

СПОСОБ ПЕРЕДАЧИ ДИСКРЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ КАНАЛ СВЯЗИ

О. В. СУХАРЬКОВ

*Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова
ул. Ковальська, 1, 65029, г. Одесса, Украина,
тел. 723-83-45, e-mail: olegvs07@rambler.ru*

The analysis of the acoustic properties hydrodynamic converters with a circular nozzle and a stepped obstacle is performed. A new method for digital data transmission in a hydroacoustic communication channel with the use horn antenna based on hydrodynamic converters is presented.

ВВЕДЕНИЕ

Освоение мирового океана, в том числе разведка и добыча полезных ископаемых со дна морей, различные военно-морские задачи нуждаются в надежной цифровой связи между подводными объектами. В информационной гидроакустике важной проблемой является проблема увеличения дальности действия передающей аппаратуры за счет использования более низких частот. При этом особое внимание уделяется разработке эффективных глубоководных преобразователей, являющихся неизменными элементами гидроакустических излучающих антенн. Стремление использовать в звукоподводной связи низкие рабочие частоты приводит к поиску методов эффективного излучения низкочастотных сигналов, основанных на нетрадиционных принципах построения излучающих антенн. В связи с этим определенным интересом представляет использование жидкоструйных преобразователей с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием [1, 2]. Неоспоримые их преимущества: экономичность (дешевизна изготовления излучателей), простота в эксплуатации, малые габариты и вес, отсутствие вибрирующих элементов конструкции, обуславливающее длительный срок службы преобразователей. Однако при проектировании гидроакустических излучающих антенн для передачи цифровой информации между подводными объектами жидкоструйные преобразователи ранее не использовались. Это связано с их спецификой генерирования звука в водной среде: работа жидкоструйных преобразователей основана на преобразовании части энергии турбулентной затопленной струи жидкости в энергию акустических волн [3].

В настоящей работе предлагается новый способ передачи дискретной информации в гидроакустический канал связи с помощью рупорных антенн на основе прямооточных жидкоструйных преобразователей.

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРЯМОТОЧНЫХ ЖИДКОСТРУЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Физическая модель прямооточного жидкоструйного преобразователя с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием представлена на рис. 1. В первом приближении можно считать, что струя жидкости, вытекающая с регулируемой скоростью из кольцевого сопла 1, представляет собой затопленную цилиндрическую струйную оболочку 2. Верхнее основание оболочки 2 жестко зашпечлено на торце сопла, а нижнее основание является свободным. Ступенчатое препятствие 4 способствует тому, что часть

кінетическої енергії струї расходується на формування первичного вихря 3, в середині якого створюються умови для розриву рідини і утворення парогазових кавітаційних бульбашок. Струйня оболочка 2 і первичний тороїдальний вихрь 3 добре видно на теневій фотографії працюючого преобразователя (рис. 2).

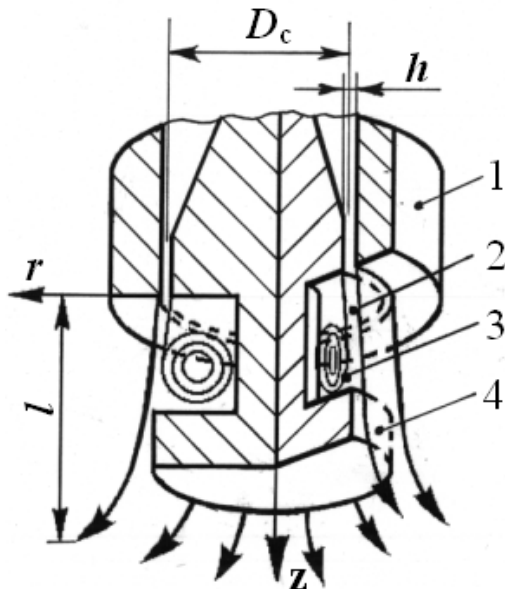


Рис. 1

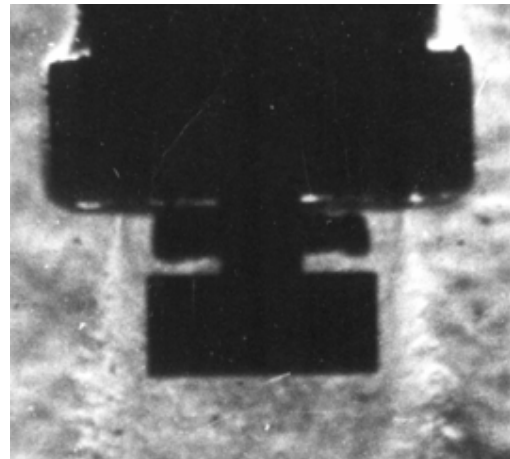


Рис. 2

С увеличением концентрации каверн давление внутри области 3 возрастает и достигает критического значения, после чего происходит деформация свободного края оболочки 2 и выброс содержимого кавитационной зоны во внешнюю среду. Ниже ступенчатого препятствия 4 образуется вторичная кольцевая кавитационная область, коллапс каверн в которой усиливает интенсивность генерируемых преобразователем акустических волн. При этом давление во внутренней полости оболочки 2 становится меньше гидростатического давления в невозмущенной водной среде, что вновь приводит к возникновению вихря 3. В дальнейшем описанный процесс периодически повторяется.

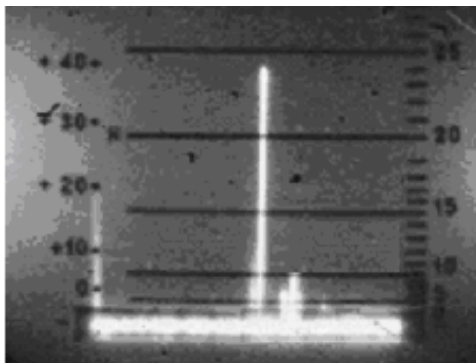


Рис. 3

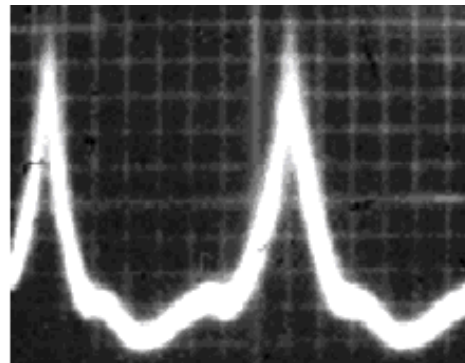


Рис. 4

Таким образом, накопителем энергии в жидкоструйном преобразователе является первичный вихрь 3, а его пульсации возбуждают изгибные колебания в струйной оболочке 2. Частота пульсаций вихря 3 зависит от скорости струи на выходе из сопла. На рис. 3 и рис. 4 представлены спектрограмма и осциллограмма генерируемого звукового сигнала при оптимальном режиме истечения струи. В этом случае частота пульсаций вихря 3 совпадает с собственной частотой изгибных колебаний оболочки 2, и жидкоструйный преобразователь генерирует тональный акустический сигнал максимального уровня. Преимуществом прямооточного жидкоструйного преобразователя, по сравнению с противоточным гидродинамическим излучателем [3], является строго заданное формирование кольцевой струи перед обтеканием ею ступенчатого цилиндрического препятствия 4 (рис.1), что позволяет существенно повысить стабильность режима генерирования звуковых волн.

Ранее проведенные экспериментальные исследования показали, что акустический сигнал, генерируемый жидкоструйными преобразователями, является негармоническим: в частотном спектре наблюдается ряд гармонических составляющих [4...7]. Однако при оптимальном режиме истечения струи амплитуда первой (низшей) гармоники превышает амплитуды высших гармоник на 15...40 дБ (рис. 3). В этом случае генерируемый тональный звуковой сигнал состоит из последовательности отдельных коротких импульсов экспоненциальной формы с разной крутизной переднего и заднего фронтов. Период следования импульсов ($T \approx 1/f_0$) определяется частотой основного тона f_0 генерируемого сигнала. Анализ осциллограмм (рис. 4) показывает, что в течение приблизительно 3/4 периода происходит накопление энергии и за время примерно $T/4$ излучается короткий импульс [5].

Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) жидкоструйных преобразователей зависят от геометрических и гидродинамических параметров затопленной струйной оболочки и свойств жидкости. На рис. 5 представлены АЧХ прямооточных жидкоструйных преобразователей с различным средним диаметром $D_{\text{цил}}$ струйной оболочки (1 – $D_{\text{цил}} = 34$ мм, 2 – $D_{\text{цил}} = 23$ мм, 3 – $D_{\text{цил}} = 15$ мм).

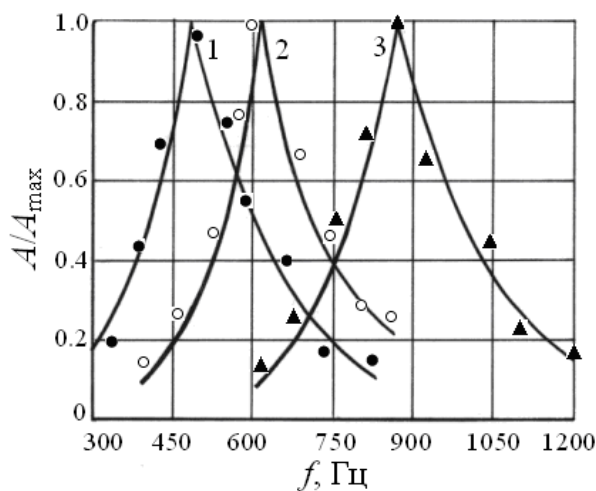


Рис. 5

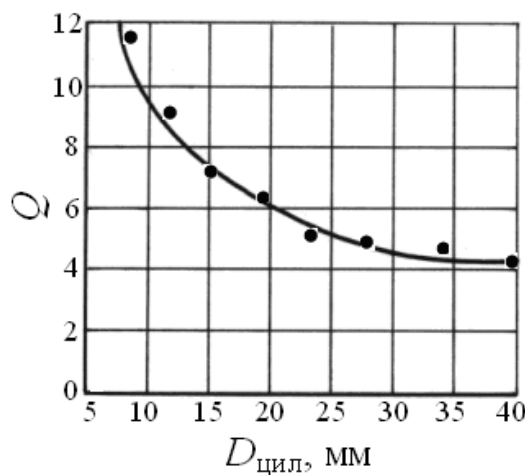


Рис. 6

Здесь сплошными линиями отражены теоретические кривые амплитуды вынужденных изгибных колебаний свободного края оболочки в относительных единицах (A/A_{\max}), рассчитанные согласно методике статьи [7]. Там же в относительных единицах звукового давления (P/P_{\max}) представлены точками результаты экспериментальных измерений АЧХ излучателей. При этом учтено, что $A/A_{\max} = P/P_{\max}$. При проведении экспериментов постоянными были толщина струйной оболочки ($h = 0,5\text{мм}$) и соотношение длины и среднего диаметра струйной оболочки ($l/D_{\text{цил}} = 0,6$). Видна хорошая корреляция экспериментальных АЧХ преобразователей и функции изгибных колебаний свободного края струйной оболочки.

На рис. 6 показана зависимость добротности преобразователей $Q(D_{\text{цил}})$ от среднего диаметра струйной оболочки. Расчет показал, что добротность прямоточного преобразователя с ростом среднего диаметра оболочки существенно понижается, асимптотически приближаясь к значению $Q = [4,3\dots5]$. Известно, что для обеспечения широкой равномерной частотной характеристики излучения, позволяющей воспроизводить без искажений акустический сигнал на электрической стороне (в приемниках), добротность излучателей должна быть невелика (≤ 10) [3]. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что добротность прямоточных жидкоструйных преобразователей ($Q = 4\dots12$) позволяет эффективно использовать их в качестве элементов гидроакустических излучающих антенн.

РАЗРАБОТКА ПЕРЕДАЮЩЕГО ТРАКТА НА ОСНОВЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ

Анализ акустических и гидродинамических свойств жидкоструйных преобразователей позволил разработать схему передающего тракта для передачи дискретной информации в условиях частотно-импульсной модуляции в гидроакустический канал связи (рис. 7).

Передающий тракт состоит из персонального компьютера 1, исполнительного механизма 2 для регулирования расхода рабочей жидкости, емкости 3 с морской водой, фильтра 4; насоса 5; датчика расхода 6 рабочей жидкости; трубопровода 7. Компьютер 1, исполнительный механизм 2, емкость 3, фильтр 4, насос 5, датчик расхода 6 находятся на подводной лодке или на стационарной гидроакустической станции. Для работы насоса 5 можно также использовать забортную морскую воду. По трубопроводу 7 рабочая жидкость поступает в прямоточный жидкоструйный преобразователь 8, который установлен внутри предрупорной камеры 9 рупорной антенны 10 [8]. Уровень генерируемого акустического сигнала зависит от режима истечения струи, геометрических параметров преобразователя и величины гидростатического давления на заданной глубине [1, 4\dots6]. С учетом агрессивных свойств морской воды все конструктивные элементы гидроакустической антенны изготавливаются из нержавеющей стали, например, X18H10T.

Расположение жидкоструйного преобразователя 8 на расстоянии равном четверти длины волны основного тона акустического сигнала от фланца предрупорной камеры 9, позволяет сформировать в осевом направлении рупорной антенны плоскую волну. При этом на оси горла рупора 10 величина звукового давления, регистрируемого с помощью

гидрофона, возрастает в несколько раз по сравнению с величиной звукового давления на том же расстоянии от преобразователя 8 в случае генерирования им сигнала в свободной среде. С целью формирования характеристики направленности антенны в горизонтальной плоскости в разработанной антенне [8] используется катеноидальный рупор. Достоинствами рупора катеноидальной формы являются: согласование импеданса рупора с предрупорной трубой постоянного сечения и эффективное излучение сигнала в низкочастотной области звукового диапазона [9].

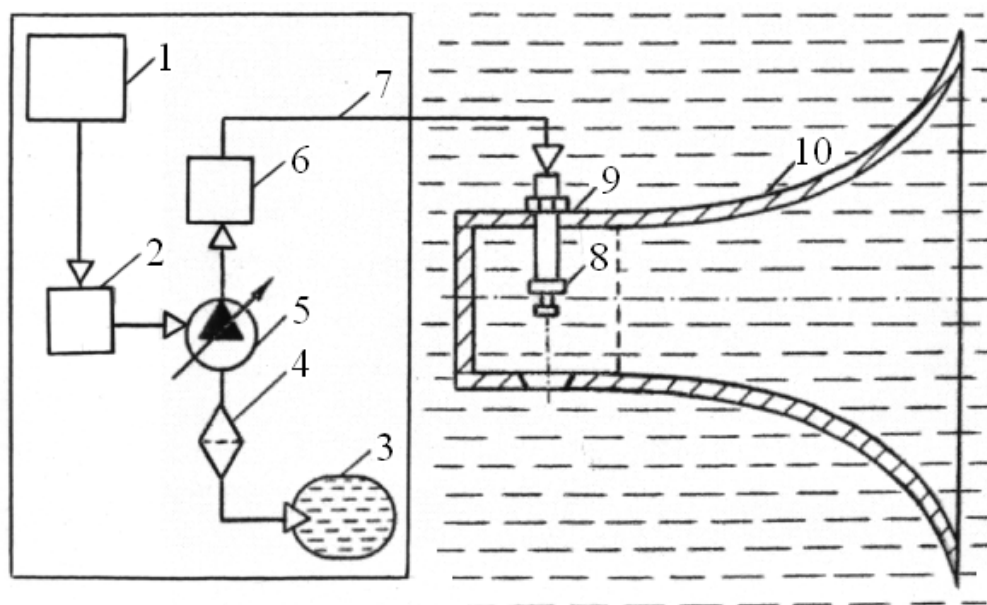


Рис. 7

ПЕРЕДАЧА ДИСКРЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ КАНАЛ СВЯЗИ

Способ передачи дискретной информации в условиях частотно-импульсной модуляции [10] осуществляют следующим образом. При подключении электропитания центральный процессор персонального компьютера 1 выполняет специально разработанную программу, управляющую исполнительным механизмом 2 (см. рис. 7). Исполнительный механизм 2 включает насос 5 и устанавливает величину расхода рабочей жидкости, соответствующую оптимальной скорости истечения струи жидкоструйного преобразователя 8 [4]. В этом случае преобразователь 8 генерирует тональный звуковой сигнал, состоящий из последовательности отдельных коротких импульсов экспоненциальной формы [5]. Затем выполняется считывание передаваемого кодированного информационного сигнала (рис. 8,а) с носителя информации персонального компьютера 1.

Манипуляция несущей частоты звукового сигнала реализуется путем регулирования оптимальной скорости струи за счет программируемого управления центральным процессором работой исполнительного механизма 2. Таким образом, несущая частота звукового импульсного сигнала жидкоструйного преобразователя 8,

согласно программе, модулируется передаваемым дискретным информационным сигналом. В результате генерируемый акустический сигнал превращается в комбинацию импульсных последовательностей с разными звуковыми частотами, одна из которых соответствует уровню логического "нуля", а вторая соответствует уровню логической "единицы" в фиксированные интервалы времени (рис. 8,б). При этом рупорная антенна 10 выполняет направленное в горизонтальной плоскости излучение модулированного звукового сигнала в гидроакустический канал связи.

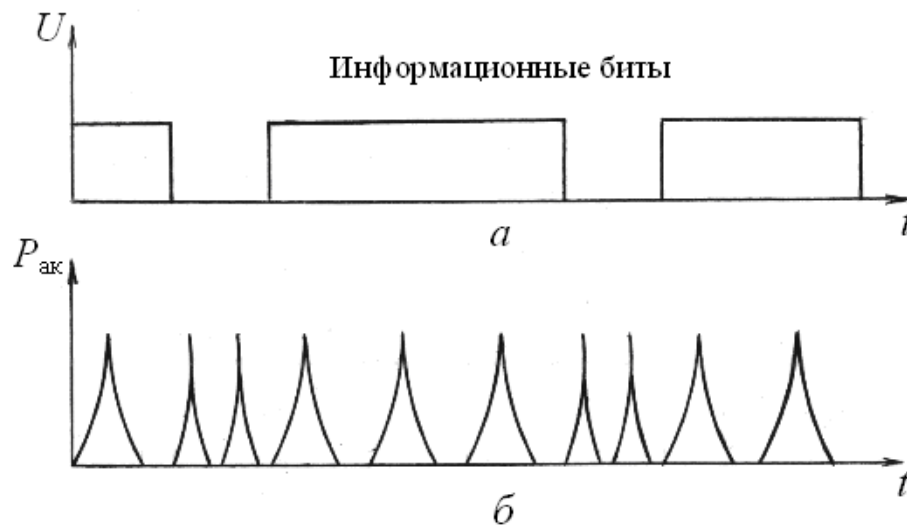


Рис. 8

На приемной стороне акустические сигналы, с помощью гидрофонов, принимают из канала связи, преобразуют их в электрические сигналы и измеряют периоды импульсных последовательностей этих сигналов в четко определенные интервалы времени. Далее осуществляют идентификацию единиц и нулей кодовой комбинации, передаваемой в канале связи, и записывают принятую информацию на носитель приемной аппаратуры. Конечный этап обработки включает в себя декодирование и представление информационного сообщения в удобном для слухового или зрительного восприятия виде.

Испытание способа передачи дискретной информации в условиях частотно-импульсной модуляции проводилось в гидроакустическом бассейне. Исходными данными служили: скорость звука в водной среде $c = 1500 \text{ м/с}$, волновое сопротивление среды $(\rho c)_в = 1.5 \times 10^3 \text{ кг/м}^2\text{с}$, избыточное статическое давление $\Delta P_{ст} = 5 \text{ кПа}$. Геометрические параметры проточного преобразователя принимали следующие значения: средний диаметр кольцевого сопла $D_c = 13,0 \text{ мм}$, ширина щели сопла $h = 0,5 \text{ мм}$ (рис. 1). При оптимальной скорости струи $V_{опт} = 30,8 \text{ м/с}$ (расход $Q_{опт} = 0,63 \text{ л/с}$) преобразователь генерировал импульсный звуковой сигнал с частотой основного тона $f_1 = 870 \text{ Гц}$. Манипуляция несущей частоты звукового сигнала производилась за счет незначительного уменьшения оптимальной скорости струи. В этом случае значение частоты основного тона сигнала изменяется обратно пропорционально

скорости истечения затопленной струи из сопла преобразователя [4]. При скорости струи $V = 29,4 \text{ м/с}$ (расход $Q = 0,60 \text{ л/с}$) частота импульсного сигнала принимала значение $f_2 = 900 \text{ Гц}$. Испытание звукоподводной связи показало, что девиация частоты $\Delta f = 30 \text{ Гц}$ позволяет передавать дискретную информацию со скоростью 15 – 20 слов/мин.

Достоинством разработанного способа является то, что частотно-импульсная модуляция акустического сигнала обладает повышенной помехоустойчивостью по сравнению с модуляцией непрерывной синусоидальной несущей частоты [11]. К достоинствам способа следует также отнести: возможность эффективной передачи дискретной информации в широком диапазоне избыточных статических давлений (на глубине от 10 м до 240 м); достаточно высокий уровень генерируемого акустического сигнала (интенсивность звука в горле рупорной антенны может принимать значение от 2 Вт/см^2 до 98 Вт/см^2); низкочастотный рабочий диапазон тонального импульсного сигнала (от 300 Гц до 9 кГц) [1, 6].

ВЫВОДЫ

Проведен анализ акустических свойств прямооточных жидкоструйных преобразователей с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием. В первом приближении можно считать, что физической моделью прямооточного преобразователя является затопленная цилиндрическая струйная оболочка. При оптимальном режиме истечения струи генерируемый преобразователями тональный звуковой сигнал состоит из последовательности отдельных коротких импульсов экспоненциальной формы. Динамика струйной оболочки определяет амплитудно-частотные характеристики преобразователей. Добротность жидкоструйных преобразователей позволяет воспроизводить практически без искажений акустический сигнал в приемном тракте информационного канала. На основе прямооточного жидкоструйного преобразователя разработана гидроакустическая излучающая рупорная антенна. С целью формирования характеристики направленности в горизонтальной плоскости в качестве рупора в антенне служит катеноидальный рупор. Предложен новый способ передачи дискретной информации в условиях частотно-импульсной модуляции в подводный звуковой канал. Разработанный способ обладает повышенной помехоустойчивостью, обеспечивает эффективную цифровую связь в широком диапазоне гидростатических давлений и позволяет увеличить дальность действия передающей аппаратуры за счет использования низких частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухарьков О.В. Оптимизация параметров прямооточного гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления / О.В. Сухарьков // Акуст. вісник. – 2008. – 11, № 4. – С. 54 – 63.
2. Сухарьков О.В. Жидкоструйный излучатель со ступенчатым препятствием и круговым щелевым соплом в виде соосных дисков / О.В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – №1. – С. 102 – 108.
3. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой. – М. : Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

4. Сухарьков О.В. Влияние скорости струи на акустические характеристики осесимметричного гидродинамического излучателя / О. В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2006. – №2. – С. 78–84.
5. Сухарьков О.В. Экспериментальное исследование акустического поля прямого гидродинамического излучателя / О. В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2007. – №1. – С. 39–44.
6. Сухарьков О.В. Влияние гидростатического давления на энергетические характеристики прямого гидродинамического излучателя / О.В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2009. – №1. – С. 70 – 77.
7. Дудзінський Ю.М. Спектр звуку, генерованого зануреною осесимметричною струминною оболонкою / Ю.М. Дудзінський, О.В. Сухарьков // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 2007. – **50**, № 2. – С. 129 – 134.
8. Пат. 58117 Україна, МПК' Н04R 1/00, Н04В 13/00. Гідроакустична антена / Сухарьков О.В.; заявник і патентовласник Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова. – № у 201015826 ; заявл. 28.12.10, опубл. 25.03.11, Бюл. № 6.
9. Морз Ф. Колебания и звук / Ф. Морз. – М. : ИИЛ, 1948. – 660 с.
10. Пат. 60944 Україна, МПК' Н04В 13/00. Спосіб передавання дискретної інформації в умовах частотно-імпульсної модуляції / Сухарьков О.В.; заявник і патентовласник Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова. – № у 201103723 ; заявл. 28.03.11, опубл. 25.06.11, Бюл. №12.
11. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. / Е.И. Манаев. – М. : Радио и связь, 1990. – 512 с.