

**А.Н. Куценко, Ю.В. Савич, Д.С. Слуцкий**

**АКУСТИЧЕСКИЙ ТРАКТ ПОСТОВОЙ СИСТЕМЫ РАННЕЙ  
ДИАГНОСТИКИ БУКСОВЫХ ПОДШИПНИКОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖУЩИХСЯ ПОЕЗДОВ**

*Статья посвящена исследованию и оптимизации акустического тракта системы ПАК-02.000 (постовой акустический комплекс), предназначенной для повышения экологической безопасности. Для повышения отношения сигнал-шум ПАК-02.000 был проведен анализ акустического тракта, предложены методы оптимизации ближнего и дальнего полей приемного акустического тракта данной системы.*

*Шум; подшипник; буксовый узел; постовая система; диагностика; направленность; угол компенсации; амплитудное распределение; фазовое распределение; слежение.*

**A.N. Kutsenko, Y.V. Savich, D.S. Slutskiy**

**ACOUSTIC TRACT OF MONITORING SYSTEM OF EARLY  
DIAGNOSTICS FOR ECOLOGICAL SAFETY PROVISION OF MOVING  
TRAIN BEARINGS**

*The paper covers researching and optimization of acoustic tract of monitoring system SAC-02.000 intended for ecological safety increasing. For increasing signal-to-noise ratio of the SAC-02.000 the analysis of the acoustic tract was held, the ways of optimization of near- and far-fields of reception path were brought forward.*

*Noise; bearing; box; monitoring system; diagnostics; directivity; angle of equalization; amplitude distribution; phase distribution; tracking.*

В течение более ста последних лет железнодорожный транспорт является основным в перевозках пассажиров и грузов, в том числе и экологически опасных. В современных условиях эксплуатации широкое распространение получили тележечные вагоны, которые по сравнению с нетележечными конструкциями обеспечивают хорошее вписывание в кривые участки пути и меньшие вертикальные перемещения при передвижении по неровностям рельсов. В общем случае тележка состоит из двух колесных пар с буксовыми узлами, на которые свободно устанавливаются литые боковые рамы с рессорными комплектами и литой надрессорной балкой (рис. 1). Буксовый узел обеспечивает трансформацию вращательного движения колесной пары в поступательное перемещение вагона. Поэтому буксовые узлы являются чрезвычайно ответственными элементами ходовых частей вагонов. Каждая, подчас незначительная, их неисправность может привести к отказу в работе и угрожает безопасности движения поездов.

Опыт эксплуатации буксовых узлов показал, что главными причинами выхода их из строя (отказов) является нарушение работоспособности роликовых подшипников, установленных на шейку оси. В настоящее время для выявления дефектов подшипников обычно используются стационарные дефектоскопы, при этом контроль происходит в депо. Однако наиболее перспективными системами кон-

троля работоспособности буксовых узлов считаются постовые системы ранней диагностики, размещаемые в железнодорожных узлах.

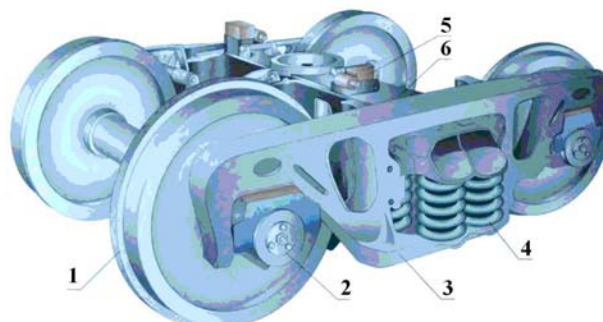


Рис. 1. Железнодорожная тележка: 1 – колесная пара; 2 – букса; 3 – боковая рама; 4 – рессорный комплект; 5 – горизонтальный скользяц; 6 – надрессорная балка.

В КБ им. Макеева была разработана постовая система ранней диагностики буксовых подшипников движущихся поездов ПАК-02.000. Данная система хорошо зарекомендовала себя в натуральных условиях, она позволяет выявлять большинство известных дефектов буксовых подшипников. Однако в процессе эксплуатации было выявлено относительно невысокое отношение сигнал-помеха. В связи с этим была поставлена задача – проанализировать акустический тракт этой системы и дать рекомендации по увеличению отношения сигнал-помеха.

В ходе испытаний постовой системы ранней диагностики буксовых подшипников движущихся поездов были получены спектры шумов для дефектного и бездефектного буксовых узлов. Из полученных спектрограмм шумов дефектного узла были выделены 3 узкополосных пика с центральными частотами 1600, 2800, 7000 Гц при скорости движения поезда 60 км/ч. Расчеты показывают, что частота 1600 Гц соответствует дефектам внутреннего и внешнего колец буксового подшипника, частота 2800 Гц – дефектам сепаратора, частота 7000 Гц – дефектам роликов буксового подшипника.

Приемная акустическая система постовой системы ранней диагностики буксовых подшипников движущихся поездов ПАК-02.000 состоит из двенадцати приемников, взаимное расположение которых схематично показано на рис. 2.

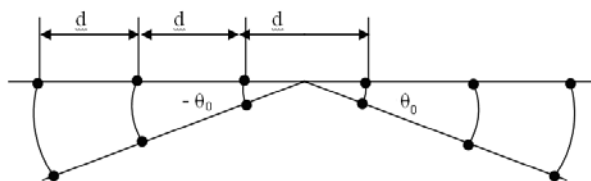


Рис. 2. Взаимное расположение элементов приемной антенны

Анализ данной акустической системы проводился в дальнем и ближнем полях. Для анализа дальнего поля характеристика направленности рассчитывалась по формуле, полученной путем разбиения антенны на элементарные, и использованием теорем о направленности:

$$R(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{nk d}{2}\sin(\theta)\right)}{2n\sin\left(\frac{k d}{2}\sin(\theta)\right)} + \frac{1 + e^{-ikd \cos(\theta_0)(\sin(\theta)-\sin(\theta_0))} + e^{-2ikd \cos(\theta_0)(\sin(\theta)-\sin(\theta_0))}}{12} + \frac{1 + e^{-ikd \cos(\theta_0)(\sin(\theta)-\sin(\theta_0))} + e^{-2ikd \cos(\theta_0)(\sin(\theta)-\sin(\theta_0))}}{12}, \quad (1)$$

где  $n=6$  – число элементов части антенны без введения угла компенсации;  $k$  – волновое число;  $d$  – расстояние между элементами антенны;  $\theta_0$  – угол компенсации антенны.

На рис. 3 приведены диаграммы направленности приемной антенны ПАК-02.000, рассчитанные в соответствии с формулой (1). Из рисунка видно, что с повышением частоты флуктуации амплитуды звукового давления поля антенны увеличиваются.

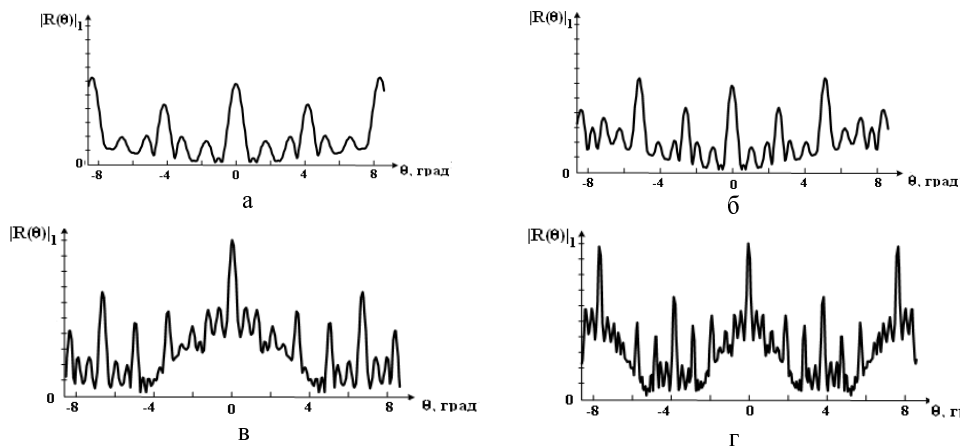


Рис. 3. Диаграммы направленности антенны на частотах 1600 Гц (а), 2800 Гц (б) и 7000 Гц (в)

Анализ дальнего поля показывает, что при разных углах компенсации  $\theta_0$  (рис. 4) можно добиться уменьшения числа дополнительных единичных максимумов и уровня боковых лепестков. При некоторых углах компенсации максимум основного лепестка меньше уровня боковых лепестков. При углах  $\theta_0=1,5^\circ$  (рис. 4 б),  $\theta_0=4,3^\circ$  (рис. 4,г) можно получить уровень основного лепестка выше уровня боковых лепестков.

Следует отметить, что постовая система ранней диагностики буксовых подшипников движущихся поездов устанавливается на расстоянии 1,5 м от железнодорожного полотна. Длина же ближней зоны приемной антенной системы на частоте 1,6 кГц составляет 254 м, а на частоте 2,8 кГц – 445 м. Таким образом, можно утверждать, что регистрация шумов буксовых подшипников системой происходит в ближнем поле.

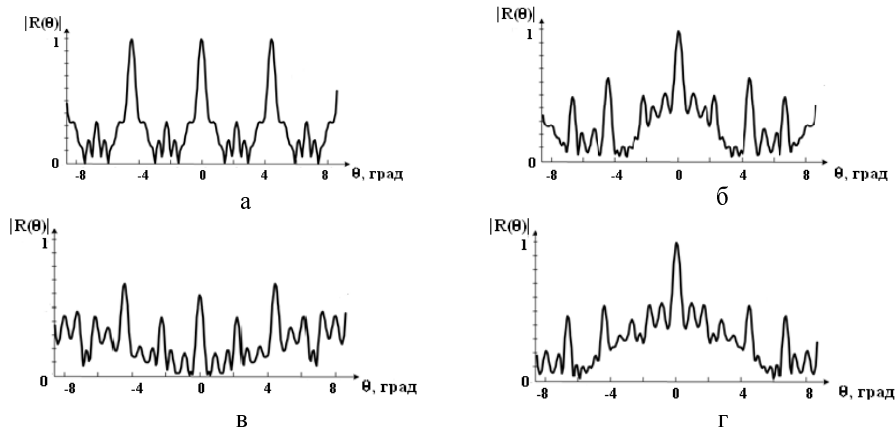


Рис. 4. Диаграмма направленности антенны при углах компенсации  $\theta_0=0^\circ$  (а),  $\theta_0=1,5^\circ$  (б),  $\theta_0=2,5^\circ$  (в),  $\theta_0=4,3^\circ$  (г)

Ближнее поле приемной антенны постовой службы ранней диагностики буксовых узлов ПАК-02.000 было рассчитано с использованием функций Грина [1]:

$$p(x, y) = j \frac{k \varphi c}{2\pi} \left[ \sum_{n=1}^{N/2} \frac{e^{jk\sqrt{(x+(0.5N+0.5-n)d)^2+y^2}}}{\sqrt{(x+(0.5N+0.5)d)^2+y^2}} + \sum_{n=0.5N+1}^N \frac{e^{jk\sqrt{(x-(n-0.5N-0.5)d)^2+y^2}}}{\sqrt{(x-(n-0.5N-0.5)d)^2+y^2}} \right] \quad (2)$$

В соответствии с выражением (2) были рассчитаны пространственное распределение звукового давления в ближнем поле (рис. 5, а) и сечение распределения давления в пространстве на расстоянии 1,5 м от линии приемной антенны (рис. 5, б). Видно, что флуктуации амплитуды давления в ближнем поле весьма значительны вследствие больших размеров антенны и малого числа приемников (рис.5). Такая пространственная неоднородность ближнего поля не позволяет однозначно измерить уровень давления шумового сигнала от буксового узла проходящего поезда. Обычно с целью уменьшения флуктуаций поля антенны вводят амплитудное и (или) фазовое распределения.

Известно, что при введении нормального амплитудного распределения по поверхности линейной непрерывной антенны поперечное распределение амплитуды давления в ближнем поле будет повторять нормальный закон распределения [2]. Рассмотрим влияние других типов распределения амплитуды по поверхности антенны на характер распределения звукового давления в ближнем поле антенны. Для дальнейших расчетов рассмотрим модель линейной непрерывной антенны. В качестве законов изменения амплитуды по поверхности антенны возьмем распределения, линейно спадающие к краям и линейно возрастающие к краям. Ближнее поле линейной непрерывной антенны рассчитывалось по формуле

$$p(x, y) = j \frac{k \varphi c}{2\pi} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} a(r) \frac{e^{-jk\sqrt{(x^2+r^2)+y^2+d(r)}}}{\sqrt{(x^2+r^2)+y^2}} dr. \quad (3)$$

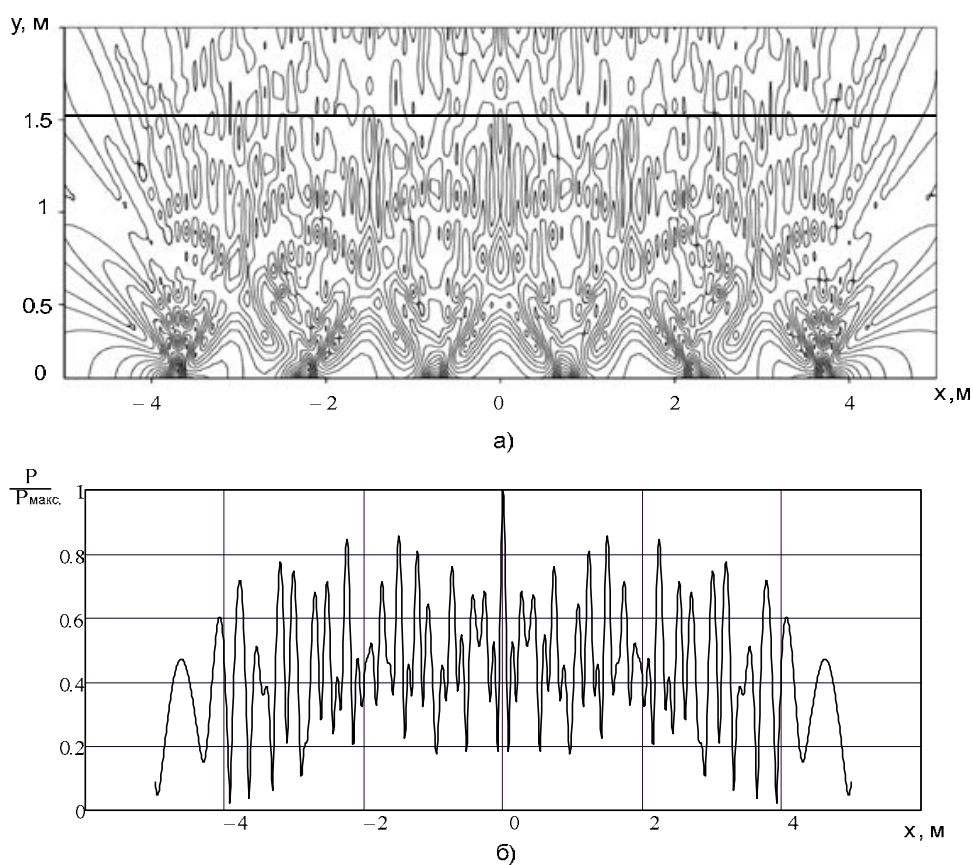


Рис. 5. Пространственное распределение давления в ближнем поле (а) и сечение амплитуды давления на расстоянии 1,5 м (б)

Результаты расчетов приведены на рис. 6. Здесь приведены формы нормированного равномерного (рис. 6,а), линейно спадающего к краям (рис. 6,г), линейно возрастающего к краям (рис. 6,ж) амплитудных распределений и соответствующие им сечения амплитуды (рис. 6, б, д, з) и фазы (рис. 6, в, е, и) звукового давления в ближнем поле на расстоянии 1,5 м от линии антенны.

Из приведенных результатов (рис. 6) видно, что при введении амплитудного распределения, возрастающего к краям, флуктуации амплитуды и фазы давления увеличиваются по сравнению со случаем введения равномерного амплитудного распределения (рис. 6, а – б), в), при этом искажается фронт волны (рис. 6, ж–и). При введении амплитудного распределения, спадающего к краям, флуктуации амплитуды и фазы давления значительно уменьшаются, форма сечения амплитуды практически повторяет закон амплитудного распределения (рис. 6, г, д). Фазовый фронт при этом можно считать квазиплоским (рис. 6,е)

В теории локации известен прием динамического сопровождения цели, реализуемый посредством введения фазового распределения по поверхности антенны. Один из таких методов (динамическая фокусировка) использует в качестве закона изменения фазы уравнение окружности. В соответствии с выражением (3) было

рассчитано ближнее поле линейной непрерывной антенны с введением различных законов изменения фазы (рис. 7). Законы изменения фазы по поверхности антенны приведены на рис. 7, а, г, ж. На рис. 7, б, д, з приведены сечения амплитуды звукового давления, на рис. 7, в, е, и – сечения фазы звукового давления в ближнем поле на расстоянии 1,5 м от линии антенны. Видно, что введение фазового распределения практически не влияет на флуктуации амплитуды, а фронт волны практически полностью повторяет закон изменения фазы по поверхности антенны (рис. 7).

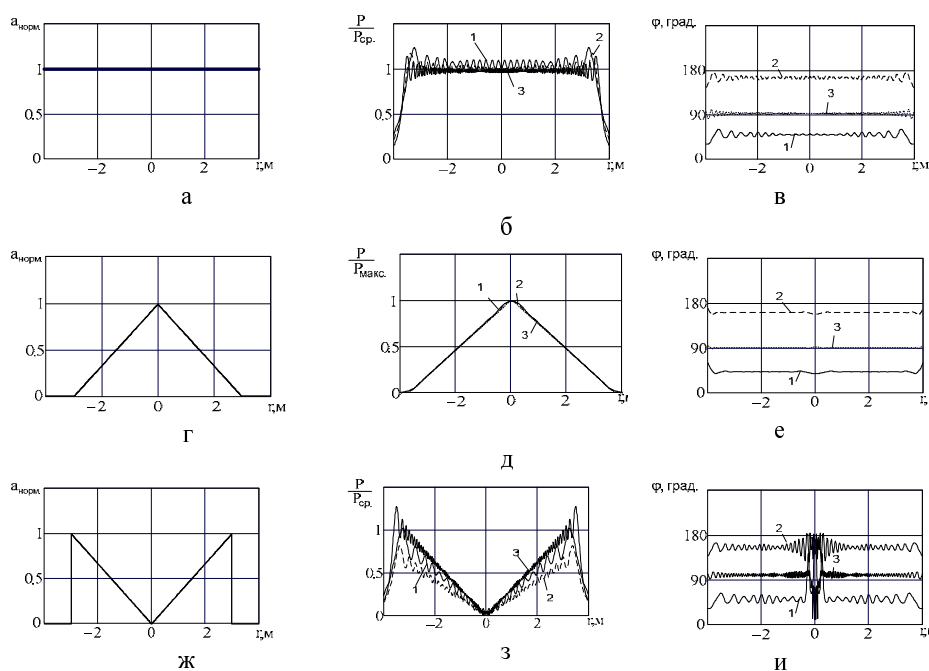


Рис. 6. Форма амплитудного распределения (а, г, ж) и сечение амплитуды (б, д, з) и фазы (в, е, и) давления на частотах 1600 Гц (кривая 1), 2800 Гц (кривая 2) и 7000 Гц (кривая 3)

Таким образом, на основании выше сказанного можно сказать, что форма амплитудного распределения является определяющим фактором в определении закона изменения давления в ближнем поле. Следует отметить, что спадающее к краям амплитудное распределение дает наиболее «гладкое» поле давлений в ближней зоне антенны.

Рассмотрим далее поведение ближнего поля линейной непрерывной антенны при введении спадающего к краям амплитудного распределения и смещении максимума амплитудного распределения относительно фазовой оси антенны.

Выше было сказано, что при введении нормального амплитудного распределения по поверхности линейной непрерывной антенны поперечное распределение амплитуды давления в ближнем поле будет повторять нормальный закон распределения. При смещении максимума распределения относительно фазовой оси антенны нормальный закон заменяется законом распределения Рэлея. На рис. 8, а приведены нормированные нормальное (кривая 1) и Рэлеевские (кривые 2 и 3) амплитудные распределения, на рис. 8, б – соответствующие им сечения амплитуды,

на рис. 8, в – фазы звукового давления в ближнем поле. Из рис. 8 видно, что при введении распределения Рэлея поперечное распределение амплитуды давления «зеркально» повторяет закон распределения Рэлея. Видно, что распределение Рэлея гипотетически дает возможность путем смещения максимума давления осуществлять динамическое слежение за целью в ближнем поле антенны, аналогично сканированию в дальнем поле путем введения фазового распределения.

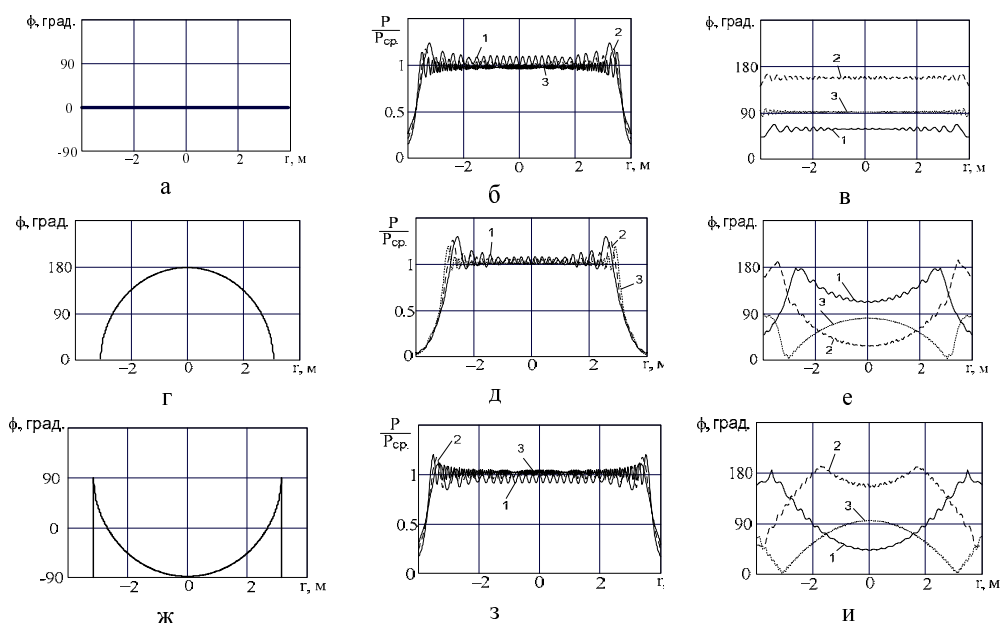


Рис. 7. Форма фазового распределения (а, г, ж) и сечение амплитуды (б, д, з) и фазы (в, е, и) давления на частотах 1600 Гц (кривая 1), 2800 Гц (кривая 2) и 7000 Гц (кривая 3)

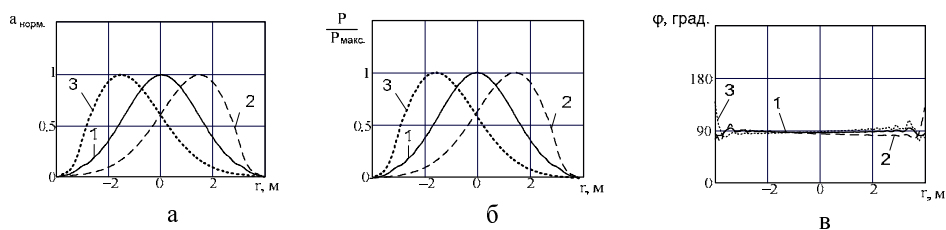


Рис. 8. Влияние нормального (кривая 1) и рэлеевского (кривые 2 и 3) амплитудных распределений на ближнее поле

Ближнее поле при нормальном и Рэлеевском амплитудных распределениях не имеет ярко выраженного максимума амплитуды, что значительно уменьшит точность такого метода слежения за целью. В отличие от нормального, амплитудное распределение, линейно спадающее к краям, позволяет получить в ближнем поле более острый максимум (рис. 9).

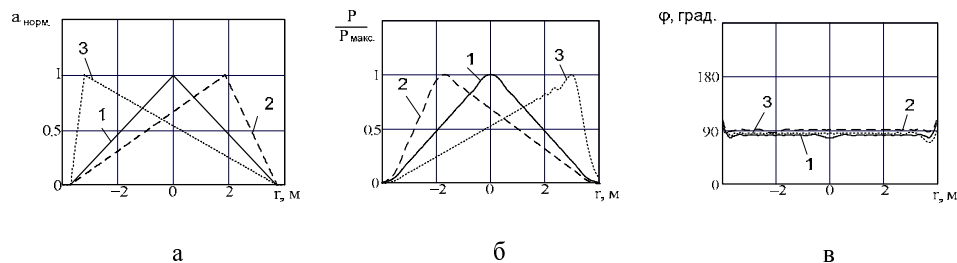


Рис. 9. Форма амплитудного распределения (а), сечение амплитуды (б) и фазы (в) давления в ближнем поле при амплитудном распределении, равномерно спадающем к краям, для разных положений максимума амплитуды давления

На рис. 9, а приведены нормированные амплитудные распределения, линейно спадающие к краям, при разных положениях максимума амплитуды звукового давления относительно акустической оси антенны, на рис. 9, б – соответствующие им сечения амплитуды, на рис. 9, в – фазы звукового давления в ближнем поле. Из рис. 9 видно, что введение треугольного амплитудного распределения позволяет получить более острый пик амплитуды давления, чем введение нормального распределения. Это позволяет определять угловые координаты цели с более высокой точностью.

Принципиальное отличие способа слежения за целью, осуществляемого путем смещения максимума амплитуды давления относительно акустической оси антенны, от динамического сопровождения цели состоит в том, что такой способ слежения за целью – колесной парой – осуществляется только при помощи амплитудного распределения, что значительно проще реализовать технически, чем введение фазового распределения.

Описанные выше закономерности справедливы не только для непрерывной, но и для дискретной антенны из точечных источников, расположенных друг от друга на расстоянии меньше критического расстояния – длины волны.

Таким образом, увеличение отношения сигнал-помеха может быть достигнуто за счет введения амплитудного распределения. При помощи смещения максимума амплитудного распределения можно осуществлять слежение за целью.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лепендин Л.Ф. Акустика. – М.: Высшая школа, 1978.
2. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1981.

#### **Куценко Александр Николаевич**

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге

E-mail: [kan1208@mail.ru](mailto:kan1208@mail.ru)

347928, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел.: (8634)311-132

#### **Савич Юлия Вадимовна**

E-mail: [MulKis.Jul@mail.ru](mailto:MulKis.Jul@mail.ru)



**Слуцкий Дмитрий Сергеевич**

E-mail: [sdiman85@mail.ru](mailto:sdiman85@mail.ru)

**Kutsenko Alexandr Nikolaevich**

Taganrog Institute of Technology - Federal State-Owned Educational Establishment  
of Higher Vocational Education "Southern Federal University"

E-mail: [kan1208@mail.ru](mailto:kan1208@mail.ru)

44, Nekrasovsky, Taganrog, Rostov region, 347928, Russia, Ph.: (634)-311-132

**Savich Yulia Vadimovna**

E-mail: [MulKis.Jul@mail.ru](mailto:MulKis.Jul@mail.ru)

**Slutsky Dmitry Sergeevich**

E-mail: [sdiman85@mail.ru](mailto:sdiman85@mail.ru)

УДК 612.424:613.693:615.471

**А. А. Рыбченко, Г. А. Шабанов, Ю. А. Лебедев,  
В. В. Короченцев, С. Б. Наумов**

**ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ ДЛЯ  
МОНИТОРИНГА ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ  
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РИТМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ  
ГОЛОВНОГО МОЗГА**

*При диспансеризации населения очевидна актуальность реализации мониторинга индивидуального здоровья – длительного динамического наблюдения за состоянием здоровья человека с целью раннего выявления выраженных дисфункций и предупреждения развития заболеваний. В основу технологии положены представления о мозге человека как органе, постоянно контролирующем и способном корректировать работу и состояние внутренних органов и организма в целом. Обсуждаются вопросы создания информационной сети мониторинга здоровья населения.*

*Мониторинг здоровья; диспансеризация населения; состояние здоровья человека; коррекция состояний; информационная сеть.*

**A. A. Rybchenko, G. A. Shabanov, J. A. Lebedev,  
V. V. Korochentsev, S. B. Naumov**

**APPROACHES TO THE ORGANIZATION OF THE INFORMATION  
NETWORK FOR MONITORING INDIVIDUAL HEALTH OF THE  
POPULATION ON THE BASIS OF THE ANALYSIS of RHYTHMIC ACTIVITY  
OF THE BRAIN**

*In the field of peoples' clinical examination, the individual health monitoring has evident actuality, considering that the individual health monitoring is a long-term dynamic observation of human's health conditions aiming to reveal apparent dysfunctions*