

УДК 531.3:681.883

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗВУКОРЯДА¹

Рудько И. М.²

(ФГБУН Институт проблем управления РАН, Москва)

Рассматриваются математические модели дискретных составляющих и звукорядов, содержащихся в энергетическом спектре шумоизлучения вращающихся механизмов и машин. На основе теории случайных функций предлагается стохастическая модель звукоряда, которая является более адекватной по сравнению с существующими эвристическими моделями. Предлагаемая стохастическая модель может найти применение при моделировании и разработке устройств обнаружения узкополосных шумовых сигналов и при исследовании, моделировании и разработке устройств виброгашения.

Ключевые слова: дискретные составляющие, звукоряды, спектральная плотность мощности, теория случайных функций.

1. Введение

Современные гидроакустические средства обнаружения и классификации морских судов работают в широкой полосе частот и производят обработку сигналов как во временной, так и в частотной областях [1, 2]. Однако низкочастотный диапазон частот является наиболее значимым, так как в энергетическом спектре этого диапазона наблюдаются узкие локальные максимумы – дискретные составляющие (ДС), обусловленные работой вала, гребного винта и наиболее шумящих механизмов и машин, несущие информацию о типе и режиме работы движителя

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №13-08-00744А.

² Игорь Михайлович Рудько, кандидат технических наук, с.н.с. (igor-rudko@mail.ru).

судна, количестве лопастей у винта и т.д., на основании которой появляется возможность разделить морские суда на основные классы и определить параметры их движения.

Основными составляющими шумов судов и кораблей считаются [11]:

- собственный шум гребных винтов, включающий кавитационный шум, шум вращения винтов и вихревой шум;

- шум корпуса корабля, обусловленный его вибрацией под воздействием вращения гребных винтов, работы главных и вспомогательных механизмов, срывов вихрей с кормовой оконечности корабля и кавитацией на плохо обтекаемых частях корпуса;

- прочие шумы, в частности шум, создаваемый пограничным слоем корпуса корабля, шум носового буруна и др.

Сплошная часть спектра шумов судна перекрывает диапазон от десятков до тысяч герц, дискретные спектральные составляющие обычно сосредоточены в области низких частот.

Часто ДС, возбуждаемые от одного и того же источника, бывают синхронизированы между собой и образуют так называемые звукоряды (ЗР), т.е. наборы ДС, частоты которых кратны между собой. ДС, образующие звукоряд, в литературе по гидроакустике часто называют «гармоники» [5, 12], а первую гармонику – основной гармоникой.

ДС, обусловленные вращением винтов, проявляются на частотах, кратных основной гармонике. ДС, связанные с работой механизмов, обычно кратны половине частоты сети электропитания (25 Гц при частоте сети 50 Гц и 30 Гц при частоте сети 60 Гц) [5].

На низких частотах, как правило, ширина дискретных составляющих существенно меньше, чем на высоких частотах. Обработка корабельных шумов с использованием аппаратуры сверхтонкого спектрального анализа показывает [5], что

- в диапазоне частот 10–60 Гц ширина дискретных составляющих может достигать до 0,025–0,05 Гц;

- в диапазоне частот 100–400 Гц – до 0,1 Гц;

- в диапазоне частот 400–1000 Гц – до 0,5–1,0 Гц.

Так, например, вальный ЗР может содержать ДС на частотах, кратных частоте вращения вала:

$$(1) \quad f_{B_k} = \frac{kv}{60} = kf_{B_1},$$

где $k = 1, 2, 3, \dots, K$, – номера гармоник; v – скорость вращения вала (об/мин); f_{B_1} – частота вращения вала (Гц).

Лопастной ЗР может содержать ДС на частотах, кратных произведению частоты вращения линии вала и числа лопастей винта:

$$(2) \quad f_{L_k} = z \frac{kv}{60} = zkf_{B_1},$$

где z – число лопастей винта.

Тональные компоненты ЗР являются высокостабильными и имеют очень узкие полосы частот [1, 2, 12]. Уместно заметить, что в отличие от отдельных ДС шум в виде ЗР, несмотря на то, что содержит узкополосные составляющие, в целом представляет собой широкополосный шумовой процесс.

Узкополосный гидроакустический шум (т.е. ДС общего суммарного шума) движущегося в воде объекта является полезным сигналом, обнаруживаемым на фоне помех, для узкополосных систем шумопеленгования.

Основной характеристикой, используемой для описания моделей ДС шума гидроакустических целей, является их спектральная плотность мощности (СПМ). При этом в известных способах и устройствах обнаружения узкополосных шумовых сигналов (при синтезе алгоритмов обработки) традиционно используются идеализированные модели СПМ ДС. Эти же способы и реализующие их устройства приема используются в настоящее время и для обнаружения широкополосных шумов в виде звукорядов из кратных гармоник (1), (2). Применяются две детерминированные модели звукоряда:

- **частотная модель (Ч-модель).**

СПМ отдельной ДС упрощенно представляется в виде δ -функции, сдвинутой относительно начала координат («нулевой частоты») на значение центральной частоты ДС f_1 [1, 2, 9]:

$$G_{дс}(f) = A^2 \delta(f - f_1).$$

Соответственно, СПМ звукоряда из K ДС представляется в виде ряда δ -функций, сдвинутых на кратные частотные интервалы kf_1 [9]:

$$(3) \quad G_{зр}(f) = \sum_{k=1}^K A_k^2 \delta(f - kf_1).$$

• **масштабно-частотная модель (МЧ-модель).**

Как отмечается в работе [5], эффективная ширина полосы СПМ ДС Δf зависит от значения частоты, на которой она образуется. Причем (как показывают эксперименты) она прямо пропорциональна центральной частоте ДС $f = f_1$ и составляет (0,03–0,3)% от значения f_1 .

Случайные искажения, вносимые гидроакустическим каналом при распространении сигнала, а также доплеровские преобразования, вызванные кинематикой шумящего объекта и носителя ГАС шумопеленгования, приводят к дополнительному увеличению ширины полосы Δf до $\approx 0,5\%$ от значения f_1 . Но при этом сохраняются масштабные свойства СПМ отдельных ДС или общей СПМ всего звукоряда. То есть относительная полоса СПМ каждой отдельной ДС (или ДС, входящих в состав звукоряда, образованного одним общим источником) всегда является постоянной величиной и имеет порядок:

$$(4) \quad \beta = \frac{\Delta f}{f} = 0,0003 \div 0,005.$$

Другими словами, эффективная полоса ДС является линейной функцией ее центральной частоты:

$$\Delta f = \beta f_1.$$

Соответственно, эффективная полоса каждой k -й гармоники в звукоряде также является линейной функцией частоты:

$$\Delta f_k = k\beta f_1,$$

а общая СПМ всего звукоряда из K ДС обладает масштабными (мультипликативными) свойствами в области частоты.

Данные соотношения положены в основу более точной МЧ-модели СПМ узкополосного шума в виде отдельной ДС или широкополосного шума в виде ЗР ДС, учитывающей масштаб-

ные свойства ДС [8, 9, 10, 12]. Ниже приводится описание этой модели:

1. СПМ отдельной ДС с центральной частотой f_1 может быть представлена в виде:

$$G_{ДС}(f) = \alpha_0 G_0[\alpha_0(f - f_1)],$$

где $G_0(f)$ – моделирующая СПМ, локализованная в области нулевой частоты (задающая общую форму СПМ ДС);

α_0 – масштабный коэффициент, соответствующий мультипликативному преобразованию (сжатию) исходной СПМ $G_0(f)$;

f_1 – сдвиг частоты, соответствующий конкретному значению центральной частоты ДС.

Выбранные значения α_0 и f_1 однозначно определяют требуемую относительную полосу ДС $-\beta$ (4).

2. Для широкополосного шума в виде звукоряда из K ДС масштабно-частотная модель СПМ описывается путем представления общей СПМ ЗР в виде суммы расширяющихся в k раз СПМ основной гармоники, где в качестве масштабного коэффициента выступает номер гармоники k [9, 12]:

$$(5) \quad G_{ЗР}(f) = \sum_{k=1}^K G_{ДС_k}(f) = \sum_{k=1}^K \frac{1}{k} G_{ДС_1}\left(\frac{f}{k}\right) = \sum_{k=1}^K \frac{\alpha_0}{k} G_0\left(\alpha_0\left(\frac{f}{k} - f_1\right)\right).$$

Таким образом, масштабно-частотная модель (5) является эвристической и основана на трех предположениях:

- известна $G_0(f)$ – моделирующая СПМ;
- СПМ всех ДС звукоряда подчиняются мультипликативному преобразованию исходной СПМ $G_0(f)$;
- эффективная ширина полосы каждой k -й ДС в звукоряде является линейной функцией от номера гармоники k .

МЧ-модель лишь констатирует факт расширения ДС звукоряда с ростом номера гармоники k . При этом не учитывается, что каждая ДС обладает своей энергией, значение максимума которой также зависит от эффективной ширины полосы ДС («размывание» ДС). Тем не менее во многих задачах обнаружения ДС и ЗВ МЧ-модели бывает достаточно.

Альтернативой решения задачи обнаружения ДС и ЗВ является задача разрушения когерентной структуры ДС, порождает

мых работой корабельного оборудования, с целью снижения их заметности в гидроакустическом поле. Одним из применяемых с этой целью методов является метод модуляции частоты вращения [3, 4]. Существо этого метода сводится к следующему.

Пусть угловая скорость агрегата непостоянна и характеризуется изменением во времени в виде

$$\omega(t) = \omega_1 + f(t),$$

тогда (при $\left| \frac{f(t)}{\omega_1} \right| \ll 1$) основная гармоника колебания конструкции описывается [4] формулой

$$x(t) = A\omega_1^2 \cos \left[\omega_1 t + \int_0^t f(t) dt + \varphi_0 \right].$$

Данное выражение описывает колебание, модулируемое по частоте, а функция $f(t)$ называется модулирующим сигналом.

В работе [6] было показано, что спектры $F(\omega)$ модулирующего сигнала $f(t)$ и частотно-модулируемого (ЧМ) сигнала $S_x(\omega)$ связаны нелинейным интегральным уравнением

$$S_x(\omega) = \frac{(\omega_1^2 A)^2}{2\pi} \int_0^\infty \exp \left\{ -\int_0^\infty F(u) \frac{1 - \cos u\tau}{u^2} du \right\} \cos(\omega - \omega_1)\tau d\tau.$$

В общем случае данное уравнение решения не имеет.

Решение этого уравнения даже для случая одной ДС возможно только для некоторых частных случаев с введением множества ограничений и предположений и очень громоздко. В случае ЗР аналитическое решение найти практически невозможно. Поэтому представляет интерес создание простой модели, позволяющей оценивать изменения СПМ шумоизлучающего механизма в случае применения метода модуляции частоты вращения.

Целью настоящей работы является разработка на основе теории случайных функций новой математической модели звукоряда. Модель должна быть существенно более простой, чем модель, основанная на методе модуляции частоты вращения, учитывать физические особенности процесса шумообразования, такие как частотно-фазовая зависимость всех ДС звукоряда и

различную энергию каждой из его ДС, и позволять оценивать изменения в СПМ шумоизлучающего механизма при изменении в параметрах модуляции частоты вращения.

2. Стохастическая модель звукоряда

Рассмотрим гармонику (ДС) с фиксированной частотой Ω и случайной фазой Ψ :

$$(6) \quad X_1(t) = A \cos(\Omega t + \Psi) = U \cos(\Omega t) + V \sin(\Omega t),$$

где $X_1(t)$ – случайная функция от угла $\Psi \in [-\pi, \pi]$; U и V – некоррелированные случайные величины с нулевым математическим ожиданием и с одинаковыми дисперсиями, равными D ; t – время.

Используя формулу (6), сформируем звукоряд, состоящий из K гармоник и описываемый формулой

$$(7) \quad X(t) = \sum_{k=1}^K (U_k \cos(k\Omega t) + V_k \sin(k\Omega t)),$$

где $U_1, \dots, U_K, V_1, \dots, V_K$ – некоррелированные случайные величины с нулевым математическим ожиданием и дисперсиями $D(U_k) = D(V_k) = D_k$. Очевидно, при условии, что $U_1, \dots, U_K, V_1, \dots, V_K$ равны постоянным величинам, формула (7) сводится к формуле (3), т.е. к частотной модели.

Случайная функция $X(t)$ стационарна в широком смысле [7] и ее корреляционная функция определяется формулой

$$(8) \quad K_x(\tau) = \sum_{k=1}^K D_k \cos(k\Omega \tau).$$

На практике частота $\Omega \neq \text{const}$, а колеблется в определенном интервале частот, определяемом динамическими характеристиками шумоизлучающего механизма и параметрами системы стабилизации его частоты вращения.

Предположим, что в формуле (7) частота Ω – случайная величина с плотностью вероятности $p(\omega)$, заданной на пространстве $\Omega = (0, \omega)$. Таким образом, функция $X(t)$ является случайной функцией от Ω . В дальнейшем будем называть эту модель стохастической моделью (С-моделью).

Корреляционная функция (8) для фиксированной частоты Ω в случае, если Ω – случайная величина с плотностью вероятности $p(\omega)$, преобразуется, с учетом формулы полной вероятности, к виду

$$K_x(\tau) = \int_0^\infty \sum_{k=1}^K D_k p(\bar{\omega}) \cos(k\bar{\omega}\tau) d\bar{\omega} = \sum_{k=1}^K D_k \int_0^\infty p(\bar{\omega}) \cos(k\bar{\omega}\tau) d\bar{\omega}.$$

Для действительной стационарной случайной функции $X(t)$ на основании формул Эйлера по корреляционной функции $K_x(\tau)$ можно определить ее спектральную плотность [7] по формуле

$$\begin{aligned} S_x(\omega) &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty K_x(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \sum_{k=1}^K D_k \left[\int_0^\infty p(\bar{\omega}) \cos(k\bar{\omega}\tau) d\bar{\omega} \right] \cos(\omega\tau) d\tau = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty p(\bar{\omega}) d\bar{\omega} \sum_{k=1}^K D_k \int_0^\infty \cos(k\bar{\omega}\tau) \cos(\omega\tau) d\tau = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty p(\bar{\omega}) d\bar{\omega} \sum_{k=1}^K D_k \int_0^\infty [\cos(k\bar{\omega} - \omega)\tau + \cos(k\bar{\omega} + \omega)\tau] d\tau = \\ &= \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty p(\bar{\omega}) d\bar{\omega} \sum_{k=1}^K D_k \int_0^\infty [e^{j(\omega - k\bar{\omega})\tau} + e^{-j(\omega - k\bar{\omega})\tau} + e^{j(\omega + k\bar{\omega})\tau} + e^{-j(\omega + k\bar{\omega})\tau}] d\tau = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^\infty \sum_{k=1}^K D_k [\delta(\omega - k\bar{\omega}) + \delta(\omega + k\bar{\omega})] p(\bar{\omega}) d\bar{\omega} = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^\infty \sum_{k=1}^K \frac{D_k}{k} [\delta(\omega - \mu) + \delta(\omega + \mu)] p\left(\frac{\mu}{k}\right) d\mu = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \frac{D_k}{k} p\left(\frac{\omega}{k}\right) \quad (-\infty < \omega < \infty) \end{aligned}$$

Для действительной стационарной случайной функции достаточно задать спектральную плотность в диапазоне положительных частот

$$G_x(\omega) = 2S_x(\omega) = \sum_{k=1}^K \frac{D_k}{k} p\left(\frac{\omega}{k}\right), \quad 0 \leq \omega < \infty.$$

Если математическое ожидание $\Omega - m_\Omega = \omega_1$, то эта формула приобретает вид

$$(9) \quad G_x(\omega) = \sum_{k=1}^K \frac{D_k}{k} p\left(\frac{\omega - k\omega_1}{k}\right), \quad 0 \leq \omega < \infty.$$

Используя формулу (9) легко показать, что, если дисперсия $\Omega - \sigma^2$, то с ростом σ^2 от σ_1^2 до σ_2^2 максимальное значение СПМ k -й гармоники уменьшается в $\Delta = \sigma_2/\sigma_1$ раз или на $\Delta_{дБ} = -10\lg\Delta$ дБ. Этот результат, в общем, совпадает со случаем модуляции гармонического сигнала узкополосным шумом.

Сравним формулы (5) и (9).

Формула (5) дает оценку общей СПМ ЗР в виде суммы расширяющихся в кратное число раз СПМ первой гармоники, ширина и вид которой известны (или известна ее оценка).

Формула (9) содержит два множителя:

– D_k/k – дисперсия k -й гармоники, которая, в отличие от Ч-модели и МЧ-модели нормируется номером гармоники k ;

– $p(\omega/k)$ – нормированная к номеру гармоники k плотность вероятности случайной величины Ω (частоты основной гармоники).

Таким образом, для случая одной гармоники С-модель и МЧ-модель полностью совпадают. Ширина СПМ k -й гармоники растет пропорционально k для обеих моделей, максимальное значение СПМ k -й гармоники для С-модели уменьшается пропорционально $1/k^2$.

МЧ-модель декларирует, что СПМ описывается путем представления общей СПМ ЗР в виде суммы расширяющихся в кратное число раз СПМ основной гармоники, где в качестве масштабного коэффициента выступает номер гармоники k . С-модель математически доказывает этот факт.

Для МЧ-модели параметр «энергия ДС» – D_k вообще не учитывается. Наличие множителя $1/k^2$ объясняет тот факт, что в ЗР не наблюдается высоких гармоник – они маскируются широкополосным шумом.

3. Результаты математического моделирования

Для подтверждения справедливости стохастической модели на языке MATLAB была создана программа, генерирующая звукоряд (7) с заданными D_k , $p(\omega)$ и частотой первой гармоники. Для получения СПМ этого ЗР методом БПФ проводится его спектральный анализ. Ниже приведены результаты моделирования для двух моделей – Ч-модели и С-модели.

На рис. 1 приведены временные реализации сигнала, содержащего одну ДС, для Ч-модели и С-модели при условии, что центральная частота для С-модели совпадает с частотой Ч-модели, а $D_1 = A_1^2 = 1$.

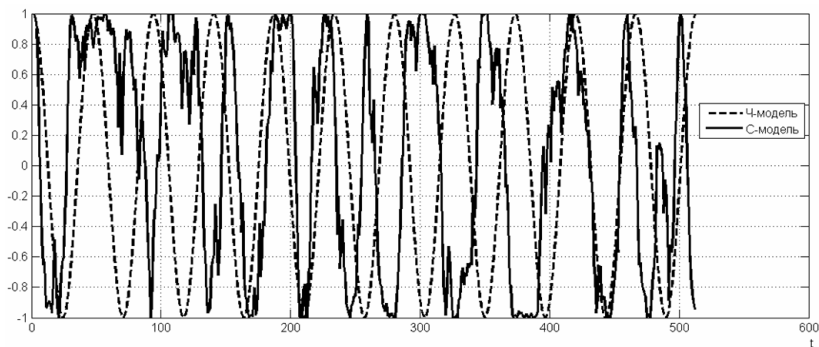


Рис. 1. Пример временных реализаций сигнала для Ч-модели и С-модели

На рис. 2 для Ч-модели приведена СПМ звукоряда, состоящего из четырёх гармоник с одинаковыми амплитудами $A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = 1$, числом временных отсчетов $n = 8192$ и $f_1 = 900$ у.е. (в единицах разрешения по частоте для БПФ).

На рис. 3 для С-модели приведена СПМ этого же звукоряда при $D_1 = D_2 = D_3 = D_4 = 1$ и плотностью вероятности $p(\omega)$, описываемой нормальным законом распределения (программа «randn»). Для получения состоятельной оценки СПМ проведено сглаживание по 32 реализациям.

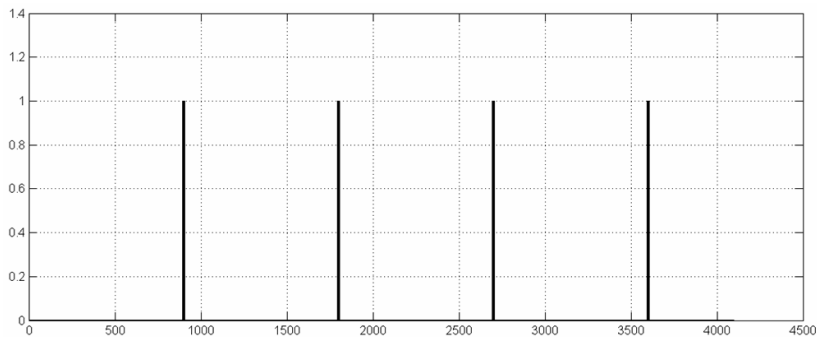


Рис. 2. Энергетический спектр сигнала для Ч-модели

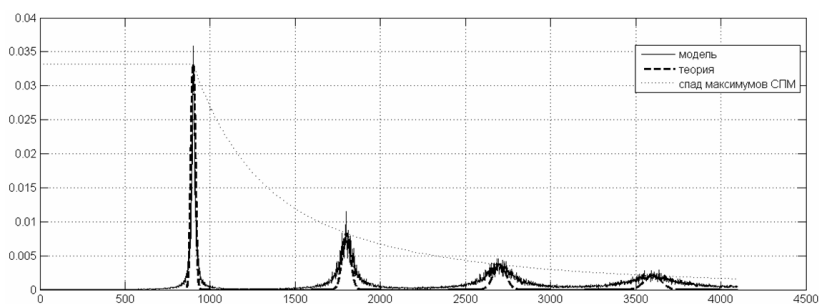


Рис. 3. Энергетический спектр сигнала для С-модели

Из приведенной на рис. 3 СПМ можно получить следующие данные:

- оценка максимума СПМ для первой гармоники равна 0,033, для второй гармоники равна 0,008, для третьей гармоники равна 0,0035, для четвертой гармоники равна 0,002; максимальное значение СПМ k -й гармоники уменьшается пропорционально $1/k^2$, т.е. совпадает с теоретическим значением, рассчитанным по формуле (9);

- ширина ДС на уровне 0,5 максимума СПМ (соответствует уровню -3дБ) для первой гармоники приблизительно равна (в у.е.) 13, для второй гармоники равна 28, для третьей гармоники – 54, для четвертой – 81, т.е. с ростом номера гармоники k ДС расширяется больше значения, рассчитанного по форму-

ле (9), что можно объяснить наличием шума дискретизации при моделировании.

Таким образом, с увеличением номера k ширина ДС увеличивается линейно, а величина максимума СПМ ДС спадает согласно квадратичному закону, что полностью соответствует формуле (9).

При сравнении рис. 2 и рис. 3 видно, что при заданных параметрах моделей максимум первой гармоники для С-модели (0,0332) на 14,8 дБ меньше, чем у Ч-модели (1,0).

Из рассмотренного выше примера можно сделать вывод, что при «подмешивании» в контур управления системы стабилизации частоты вращения какого-либо механизма шумоподобного сигнала происходит существенное «размывание» дискретных составляющих в спектре его шумоизлучения.

4. Заключение

Описание звукоряда эвристической масштабнo-частотной моделью (5) является более точным, чем описание частотной моделью (3), так как кроме определения места ДС в ЗР можно оценить ее ширину, зная СПМ первой гармоники. Однако использовать эту модель в задачах моделирования, исследования и проектирования шумоизлучающих механизмов затруднительно, так как МЧ-модель является «констатирующей» и не учитывает реальные физические процессы шумоизлучения.

Рассмотренная выше стохастическая модель звукоряда (9) является более полной по сравнению с МЧ-моделью, так как учитывает физические процессы шумоизлучения и позволяет оценить как ширину каждой ДС звукоряда, так и уменьшение максимума СПМ для каждой ДС в зависимости от изменения дисперсии случайной величины Ω (первой гармоники). Эта модель является существенно более простой, чем модель, основанная на методе модуляции частоты вращения, но позволяет сделать оценку изменений в СПМ k -й гармоники звукоряда (расширение полосы и уменьшение максимального значения

СПМ) при нестабильной частоте вращения механизма без использования достаточно сложной теории модуляции сигнала.

Такая модель может найти применение при моделировании и разработке устройств обнаружения узкополосных шумовых сигналов [9, 10] и при исследовании и моделировании методов воздействия на когерентную структуру узкополосных процессов, порождаемых работой корабельного оборудования, с целью снижения их заметности в гидроакустическом поле [3, 4].

Литература

1. БОЛГОВ В.М., ПЛАХОВ Д.Д., ЯКОВЛЕВ В.Е. *Акустические шумы и помехи на судах*. – Л.: Судостроение, 1984. – 192 с.
2. БУРДИК В.С. *Анализ гидроакустических систем*. – Л.: Судостроение, 1988. – 392 с.
3. ВЛАСОВ С.В., ГЕНКИН М.Д., МЕДВЕДКОВ А.М., НОВИКОВ А.К. *Модуляция вибраций и ее применение для виброгашения* // Акустический журнал. – 1983. – Т. 29, №4. – С. 564–566.
4. ГЛАЗОВ Ю.Е., РАКИТИНА И.С., ЭПЕНДИЕВ М.Б., ГЛАЗКОВА В.Н., МЕЛЬНИКОВА Е.А. *Методы снижения заметности узкополосных процессов в гидроакустическом поле морских подвижных объектов (краткий обзор)* // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2009. – №3. – С. 69–76.
5. ГОРБАНЬ И.И. *Обработка гидроакустических сигналов в сложных динамических условиях*. – Киев: Наукова думка, 2008. – 276 с.
6. ЛЕВИН Б.Р. *Теоретические основы статистической радиотехники*. – Т. 1. – М.: Советское радио, 1969. – 752 с.
7. ПУГАЧЕВ В.С. *Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления*. – М.: Физматгиз, 1962. – 884 с.
8. РОХМАНИЙКО А.Ю. *Масштабно-частотная модель первичного гидроакустического поля кораблей в виде звуко-*

- ряда // Морская радиоэлектроника. – 2012. – №3(41). – С. 30–31.
9. РОХМАНИЙКО А.Ю., ЯКУНИН К.В., САПРЫКИН В.А., МАЛЫЙ В.В., ЕСИПОВ В.С. «Устройство обнаружения шумовых гидроакустических сигналов в виде звукоряда на основе вычисления интегрального вейвлет-спектра». Патент на изобретение РФ № 2464588 от 20.10.2012 с приоритетом от 15.06.2011.
 10. САПРЫКИН В.А., МАЛЫЙ В.В., ШАТАЛОВ Г.В. «Устройство обнаружения узкополосных шумовых гидроакустических сигналов на основе вычисления интегрального вейвлет-спектра». Патент на изобретение РФ № 2367970 от 20.09.2009 с приоритетом от 24.12.2007.
 11. УРИК Р.Дж. *Основы гидроакустики*. – Л.: Судостроение, 1978. – 446 с.
 12. ШАТАЛОВ Г.В. *Моделирование узкополосного шума в виде отдельных дискретных составляющих и широкополосного шума в виде звукорядов* // Морская радиоэлектроника. – 2010. – №2(32). – С. 38–41.

STOCHASTIC MODEL OF HARMONIC SERIES

Igor Rudko, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand.Sc. (igor-rudko@mail.ru).

Abstract: We develop mathematical models for discrete components and harmonic series in an energy spectrum of rotating equipment and machinery noise emission. Using the theory of random functions we build a stochastic model of harmonic series, which is more realistic than existing heuristic models. The proposed stochastic model can be used in modeling and designing of detection devices narrowband signals, as well as in studying, modeling, and designing vibration damping devices.

Keywords: discrete components, harmonic series, spectral power density, the theory of random functions.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии А.П. Курдюковым

*Поступила в редакцию 18.09.2014.
Опубликована 31.05.2014.*