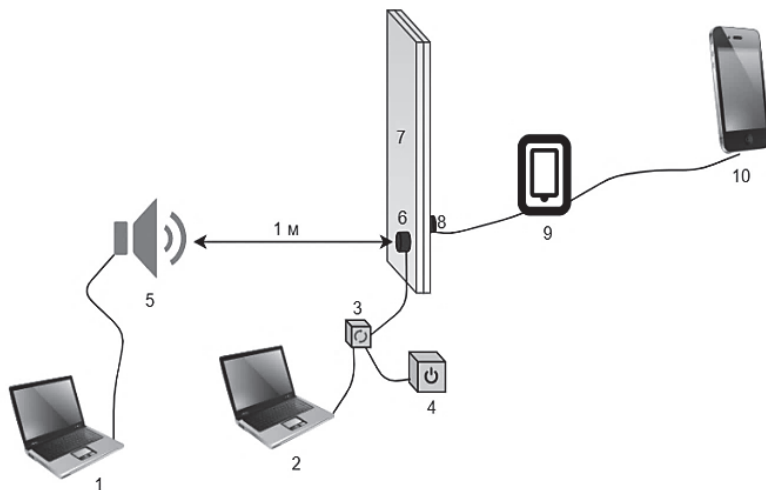


Рис. 16. АКФ речевого хора из 10 голосов

10. Организация и результаты натуральных испытаний на реальном объекте. На рисунках 17, 18 приведен экспериментальный макет, его состав и соответствующая блок-схема. Расположение вибровозбудителей и акселерометров на стекле показано на рисунках 19, 20.



- 1 – Ноутбук с записью переговоров
- 2 – Ноутбук с записанной речеподобной помехой
- 3 – НЧ усилитель звука на TDA2030
- 4 – Блок питания для усилителя
- 5 – Акустоизлучатель “Волна”
- 6 – Вибровозбудитель (электроакустический преобразователь)
- 7 – Двойной стеклопакет
- 8 – Акселерометр тестового устройства AS-4
- 9 – Тестовое устройство AA-012GL
- 10 – Смартфон с диктофоном

Рис. 17. Экспериментальный макет

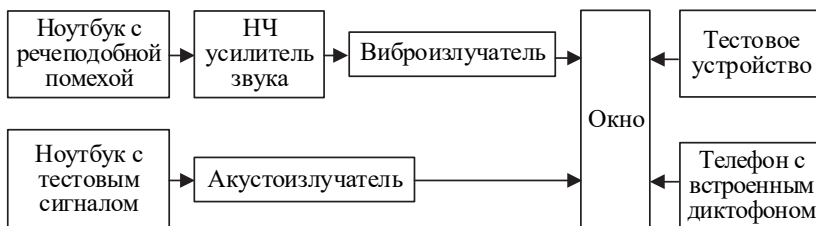


Рис.18. Блок-схема экспериментального макета



Рис. 19. Схема расположения устройств на внутренней стороне стекла

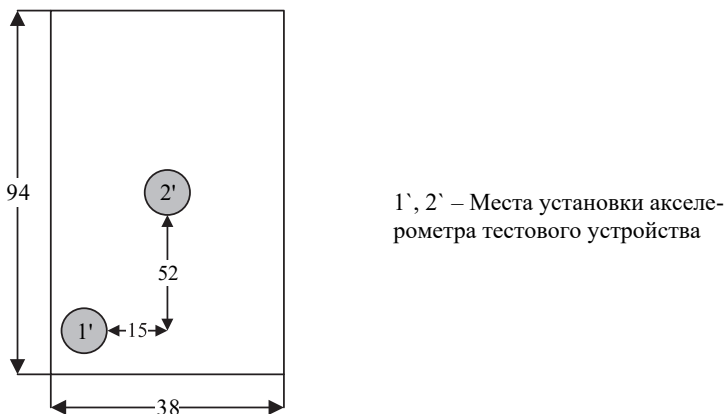


Рис. 20. Схема расположения устройств на внешней стороне стекла

Все измерения и расчеты проводились по общепринятой методике [20] с использованием аттестованного шумомера-виброметра «Октава 110А» (табл. 6).

Таблица 6. Результаты оценки разборчивости речи

Номер КТ		V_c , дБ	V_n , дБ	q , дБ	W
1	Артикуляционные испытания	87,3	97,3	-10	0,00
	Расчет по Покровскому	87,7	97,4	-9,7	0,38
2	Артикуляционные испытания	94,5	96,3	-1,8	0,00
	Расчет по Покровскому	96,0	96,9	-0,9	0,40

Результаты проведенных испытаний подтвердили приведенные выше данные и выводы об эффективности синтезированных РП-помех.

В процессе выполнения данной работы был изготовлен и испытан действующий макет генератора речеподобных помех (ГРП), в котором реализован предложенный принцип формирования РП-помехи. Для упрощения конструкторского решения за основу создания ГРП был взят аудио-модуль mp3, который позволяет подключать выносную microSD карту. На карту памяти предполагается запись уже предварительно подготовленной РП-помехи. Питание генератора осуществляется от сети. Блок-схема устройства показана на рисунке 21.



Рис. 21. Блок-схема макета ГРП

Основные характеристики разработанного ГРП:

- диапазон частот: 175...11200 Гц;
- вид помехи – РП помеха типа «речевой хор» из словесных артикуляционных таблиц;
- время непрерывной работы – 8 часов;
- регулировка уровней помехи – на этапе записи помех.

11. Воздействие РП-помехи на человека. При создании средств активной защиты информации от утечки по техническим каналам, в том числе по акустическим и виброакустическим кана-

лам, разработчики обязаны учитывать возможность их вредного влияния на организм человека. Для средств защиты речевой информации с шумовой помехой регламентирующими документами для разработчиков являются санитарные нормы, основанные на предельно допустимых уровнях (ПДУ) звуковых давлений и времени их воздействия на человека [25]. Вместе с тем у специалистов возникает много вопросов в части выбора ПДУ, времени экспозиции и методов их определения.

Что касается РП-помех, то в доступной литературе не удалось найти никакой информации об их воздействии на человека, кроме работы [20], где говорится: «В процессе экспериментальных исследований также установлено, что по сравнению с шумовыми «речеподобные комбинированные (реверберационные и инверсионные) помехи оказывают значительно меньшее раздражающее воздействие на нервную систему человека» [20].

Проведенная авторами весьма предварительная оценка возможного влияния РП-помех на человека показала, что они имеют место при $W \leq 0,2$. Оценка проведена в соответствии с рисунком 13 для речевого хора из слогов, при трех аудиторах, располагавшихся на расстоянии 2 метров от окна. При отношении «сигнал/помеха» 11 дБ ($W = 0,3$) и 7 дБ ($W = 0,21$) все три аудитора никакого раздражающего воздействия в течение 30 минут не почувствовали; при отношении «сигнал/помеха» - 2,5 дБ ($W = 0,1$) один аудитор (женщина) ощутил некий дискомфорт (не удалось сосредоточиться при чтении текста).

Для объективизации и получения количественной оценки влияния РП-помех на психоэмоциональное состояние человека были проведены эксперименты с использованием тестов Торндайка и Крепелина с участием трех аудиторов – молодых людей в возрасте 22 лет (двое мужчин и одна женщина). Для сравнения был также использован «белый шум».

Длительность эксперимента для каждого вида помех составляла 90 минут; контрольные тестирования проводились перед включением генератора помехи, а также через каждые 30 минут действия помехи. При этом эксперимент проводился в два этапа: на первом испытуемые занимались чтением текста, на втором этапе их внимание было сосредоточено на художественных и документальных видеопрограммах. Анализ результатов эксперимента позволил сделать следующие выводы:

– проведенное тестирование не выявило количественных зависимостей результатов тестирования от вида и продолжительности РП-

помех, более того, у двух испытуемых результаты тестирования после воздействия помех улучшились;

- субъективная оценка испытуемыми своего состояния говорит о повышении утомляемости, появлении раздражительности и головных болях, при этом наименьшее воздействие оказывал «белый шум», наибольшее – РП-помеха «речевой хор» из слоговых артикуляционных таблиц. Негативное влияние из словесных артикуляционных таблиц занимает промежуточное положение, по-видимому, в данной помехе меньше выражен эффект какофонии (т.е. случайных и бессмысленных сочетаний неприятных для слуха звуков);

- уровень негативного влияния помех зависит от характера деятельности испытуемых: существенно меньше при концентрации испытуемых на содержании видеопрограмм.

Был также проведен эксперимент по оценке негативного воздействия модифицированных РП-помех, в которых были «обрезаны» на 5% пики максимальной амплитуды (уменьшения пик-факторов). Результаты данного эксперимента показали значительное уменьшение негативных воздействий на испытуемых, в частности ощущение дискомфорта при воздействии такой помехи на основе словесных таблиц возникает не ранее, чем через час. При этом РП-помехи сохранили свои маскирующие свойства, что подтверждено соответствующими артикуляционными испытаниями (табл. 7). В качестве информативного сигнала использовалась аудиозапись беседы двух мужчин.

Таблица 7. Результаты артикуляционных испытаний

Отношение «сигнал/шум», дБ	W_1		W_2	
	<i>1-е прослушивание</i>	<i>2-е прослушивание</i>	<i>1-е прослушивание</i>	<i>2-е прослушивание</i>
-15	0,000	0,000	0,000	0,000
-12	0,000	0,000	0,000	0,000
-10	0,000	0,000	0,000	0,000
-8	0,009	0,033	0,000	0,007
-5	0,096	0,147	0,121	0,125
-2	0,219	0,252	0,250	0,268
0	0,500	0,542	0,329	0,350

Очевидно, что требуются дополнительные специальные исследования с большим числом испытуемых и контрольных тестов.

12. О расчетно-экспериментальной оценке эффективности средств защиты речевой информации с РП-помехой. В настоящее время для оценки защищенности речевой информации от утечки по акустическим и виброакустическим каналам, а также эффективности активных средств защиты используется расчетно-экспериментальная

методика, основанная на формантном методе Покровского [19, 20], однако данная методика применима только для помехи типа «белый шум». Изменение характеристик классического «белого шума», в частности, создание формантоподобной огибающей приводит к существенным различиям оценки W по методике и артикуляционным испытаниям. Это относится и к РП-помехам. Так в работе [26] отмечается, что при отношении «сигнал/шум» 5 дБ W составляет 11% по артикуляционным испытаниям и 88% по методике, что объясняется, по видимому, тем, что методика не учитывает особенностей восприятия человеком речи в условиях РП-помех.

В данной ситуации возможны два подхода. Первый – коррективировка существующей методики для каждого вида помех, второй – создание универсальной методики, не зависящей от параметров используемых помех (шумов). Естественно, второй подход представляется более перспективным, но в то же время требует дополнительных серьезных исследований. В этой связи в работе [27] предлагается использовать для анализа речевых сигналов подход, соответствующий «парадигме антропоморфической обработки сигналов, согласно которой обработка информации должна строиться на тех же принципах, что и в слуховой системе человека» [27]. В работе [28], посвященной анализу формантного метода оценки разборчивости речи как метода выполнения косвенных измерений, предлагается создание методики, основанной на информационно-измерительной модели периферической слуховой системы человека. Данная модель реализована в среде LabVIEW и проходит экспериментальные исследования.

13. Заключение. Показана возможность создания унифицированной РП-помехи на основе таблиц слогов и слов русского языка из ГОСТ в следующей последовательности:

- осуществляется случайная выборка элементов речи из соответствующей базы;
- из случайной выборки элементов речи создаются звуковые файлы;
- формируется РП-помеха путем усреднения звуковых (т.е. временных) файлов разных голосов.

Показано, что для получения стабильного долговременного спектра речи достаточно аудиосигнала с длительностью 1 минута, при которой разница спектров РП-помехи при различных элементах речи (слов и слогов) не превышает 1дБ; при этом полученные спектры соответствуют спектру связного текста. Созданная путем усреднения звуковых файлов разных голосов РП-помеха типа «речевой хор» имеет

спектр, который практически не изменяется (± 1 дБ) при увеличении числа голосов больше пяти.

Проведены репрезентативные артикуляционные испытания по оценке разборчивости речи для разных видов РП-помехи типа «речевой хор» согласно требованиям действующих ГОСТ, которые показали снижение интегрального отношения «сигнал/шум» в среднем на 10-15 дБ.

Оценка плотности вероятности значений РП-помех показала, что при увеличении числа усредняемых голосов, она изменяется и стремится к нормальному закону распределения в отличие от плотности речевого сигнала, которая соответствует распределению Лапласа. Оценка АКФ РП-помехи «речевой хор» показала ее схожесть с АКФ реального речевого сигнала. Натурные испытания эффективности РП-помех на реальном объекте подтвердили справедливость полученных результатов.

Представлены результаты предварительных исследований по оценке влияния РП-помех на психоэмоциональное состояние человека и возможности его уменьшения. Поставлен вопрос о необходимости создания универсальной методики оценки эффективности средств активной защиты речевой информации, независимой от вида и характеристик используемых помех.

Авторы выражают благодарность студентам кафедры защиты информации НГТУ-НЭТИ А. И. Заводовской, И. А. Овешникову и Э. В. Топорищеву за проведение экспериментальных исследований по оценке влияния РП-помех на психоэмоциональное состояние человека в рамках выполнения бакалаврских ВКР.

Литература

1. Трушин В.А., Иванов А.В. Возможности снижения интегрального уровня помехи в средствах активной защиты информации речевой информации (состояние и перспективы) // Доклады ТУСУР. 2018. Т. 21. № 2. С. 38–42.
2. Алодишина И., Прутиц Р. Музыкальная акустика // СПб.: Композитор. 2006. 720 с.
3. Blintsov V., Nuzhniy S., Kasianov Y., Korytskyi V. Development of a mathematical model of scrambler-type speech-like interference generator for system of prevent speech information from leaking via acoustic and vibration channels // Technology audit and production reserves. 2019. vol. 5. no. 2(49). pp. 19–26.
4. Davydau H.V. et al. Method for protecting speech information // Doklady BGUIR. 2015. vol. 8(94). pp. 107–110.
5. Blintsov V., Nuzhniy S., Parkhuts L., Kasianov Y. The objectified procedure and a technology for assessing the state of complex noise speech information protection // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. vol 5. no. 9(95). pp. 26–34.
6. Ахатаева С.М. и др. Способ формирования речеподобного помехового сигнала // Патент Республики Казахстан №26413. 2012. Бюл. 11.
7. Воробьев В.И., Давыдов А.Г., Давыдов Г.В. Речеподобные сигналы: разновидности, основные параметры, способы формирования, области применения // Минск: Доклады БГУИР. 2009. №3. С. 9-16.
8. Зельманский О.Б. Методика синтеза речеподобных сигналов на разных языках для систем защиты информации // Информационные системы и технологии. 2012. № 4. С. 122–133.

9. *Гордиевич П., Средяк В., Омельчук Я., Порошин И.* Формирование защитной речеподобной помехи путем генерации фонемных последовательностей // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення захисту інформації. 2009. С. 129–132.
10. *Horev A.A., Tsarev N.V.* The method and algorithm of speech-like noise formation // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2017. pp. 419–422.
11. *Трушин В.А., Попов Д.Е., Кунгуров М.А., Марченко Д.Л.* Создание речеподобной помехи на основе связанных текстов // Проблемы правовой и технической защиты информации. 2018. Вып. 6. С. 79–85.
12. *Асяев Г.Д., Антясов И.С.* Оценка эффективности применения шумовых «речеподобных» помех для защиты акустической информации // Вестник УрФО 2018. № 2(28). С. 19–24.
13. *Mostafa T. et al.* An efficient speech generative model based on deterministic/stochastic separation of spectral envelopes // Doklady BGUIR. 2020. vol. 18(2). pp. 23–29.
14. *Yerzhan N. et al.* Intelligibility of the kazakh speech when it's PROTECTED with combined masking signals // Doklady BGUIR. 2015. vol. 8(94). pp. 67–73.
15. *Koul R.K., Allen G.D.* Segmental intelligibility and speech interference thresholds of high-quality synthetic speech // Journal of speech & hearing research, American Speech-Language-Hearing Association. 1993. vol. 36. no. 4. pp. 790–798.
16. ITU-T P.501 Test signals for use in telephony/ Series P: Telephone Transmission Quality. Objective measuring apparatus. 2004. pp. 27.
17. ГОСТ 16600-72. Межгосударственный стандарт. Передача речи по трактам радиотелефонной связи. Требования к разборчивости речи и методы артикуляционных измерений // М.: Стандарт Информ. 2007. 74 с.
18. *Трушин В.А., Рева И.Л., Иванов А.В.* Усовершенствованная методика оценки разборчивости речи в задачах защиты информации // Ползуновский вестник. 2012. №3/2. С. 238–241.
19. *Покровский Н.Б.* Расчет и измерение разборчивости речи // М.: Связь-издат. 1962.
20. *Хорев А.А., Макаров Ю.К.* К оценке эффективности защиты акустической (речевой) информации // Специальная техника. 2000. № 5. С. 46–56.
21. *Авдеев В.Б.* О некоторых направлениях совершенствования методических подходов, применяемых при оценке эффективности технической защиты информации // Специальная техника. 2013. № 3. С. 26–36.
22. *Trushin V.A., Khitsenko V.E.* About the methods of forming a test signal in the instrumental evaluation // Journal of Physics: Conference Series of speaker clearance. 2020.
23. *Кронотов Ю.А.* Модель одномерной плотности вероятности речевых сигналов // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 4. С. 158–170.
24. *Быков А.А., Кронотов Ю.А.* Исследование автокорреляционных функций речевых сигналов // Радиотехника. 2008. № 9. С. 107–111.
25. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки // Санитарные нормы. М.: Минздрав России. 1996.
26. *Хорев А.А., Царев Н.В.* Способ и алгоритм формирования речеподобной помехи // Вестник ВГУ, серия: Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 1. С. 57–67.
27. *Вашкевич М.И., Азаров И.С.* Определение патологии голосового аппарата человека на основе анализа модуляционного спектра речи в критических полосах // Труды СПИИРАН. 2020. Т. 19(2). С. 249–276.
28. *Trushin V.A.* The analysis of the formant method of speech intelligibility estimation as a method of performing indirect measurements // Научный вестник НГТУ. 2019. № 4 С. 135–146.

Авдеев Владимир Борисович — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю» (ФАУ «ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России»). Область научных интересов: техническая защита информации. Число научных публикаций — 166. avb1952@mail.ru; ул. 9 Января, 280А, 394020, Воронеж, Россия; р.т.: +7-903-653-55-20.

Трушин Виктор Александрович — канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, кафедра защиты информации, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ); ведущий инженер, ФГУП «НТЦ «Атлас». Область научных интересов: техническая защита информации. Число научных публикаций — 162. gastr89@mail.ru; пр. Карла Маркса, 20, 630092, Новосибирск, Россия; р.т.: +7-903-900-19-82.

Кунгуров Михаил Александрович — магистрант, кафедра защиты информации, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ); инженер, ФГУП «НТЦ «Атлас». Область научных интересов: техническая защита информации. Число научных публикаций — 1. mixailekurgurov@gmail.com; пр. Карла Маркса, 20, 630092, Новосибирск, Россия; р.т.: +7-996-381-12-97.

V. AVDEEV, V. TRUSHIN, M. KUNGUROV
UNIFIED SPEECH-LIKE INTERFERENCE FOR ACTIVE PROTECTION OF SPEECH INFORMATION

Avdeev V., Trushin V., Kungurov M. Unified Speech-Like Interference for Active Protection of Speech Information.

Abstract. The paper considers the possibility of creating a speech-like interference for the means of vibro-acoustic protection of speech information based on tables of syllables and words of the Russian language. The choice of research directions and experimental conditions is substantiated: synthesis of sound files by random sampling of speech elements from a database, research of spectra of synthesized noise, algorithm for creating interference of the "speech choir" type, study of autocorrelation functions of synthesized speech-like interference, as well as their probability distribution density. It is shown that the spectral and statistical characteristics of the synthesized speech-like interference type "speech choir" of five voices are close to similar characteristics of real speech signals. At the same time, the speech choir was formed by averaging the instantaneous values of temporary realizations of sound files. It is shown that the spectral power density of the speech-like interference of the "speech choir" type practically is not changed with the number of averaged "voices" starting from five. The probability density distribution of the speech-like interference value with an increase in the number of voices in the "speech choir" approaches the normal law (unlike a real speech signal whose probability density is close to the Laplace distribution). Evaluation of the autocorrelation function gave a correlation interval of several milliseconds. The articulation tests of speech intelligibility using synthesized speech-like interference with different signal-to-noise ratios showed the possibility of reducing the integral noise level by 12-15 dB compared to noise-like interference. The dependencies of verbal intelligibility on the integral signal-to-noise ratio are constructed on the basis of polynomial and piecewise linear approximations. A preliminary assessment of a possible impact of speech-like interference on the psycho-emotional state of a person was performed. The direction of further research on increasing the efficiency of algorithms for generating speech-like interference is discussed.

Keywords: Protection of Speech Information, Speech Intelligibility, Unified Speech-Like Interference, Base Syllables and Words, Power Spectral Density, Probability Density Distribution, Autocorrelation Function, Articulation Tests

Avdeev Vladimir — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Chief Researcher, Federal Autonomous Institution "State Research and Testing Institute for the Problems of Technical Protection of Information of the Federal Service for Technical and Export Control ("FAI "GNII PTZI FSTEC of Russia"). Research interests: technical information protection. The number of publications — 166. avb1952@mail.ru; 280A, str. January 9, 394020, Voronezh, Russia; office phone: +7-903-653-55-20.

Trushin Viktor — Ph.D., Associate Professor, Senior Researcher, Department of Information Security, Novosibirsk State Technical University (NSTU); Leading Engineer, FSUE STC "Atlas". Research interests: technical information protection. The number of publications — 162. rastr89@mail.ru; 20, pr. Karla Marksa, 630092, Novosibirsk, Russia; office phone: +7-903-900-19-82.

Kungurov Mihail — Master's Student, Department of Information Security, Novosibirsk State Technical University (NSTU); Engineer, FSUE STC "Atlas". Research interests: technical information protection. The number of publications — 1. mixailkungurov@gmail.com; 20, pr. Karla Marksa, 630092, Novosibirsk, Russia; office phone: +7-996-381-12-97.

References

1. Trushin V.A., Ivanov A.V. [Possibilities of reducing the integral level of interference in the means of active protection of voice information information (state and prospects)] *Doklady TUSUR – TUSUR reports*. 2018. Issue 21. vol. 2. pp. 38–42. (In Russ.).
2. Aldoshina I., Prite R. *Muzykal'naja akustika* [Musical acoustics]. SPb: Compozitor. 2006. 720 p. (In Russ.).
3. Blintsov V., Nuzhnyi S., Kasianov Y., Korytskyi V. Development of a mathematical model of scrambler-type speech-like interference generator for system of prevent speech information from leaking via acoustic and vibration channels. *Technology audit and production reserves*. 2019. vol. 5. no. 2(49). pp. 19–26.
4. Davydau H.V. et al. Method for protecting speech information. *Doklady BGUIR*. 2015. vol. 8(94). pp. 107–110.
5. Blintsov V., Nuzhnyi S., Parkhuts L., Kasianov Y. The objectified procedure and a technology for assessing the state of complex noise speech information protection. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. vol 5. no. 9(95). pp. 26–34.
6. Ahataeva S.M. et al. [The method of forming a speech-like interfering signal]. Patent of the Republic of Kazakhstan no. 26413. 2012. bul. 11.
7. Vorob'ev V.I., Davydov A.G., Davydov G.V. [Speech-like signals: varieties, basic parameters, methods of formation, fields of application]. *Doklady BGUIR – BSUIR reports*. 2009. vol. 3. pp. 9–16. (In Russ.).
8. Zel'manskij O.B. [Synthesis technique of speech-like signals in different languages for information protection systems]. *Informacionnye sistemy i tekhnologii – Information systems and technologies*. 2012. vol. 4. pp. 122–133. (In Russ.).
9. Gordievich P., Sredjak V., Omel'chuk Ja., PoroshinI. [The formation of protective speech-like interference by generating phonemic sequences]. *Pravove, normative ta metrologichne zabespecheniya zahistu informaciiiv – Legal, normative and metrological support of information protection in*. 2009. pp. 129–132. (In Russ.).
10. Horev A.A, Tsarev N.V. The method and algorithm of speech-like noise formation // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2017. pp. 419–422.
11. Trushin V.A., Popov D.E., Kungurov M.A., Marchenko D.L. [Speech-like interference based on coherent texts]. *Problemy pravovoj i tehniczeskoj zashhity informacii – Problems of legal and technical protection of information*. 2018. pp. 79–85. (In Russ.).
12. Asjaev G.D., Antjasov I.S. [Evaluation of the effectiveness of the use of noise "speech-like" interference to protect acoustic information] *Vestnik UrFO – Bulletin of the Ural Federal District*. 2018. vol. 2(28). pp. 19–24. (In Russ.).
13. Mostafa T. et al. An efficient speech generative model based on deterministic/stochastic separation of spectral envelopes. *Doklady BGUIR*. 2020. vol. 18(2). pp. 23–29.
14. Yerzhan N. et al. Intelligibility of the kazakh speechwhen it's PROTECTED with combined masking signals. *Doklady BGUIR*. 2015. vol. 8(94). pp. 67–73.
15. Koul R.K., Allen G.D. Segmental intelligibility and speech interference thresholds of high-quality synthetic speech. *Journal of speech & hearing research, American Speech-Language-Hearing Association*. 1993. vol. 36. no. 4. pp. 790–798.
16. ITU-T P.501 [Test signals for use in telephonometry] Series P: Telephone Transmission Quality. Objective measuring apparatus. 2004. 27 p.
17. GOST 16600-72. [Interstate standard. Voice transmission to radiotelephone communications. Speech intelligibility requirements and articulatory measurement methods] M.: Standart Inform. 2007. 74 p. (In Russ.).

18. Trushin V.A., Reva I.L., Ivanov A.V. [Improved method for assessing speech intelligibility in information security tasks]. *Polzunovskijvestnik – Polzunovskiy Bulletin*. 2012. vol. 3/2. pp. 238–241. (In Russ.).
19. Pokrovskii N.B. Raschet i izmerenie razborchivosti rechi [Calculation and measurement of speech intelligibility]. M.: Svjaz'-izdat. 1962. (In Russ.).
20. Horev A.A., Makarov Ju.K. [To assess the effectiveness of protection of acoustic (speech) information]. *Special'naja tehnika – Special equipment*. 2000. vol. 5. pp. 46–56. (In Russ.).
21. Avdeev V.B. [On some areas of improving the methodological approaches used in assessing the effectiveness of technical protection of information]. *Special'naja tehnika – Special equipment*. 2013. vol. 3. pp. 26–36. (In Russ.).
22. Trushin V.A., Khitsenko V.E. About the methods of forming a test signal in the instrumental evaluation. *Journal of Physics: Conference Series of speaker clearance*. 2020.
23. Kropotov Ju.A. [Model of one-dimensional probability density of speech signals]. *Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti – Management, communication and security systems*. 2015. vol. 4. pp. 158–170. (In Russ.).
24. Bykov A.A., Kropotov Ju.A. [The study of autocorrelation functions of speech signals]. *Radiotekhnika – Radiotechnics*. 2008. vol. 9. pp. 107–111. (In Russ.).
25. Sanitary standards 2.2.4/2.1.8.562-96. [Noise at workplaces, in the premises of residential, public buildings and in residential areas] *Sanitarnye normy*. M.: Minzdrav Rossii. 1996. (In Russ.).
26. Horev A.A., Carev N.V. [Method and algorithm for the formation of speech-like noise]. *Vestnik VGU – VSU Bulletin, ser. Systems analysis and information technology*. 2017. vol. 1. pp. 57–67. (In Russ.).
27. Vashkevich M.I., Azarov I.S. [Determination of the pathology of the human vocal apparatus based on the analysis of the modulation spectrum of speech in critical bands] *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2020. Issue 19(2). pp. 249–276. (In Russ.).
28. Trushin V.A. [The analysis of the formant method of speech intelligibility estimation as a method of performing indirect measurements] *Nauchnyj vestnik NGTU – Science Bulletin of the NSTU*. 2019. vol. 4. pp. 135–146. (In Russ.).