

3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – М.: Машгиз, 1962. – 368 с.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с.
5. Лыков А.В. и Михайлов Ю.А. Теория тепло-и массопереноса. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 389с.
6. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло-и массообмена. - М.: Госэнергоиздат, 1962. – 562 с.
7. Вайнберг А.М. Математическое моделирование процессов переноса. Решение нелинейных краевых задач. – Москва-Иерусалим, 2009. – 210 с.
8. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетики. – М.: Наука, 1987. - 502.
9. Стенцель Й.І. Фотокolorиметричні газоаналізатори. Монографія. – К.: ІСДО. 1995. – 126 с.
10. Стенцель Й.І., Томсон А.В., Рябіченко А.В. Математичні моделі ультразвукових рівнемірів рідин. МНТЖ „Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. –Хмельницький, 2006. №2 (28). – с.55-58.
11. Стенцель Й.І. Математичне моделювання хімічних процесів на основі теорії реологічних переходів. Вісник Східноук. нац університету. Науковий збірник. №5 (111), Ч.2.- 2007. – с.91-97.

References

1. Remizov A.N. Medicinskaja i biologicheskaja fizika. – М.: Vysshaja shkola. – 1987. – 638 s.
2. Berd R., St'juart V., Lajftut E. Javljenija perenosa. – М.: Hmija, 1974. – 688 s.
3. Kutateladze S.S. Osnovy teorii teploobmena. – М.: Mashgiz, 1962. – 368 s.
4. Lykov A.V. Teorija teploprovodnosti. – М.: Vyssh. shk., 1967. – 599 s.
5. Lykov A.V. i Mihajlov Ju.A. Teorija teplo-i massoperenosa. – М.: Gosjenergoizdat, 1963. – 389s.
6. Jekkert Je.R., Drejk R.M. Teorija teplo-i massoobmena. - М.: Gosjenergoizdat, 1962. – 562 s.
7. Vajnberg A.M. Matematicheskoe modelirovanie processov perenosa. Reshenie nelinejnyh kraevyh zadach. – Moskva-Ierusalim, 2009. – 210 s.
8. Frank-Kameneckij D.A. Diffuzija i teploperedacha v himicheskoj kinetiki. – М.: Nauka, 1987. -502.
9. Stencil' J.I. Fotokolorimetriczni gazoanalizatori. Monografija. – К.: ISDO. 1995. – 126 s.
10. Stencil' J.I., Tomson A.V., Rjabichenko A.V. Matematichni modeli ul'trazvukovih rivnemiriv ridin. MNTZh „Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah. –Hmel'nic'kij, 2006. №2 (28). – s.55-58.
11. Stencil' J.I. Matematichne modeljuvanja himichnih procesiv na osnovi teorii reologichnih perehodiv. Visnik Shidnouk. nac universitetu. Naukovij zbirnik. №5 (111), Ch.2.- 2007. – s.91-97.

Рецензія/Peer review : 20.7.2013 р.

Надрукована/Printed :31.10.2013 р.

Рецензент:

УДК 621.395.623.7

Н.Н. СУЛИМА, И.С. ПЕРЕКРЁСТОВ

Одесская национальная академия связи им. А.С.Попова

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В МЕТОДАХ СЛУХОВОГО ПРОТЕЗИРОВАНИЯ

Рассматриваются теоретические особенности и практические аспекты реализации частотного транспонирования в задачах лечения сенсоневральной тугоухости. Показаны возможности организации частотного транспонирования методами сдвига коэффициентов Фурье-образа и преобразованием Гильберта, являющиеся менее ресурсоемкими в сравнении с однополосной модуляцией. Рассмотрен способ разработки аппаратных процессорных устройств с помощью модельно-ориентированного проектирования. Изучены возможности повышения качества звучания слуховых аппаратов с помощью электромеханической обратной связи.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, тугоухость.

N.N. SULIMA, I.S. PEREKRJOSTOV

Odessa National A.S. Popov Academy of Telecommunications

DIGITAL SIGNAL PROCESSING AND MOTIONAL FEEDBACK IN THE METHODS OF HEARING PROSTHETICS

Abstract — The theoretical characteristics and practical aspects of implementation of the transposition of frequency in the treatment of sensorineural hearing loss problems are considered. The possibility of the transposition of frequency with shifting of the Fourier transform and the Hilbert transform are showing. These methods are less demanding in comparison with method of single-sideband modulation. A method for development of hardware units using model-based design is investigated. Improving the sound quality of hearing aids with motional feedback is proposed.

Keywords: digital signal processing, hearing loss.

Введение

Применение частотного транспонирования спектра в задачах слухового протезирования предложено и реализовано в работах [1, 2], в которых, однако, дано неполное теоретическое обоснование метода, и проанализированы далеко не все варианты его практической реализации.

Не умаляя достижений авторов, проверивших и доказавших на практике положительное влияние частотного транспонирования, данная работа призвана в какой-то мере ликвидировать имеющиеся пробелы, подвести теоретические основания под суть метода, обосновать полученные на практике результаты и указать более эффективные пути реализации частотного транспонирования с учётом современных достижений в области систем автоматического проектирования (САПР) и цифровой обработки сигналов.

Отдельной задачей стоит анализ возможностей повышения эффективности звуковых излучателей в слуховых аппаратах путём расширения частотного диапазона и снижения искажений с помощью электромеханической обратной связи.

Обзор проблемы и принятых методов её решения

Нейросенсорная (сенсоневральная) тугоухость, выражающаяся потерей слуха разной степени, может быть обусловлена целым рядом причин, начиная от врождённых пороков, разного рода травм, и заканчивая возрастными изменениями и последствиями инфекционных заболеваний или медикаментозных лечений [3].

Разновидность сенсоневральной тугоухости (СНТ), обусловленная дефектами или поражением нервных окончаний во внутреннем ухе, приводит, согласно международной классификации, к общему снижению уровня слуха от 26 дБ (I степень) до 90 дБ (IV степень) [4]. Очевидно, что снижению слуха в этих случаях способствует полная или частичная дегенерация (падение чувствительности) волосковых клеток Кортиевого органа.

Слуховое протезирование позволяет частично устранить последствия СНТ путём использования слуховых аппаратов (СА), которые по принципу действия можно разделить на две различные функциональные группы:

1. СА, осуществляющие линейное усиление в рабочем диапазоне частот, и доводящие уровень сигнала до вызывающих слуховые ощущения значений. Основным недостатком таких аппаратов является возможность перегрузки слуховой системы избыточным звуковым давлением при неравномерной потери чувствительности, и, как следствие, дискомфорт либо невозможность восприятия требуемой информации.

2. СА с динамической компрессией, осуществляющие адаптируемое усиление звуков с учётом индивидуальных особенностей слуха пациента.

Аппараты второй группы являются более перспективными, а в основе их работы лежит цифровая обработка звуковых сигналов по специально разработанным для задач отоларингологии алгоритмам компрессии. Динамическая компрессия может быть однодиапазонной (High Level Compression, HLC) и представлять собой автоматическую регулировку усиления (APУ), либо многодиапазонной (Wide Dynamic Range Compression, WDRC и Extended Dynamic Range Compression, EDRC), при которой рабочий диапазон делится на поддиапазоны, в которых осуществляется индивидуальная APУ [5].

Постановка задачи, гипотеза и теоретические предпосылки для её доказательства

Как известно, внутренне ухо осуществляет частотно-координатное преобразование поступающих звуковых колебаний, иными словами колебания определённых частот вызывают максимумы колебаний определённых участков базилярной мембраны, действующей на группы волосковых клеток (рис.1) [6].

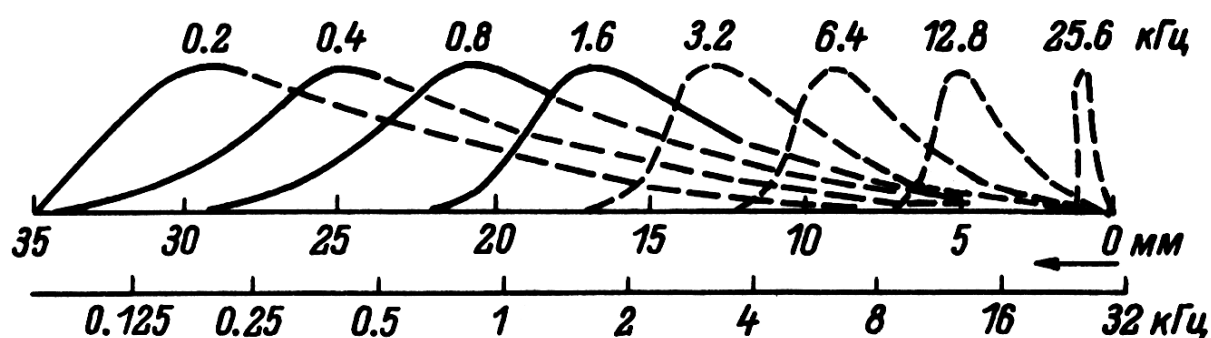


Рис. 1. Распределение максимальных амплитуд колебаний по длине улитковой перегородки человека для разных частот [7]

Большое количество волосковых клеток, расположенных вдоль базилярной мембраны, позволяет предполагать возможность наличия у пациентов с СНТ менее повреждённых участков, при этом каждый такой участок отвечает за восприятие определённого частотного диапазона звуковых сигналов. Очевидная возможность улучшить слуховое восприятие пациентов состоит в эффективном использовании таких участков мембраны, что обеспечивается частотным переносом (транспонированием) спектра акустического сигнала.

Не смотря на то, что при частотном транспонировании абсолютные значения частот спектральных составляющих изменяются, экспериментами подтверждается сохранение неизменными принципиальных особенностей тембра [8]. Обеспечению сохранения признаков тембра способствует неизменность огибающей транспонируемого спектра, что, очевидно, в некоторой степени позволит обеспечить узнаваемость воспринимаемых звуков и речи [9].

Общеизвестно, что большому падению чувствительности подвержены области внутреннего уха, отвечающие за восприятие высоких частот, таким образом, очевидна необходимость транспонирования спектра скорее вниз по частоте [10].

Особенности практической реализации частотного транспонирования

Реализация частотного транспонирования возможна на основании известных алгоритмов цифровой обработки сигналов. Следует отметить, что алгоритм транспонирования спектра может существенно отличаться в зависимости от ширины полосы исходного сигнала, выбранной частоты дискретизации f_d , величины требуемого частотного сдвига Δ . Очевидный алгоритм транспонирования в виде амплитудной модуляции и высокочастотной фильтрации нижней боковой полосы и несущей в цифровом виде является ресурсоёмким. С другой стороны, анализ спектров цифрового сигнала смещённого по частоте, показывает достаточные условия для транспонирования спектра в пределах $\pm f_d / 2$ на величину произвольного сдвига $|\Delta| < f_d / 2$ [11]. Часть спектра исходного сигнала, лежащую в пределах $(0 - f_d / 2)$, необходимо сместить в сторону, определяемую знаком желаемого частотного сдвига Δ при одновременном смещении в противоположную сторону той части исходного спектра, которая располагается в пределах $(f_d / 2.. f_d)$ (рис.2).

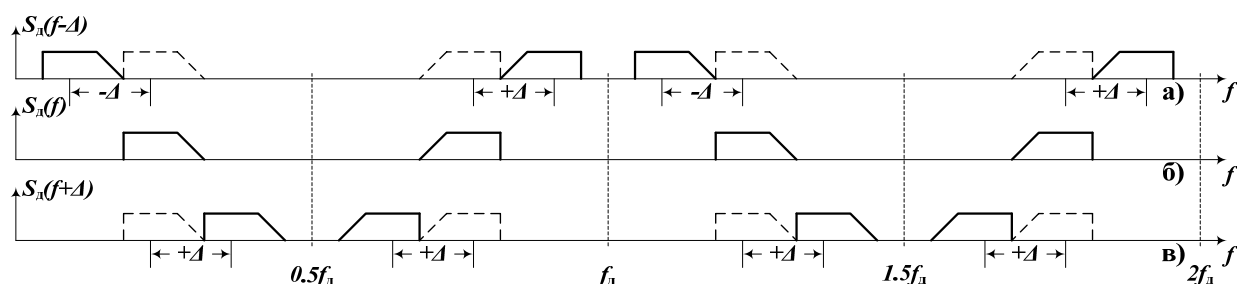


Рис. 2. Структура спектра цифрового сигнала:
а) транспонированного вниз; б) исходного; в) транспонированного вверх.

Реализовать указанный алгоритм можно как во временной области при помощи преобразователя Гильберта и квадратурной обработки, так и в частотной области сдвигом отсчётов дискретного преобразования Фурье (рис.3).

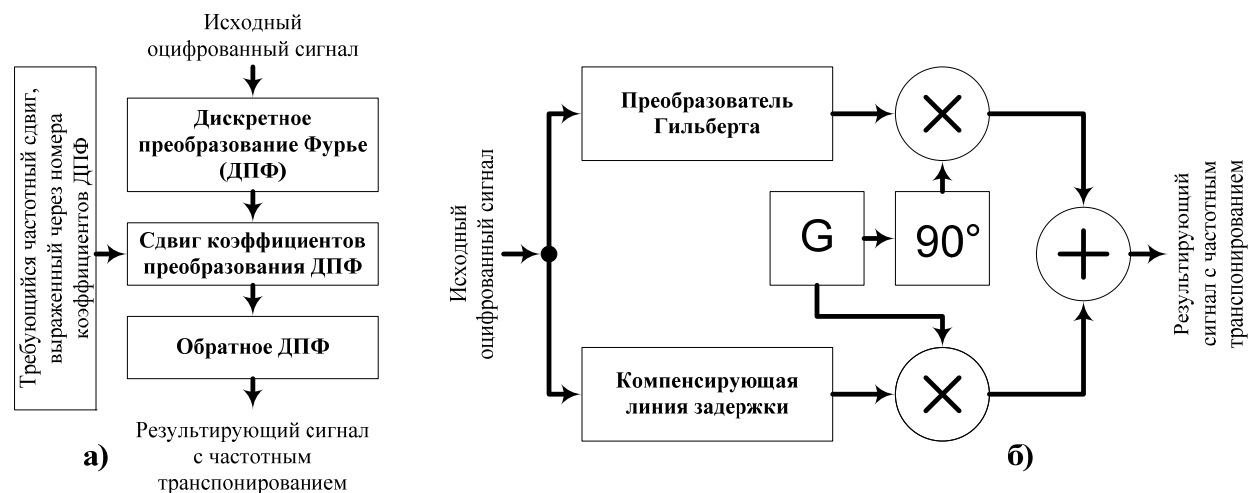


Рис. 3. Возможные методы частотного транспонирования спектра цифрового сигнала:
а) с помощью сдвигов коэффициентов преобразования Фурье; б) с помощью преобразования Гильберта

В современной цифровой обработке сигналов наметилась прочная тенденция интеграции с микроконтроллерами и сигнальными микропроцессорами в единую систему модельно-ориентированного проектирования, позволяющую ускорить изготовление конечного устройства, однако, в силу дороговизны таких систем, в отечественной науке и технике их применение ограничено. Бюджетную, но не менее эффективную, систему для решения как поставленной выше так и множества других задач, можно построить с использованием САПР Simulink® и 32-разрядных ARM-процессоров [12]. Модельно-ориентированное проектирование в такой среде осуществляется следующим образом:

1. В Simulink® создаётся и проходит отладку модель требуемой системы управления.
2. Специальный набор инструментов RapidSTM32®, встраиваемый в Simulink®, обеспечивает моделирование интерфейса поддерживаемых ARM-процессоров и позволяет генерировать готовый для импортирования программный код.
3. На основании полученного Си-кода с помощью набора утилит по разработке (IDE Keil® µVision4®) в автоматическом режиме создаётся программное обеспечение (исполняемый

шестнадцатеричный код внутренней микропрограммы), управляющее работой ARM-процессора в составе одного из поддерживаемых аппаратных модулей (32-разрядный, 24-мегагерцовый ARM-процессор STM32F100RB в составе бюджетного модуля stm32VLDiscvery®).

Следует отметить высокую эффективность получаемого таким образом кода, который лишь на 5% объемнее и на 15% медленнее аналогичного кода после оптимизации [13].

Применение электромеханической обратной связи в слуховых аппаратах

Для современных слуховых аппаратов характерно недостаточное усиление на частотах выше 6000 Гц, а причиной является падение эффективности применяемого излучателя [14]. Охват отрицательной обратной связью системы “усилитель-излучатель”, которая, как известно, приводит к расширению частотного диапазона, позволяет повысить эффективность излучения [15]. Верхняя (как, впрочем, и нижняя) граничная частота СА с такой, электромеханической обратной связью (ЭМОС) увеличивается в глубину отрицательной обратной связи раз за счет потребления дополнительной мощности от усилителя [16].

Использование отдельного датчика сигнала обратной связи, характерного для электроакустических систем с ЭМОС, в силу миниатюрности электромеханического преобразователя СА невозможно [17]. Однако, благодаря обратимости используемых электродинамических и пьезоэлектрических излучателей, сигнал обратной связи может быть получен, например, с помощью измерительного моста, что не потребует изменения конструкции излучателя, сохранив все положительные свойства ЭМОС (рис. 4). В общем случае в предназначенных для приёма речевых сигналов СА, требуется небольшое расширение рабочего диапазона, и потребление дополнительной мощности от усилителя будет предположительно незначительным, что не потребует изменений конструкции [18].

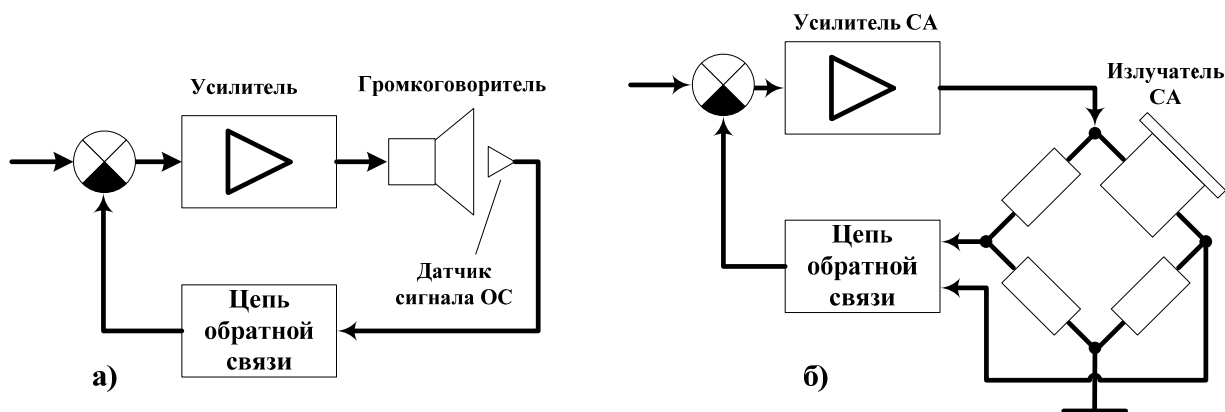


Рисунок 4 – Электромеханическая обратная связь: а) каноническая схема организации ЭМОС; б) введение бездатчиковой ЭМОС в слуховом аппарате.

Выводы

1. Применение частотного транспонирования является эффективным методом лечения сенсоневральной тугоухости, а в качестве менее ресурсоёмкого метода его реализации, очевидно, следует использовать обработку в частотной области путём сдвига коэффициентов прямого преобразования Фурье.
2. Использование бездатчиковой ЭМОС позволит повысить эффективность большинства существующих СА, не требуя значительных конструктивных изменений. Обеспечиваемое ЭМОС расширение спектра создаст благоприятные условия для реализации частотного транспонирования в область более низких частот, обычно менее подверженную патологическим изменениям.

Литература

1. Прасол, И.В., Особенности обработки речевых сигналов в цифровых слуховых аппаратах / Прасол И.В., Нечипоренко А.С. // Радиоэлектронные и компьютерные системы – 2008 – №4 (31) – С. 37 – 42.
2. Прасол, И.В. Особенности проектирования цифровых слуховых аппаратов на основе речевых процессоров / Прасол И.В., А.С. Нечипоренко // Системи обробки інформації – 2009 – №2 (76) – С. 83 – 90.
3. Сушко Ю.А. и др. Сенсоневральная тугоухость – Режим доступа: http://www.otology.kiev.ua/article_0003.shtml – 1.01.2011 г.
4. Пятница, Т. В. Логопедия в таблицах и схемах / Т. В. Пятница // Минск : Аверсэв. – 2006.
5. Нейман Л.В. Анатомия, физиология и патология органов слуха и речи: Учеб. для студ. высш. пед. учеб. заведений / Л.В. Нейман, М.Р. Богомильский // М.: ВЛАДОС, 2001. – 224 с.
6. Римский-Корсаков, А.В. Электроакустика / А.В. Римский-Корсаков // М.: Связь, 1973 – 272 с.
7. Радионова Е.А. Анализ звуковых сигналов в слуховой системе: Нейрофизиологические механизмы / Е.А. Радионова // Л.: Наука. – 1987. – 272 с.
8. Акустика: Учебник для вузов / Ш. Я. Вахитов, Ю. А. Ковалгин, А.А. Фадеев, Ю.П. Щевьев; под ред. Ю. А. Ковалгина // М. : Горячая линия–Телеком. – 2009. – 660 с.

9. Алдошина И. Основы психоакустики, часть 14. Тембр, часть 1. // Звукорежиссёр – 2001 – №2 – Режим доступа: <http://www.masters.donntu.edu.ua/2008/kita/kravchenko/library/artten.htm>
10. Лопотко А.И. Старческая тугоухость / А.И. Лопотко, М.С. Плужников, М.А. Атамуратов // А.: Илим. – 1986. – 300 с.
11. Ричард Лайнос Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Пер. с англ. / Р. Лайнос // М.: ООО “Бином-пресс”. – 2006. – 656 с.
12. Learn RapidSTM32 Home – Режим доступа: https://www.aimagin.com/learn/index.php/Learn_RapidSTM32_Home – 22.03.2011 г.
13. MathWorks Tools Help Toyota Design for the Future – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/linkexchange/links/700-the-mathworks-tools-help-toyota-design-for-the-future> – 2.04.2004 г.
14. Вулф Дж. и др. Использование нелинейной частотной компрессии у детей с умеренным снижением слуха – Режим доступа: <http://www.audiologyonline.ru/articles/?action=article&id=329> – 1.01.2011 г.
15. Захарин В.М. Электромеханическая обратная связь в акустических системах / В.М. Захарин, Ю.Н. Митрофанов // Теория и техника связи: сб. науч. тр. ОЭИС. – Одесса, 1981. – с. 96 – 100.
16. Остапенко Г.С. Усилительные устройства: Учеб. пособие для вузов / Г.С. Остапенко // М.: Радио и связь. – 1989. – 400 с.
17. Захарин В.М. Датчиковая электромеханическая обратная связь в акустических системах / В.М. Захарин, Ю.Н. Митрофанов // Системы и средства передачи информации по каналам связи :сб. ТУИС. – Л.: ЛЭИС. – 1981. – с. 133 – 138.
18. Захарин, В.М. Бездатчиковая электромеханическая обратная связь в акустических системах / В.М. Захарин, Ю.Н. Митрофанов //: сб. ТУИС. Радиотехнические системы и устройства – Л. : ЛЭИС. – 1981. – с. 127 – 132.

References

1. Prasol, I.V., Osobennosti obrabotki rechevyh signalov v cifrovyyh sluhovyh apparatah / Prasol I.V., Nechiporenko A.S. // Radiojelektronnye i komp'yuternye sistemy – 2008 – №4 (31) – s. 37 – 42.
2. Prasol, I.V. Osobennosti proektirovaniya cifrovyyh sluhovyh apparatov na osnove rechevyh pro-cessorov / Prasol I.V., A.S. Nechiporenko // Sistemi obrobki informacii – 2009 – №2 (76) – s. 83 – 90.
3. Sushko Ju.A. i dr. Sensonevral'naja tugooust' – Rezhim dostupa: http://www.otology.kiev.ua/article_0003.shtml – 1.01.2011 g.
4. Pjatnica, T. V. Logopedija v tablicah i shemah / T. V. Pjatnica // Minsk : Aversjev. – 2006.
5. Nejman L.V. Anatomija, fiziologija i patologija organov sluha i rechi: Ucheb. dlja stud. vyssh. ped. ucheb. zavedenij / L.V. Nejman, M.R. Bogomil'skij // M.: VLADOS, 2001. – 224 s.
6. Rimskij-Korsakov, A.V. Jelektroakustika / A.V. Rimskij-Korsakov // M.: Svjaz', 1973 – 272 s.
7. E.A. Radionova analiz zvukovyh signalov v sluhovoj sisteme: Nejrofiziologicheskie mehanizmy / E.A. Radionova // L.: Nauka. – 1987. – 272 s.
8. Akustika: Uchebnik dlja vuzov / Sh. Ja. Vahitov, Ju. A. Kovalgin, A.A. Fadeev, Ju.P. Shhev'ev; pod red. Ju. A. Kovalgina // M. : Gorjachaja linija–Telekom. – 2009. – 660 s.
9. Aldoshina I. Osnovy psihoakustiki, chast' 14. Tembr, chast' 1. // Zvukorezhissjor – 2001 – №2 – Re-zhim dostupa: <http://www.masters.donntu.edu.ua/2008/kita/kravchenko/library/artten.htm>
10. Lopotko A.I. Starcheskaja tugooust' / A.I. Lopotko, M.S. Pluzhnikov, M.A. Atamuradov // A.: Ilym. – 1986. – 300 s.
11. Richard Lajnos Cifrovaja oborabotka signalov: Vtoroe izdanie. Per. s angl. / R. Lajnos // M.: ООО “Binom-press”. – 2006. – 656 s.
12. Learn RapidSTM32 Home – Rezhim dostupa: https://www.aimagin.com/learn/index.php/Learn_RapidSTM32_Home – 22.03.2011 g.
13. MathWorks Tools Help Toyota Design for the Future – Rezhim dostupa: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/linkexchange/links/700-the-mathworks-tools-help-toyota-design-for-the-future> – 2.04.2004 g.
14. Vulf Dzh. i dr. Ispol'zovanie nelinejnoj chastotnoj kompressii u detej s umerennym snizheniem sluha – Rezhim dostupa: <http://www.audiologyonline.ru/articles/?action=article&id=329> – 1.01.2011 g.
15. Zaharin V.M. Jelektromehaničeskaja obratnaja svjaz' v akustičeskikh sistemah / V.M. Zaharin, Ju.N. Mitrofanov // Teorija i tehnika svjazj: sb. nauch. tr. OJeIS. – Odessa, 1981. – s. 96 – 100.
16. Ostapenko G.S. Usilitel'nye ustrojstva: Ucheb. posobie dlja vuzov / G.S. Ostapenko // M.: Radio i svjaz'. – 1989. – 400 s.
17. Zaharin V.M. Datchikovaja jelektromehaničeskaja obratnaja svjaz' v akustičeskikh sistemah / V.M. Za-harin, Ju.N. Mitrofanov // Sistemy i sredstva peredachi informacii po kanalam svjazj :sb. TUIS. – L.: LJe-IS. – 1981. – s. 133 – 138.
18. Zaharin, V.M. Bezdatčikovaja jelektromehaničeskaja obratnaja svjaz' v akustičeskikh sistemah / V.M. Zaharin, Ju.N. Mitrofanov //: sb. TUIS. Radiotehničeskije sistemy i ustrojstva – L. : LJeIS. – 1981. – s. 127 – 132.

Рецензія/Peer review : 10.7.2013 р.

Надрукована/Printed :31.10.2013 р.