

УДК 621.452.3.018.2:628.517.2

В. Н. ЖУРАВЛЁВ¹, Т. В. КРИТСКАЯ²¹ *ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина*² *Запорожская государственная инженерная академия, Запорожье, Украина*

АНАЛИЗ МЕТОДИКИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОПРАВКИ НА ТОНАЛЬНОСТЬ ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ ГТД НА СООТВЕТСТВИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИМ ТРЕБОВАНИЯМ ПО ШУМУ

Рассматривается задача, суть которой состоит в анализе методики применения поправки на тональность при стендовых испытаниях газотурбинных двигателей на соответствие экологическим требованиям. Доказано, что на экологические свойства сигнала влияет закон модуляции его тональных составляющих. Тоновые сигналы неизменной частоты с единичным индексом амплитудной модуляции идентифицируются центральной нервной системой как чистый тон и не могут быть определены как неблагоприятные. К таким сигналам, при стендовых испытаниях газотурбинных двигателей, относятся все составляющие деталей двигателя, которые вращаются с неизменной круговой частотой. Показано, что применение метода спектрального анализа для сигналов, у которых не определены параметры стационарности, приводит к неопределённой методической погрешности, которая не учтена в традиционной методике. Определение значения параметра тональности, который определяет поправку ухудшения шумовой оценки объекта, строго не обосновано и носит случайный характер. Предложена методика экологического ранжирования сигнала шума в приложении к биообъектам, которая предполагает интеллектуальный алгоритм обработки сигналов, соответствующий работе речевых зон центральной нервной системы человека.

Ключевые слова: газотурбинные двигатели, защита окружающей среды, шум, тоновая составляющая, стендовые испытания.

Введение

При создании и доводке газотурбинных двигателей (ГТД) все большее значение приобретает задача обеспечения требований авиационной экологии [1]. Ограничение шума двигателей оказывает влияние, как на общее конструктивное решение его систем, так и их взаимодействие с системами самолёта.

Таким образом, важной и актуальной задачей современного двигателестроения является объективная оценка уровней шума ГТД при его стендовых испытаниях, которая позволит оценить ожидаемые уровни шума в составе воздушного судна.

1. Постановка задачи

В действующих нормативных методических документах [2] существует классификация шума по временным и частотным характеристикам. Классификация базируется на совокупности параметров сигнала шума $s(t)$ и ранжирует шумы по степени отрицательного влияния на состояние человека. Все шумы делятся на постоянные (наименее вредные) и непостоянные, которые классифицируются как тональные. Величина параметра тональности определяет поправку ухудшения шумовой оценки объекта,

значения которой колеблется от 3 до 7 дБ что, в большинстве случаев, достаточно для принципиального изменения результата экологической экспертизы либо констатации неэффективности проведённых доработок двигателя.

Критические параметры сигнала шума, определяющие наличие параметра тональности, оцениваются в третьоктавных спектральных полосах и предполагают наличие разницы с соседних полосах от 3 [2] до 10 [3] дБ в зависимости от методики применяемого стандарта.

Поэтому обоснование применения поправки заслуживает внимательного рассмотрения с позиции как психофизиологической оценки влияния параметров сигнала шума, так и методов его обработки. Тем более, что ресурсы современных цифровых приборов позволяют вести разнообразную обработку результатов непосредственно в ходе измерения. Например, анализировать выполнение критериев специального вида шума при его измерении.

Классификация шума содержится в [4–9]. К сожалению, приведенные в них определения и критерии не всегда согласуются между собой, что свидетельствует о незавершённости определения процессов влияния тоновых составляющих шума на его санитарно-гигиеническую оценку.

2. Анализ психофизиологических процессов в слуховой системе при реакции на воздействие акустических сигналов

Все воспринимаемые человеком акустические сигналы можно разделить на три группы по параметру влияния на состояние организма: нейтральные – не влияют; благоприятные – улучшают состояние и неблагоприятные – ухудшают состояние. Первые не входят в сферу анализа данной работы. Ко вторым можно отнести звуки речи и музыкальные сигналы, к третьим – все сигналы, определяемые как шумы в нормативных документах [2–3] экологической экспертизы.

Отметим противоречие. В печати приводятся факты, что производственные шумы, характеризующиеся звуковым давлением 70 дБ, вызывают нарушение эндокринной и нервной систем. Однако звуковое давление акустических сигналов симфонического оркестра характеризуется оценкой (75 – 80) дБ и его звучание относят к благоприятным воздействиям. С целью пояснения этого противоречия проведем краткий анализ работы слуховой системы человека при приеме благоприятных акустических сигналов, в частности речевых либо музыкальных.

В современной науке о речеслуховом процессе, фундаментальным понятием, введенным Гельмгольцем в 1863 г., является «тоновая (спектральная) чувствительность» слуха (Tonempfindungen, нем.). Под термином «тон» Гельмгольц понимал частотную составляющую сложного звука (волнового пакета).

Спектральная модель слуховой системы. Фундаментальные общепризнанные исследования слуховой систем человека основываются на гармонической (спектральной) модели речевого сигнала в полосе тональных частот (150–7100) Гц, которая охватывает частоты первых трёх формант и антиформанты. Модель адекватна природным процессам в качестве первого приближения, в котором анализируются объемные акустические параметры сигнала речи, в частности – давление и плотность вещества линии связи. Изменение параметра энергии $E_s(t)$ звукового давления в веществе канала связи во времени определяет информацию $I(t) = f[E_s(t)]$ речевого либо музыкального сигнала $s(t)$. Можно представить речевой процесс [10] в виде математической модели модуляции несущего сигнала $s_g(t)$ модулирующей функцией $I(t)$

$$\begin{aligned} s(t) &= \text{Md}[I(t), s_g(t)] \\ s_g(t) &= f(t, a_i), i \in 1..n, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\text{Md}[\dots]$ – оператор модуляции, a_i – параметр, определяющий форму несущего сигнала.

Современные модели слуховой системы [11] рассматривают процесс приема акустических сигналов на базе понятий классической аэродинамики, т.е. анализируют, усреднённые в некотором объёме V вещества канала связи, параметры градиента скорости $\bar{v}(x, y, z, t)$, давления $\bar{p}(x, y, z, t)$ и плотности $\bar{\rho}(x, y, z, t)$. Учитывая, что эти параметры связаны между собой формулой Лапласа для скорости звука, и акустоэлектрические преобразователи чувствительны к изменениям градиента давления, выражение (1) можно представить в виде $s(t) = \text{Md}[I(t), \bar{p}(x, y, z, t)]$. Таким образом, непрерывную модель акустически благоприятного звука $s_m(t)$, можно представить следующим выражением [10]:

$$\begin{aligned} k(t) &= \sum_i A_i(t) \cos[\omega_{k_i} t + \Psi_i(t)] = f[I(t)], \\ s_m(t) &= \text{Md}_{\Psi} \left[k(t), \sum_j s_{\text{for}_j}(\omega_{\text{for}_j}, t) \right], \\ t &\in (\text{Tr}), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Psi_i(t)$, ω_{k_i} – фазовый угол и угловая частота i -ой кинемы, $g(\omega_{\text{for}_j}, t)$ – несущий сигнал j -ой форманты, Tr – интервал стационарности. Сигнал $s_m(t)$ принадлежат гильбертову пространству с конечной мощностью $N_m(\omega_g, t), t \in (\text{Tr})$ внутри интервала времени Tr . Его спектральная функция в полосе частот $\omega_{\text{for}} \in (\Delta\Omega_{\text{for}})$ не содержит дельта функций и разрывов.

Примером информационно-модулированного сигнала может быть представленная на рис. 1 временная функция звукового давления при произношении слова «акула».

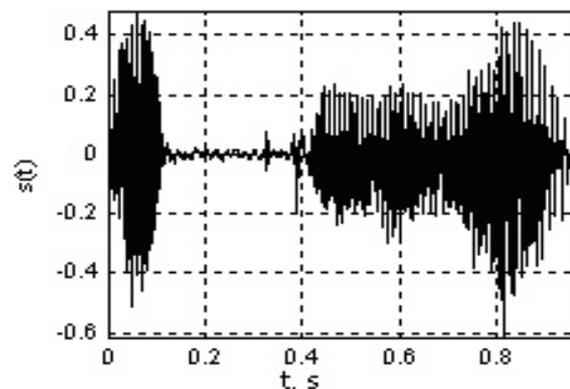


Рис. 1. Временная функция звукового давления при произношении слова «акула»

Психофизическая модель слуховой системы. Слуховая система является приемником информации, т.е. формы и информационного содержания звуков речи. Наиболее доступны и хорошо изучены [12] физиологические органы (рис. 2) и процессы обработки звуковых сигналов в периферической части слуховой системы.

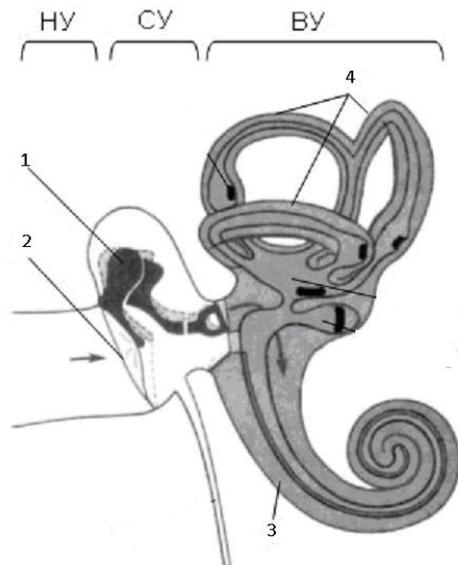


Рис. 2. Аппарат сенсорной системы слуха и чувства равновесия:

НУ – наружное ухо, **СУ** – среднее ухо,
ВУ – внутреннее ухо (лабиринт),

1 – слуховые косточки среднего уха, 2 – барабанная перепонка; 3 – улитка, 4 – полукружные каналы

Она, в соответствии с современными теориями, выполняет функции: амплитудно-адаптивного акустомеханического усилителя (среднее ухо), который, под управлением центральной нервной системы (ЦНС) нелинейно изменяет свой субъективный комплексный коэффициент передачи; психофизиологического анализатора параметров речевого сигнала и механико-электрического преобразователя (внутреннее ухо - лабиринт), который осуществляет идентификацию информационных признаков речевого сигнала, преобразует их в дискретные двоичные электрические импульсы, поступающие по нервным волокнам в зону Вернике ЦНС. В зоне Вернике принятый сигнал сравнивается с образами ранее накопленных информационных сигналов. В случае совпадения принятого сигнала с сигналом из базы накопленных, формируется сигнал отоакустической эмиссии [13], который поступает на рецептор внутреннего уха. Сигнал эмиссии управляет внешними волосковыми клетками основной мембраны внутреннего уха и представляет собой внутренний (для системы рецептор–ЦНС) образ идентифицируемого сигнала. Данный процесс можно представить

как оптимальный (корреляционный) прием временной функции акустического сигнала.

Особое внимание нужно обратить на полукружные каналы, которые являются датчиками равновесия и положения тела в пространстве. Каналы гидравлически объединены с полостью внутреннего уха веществом перилимфы. Этой связью поясняются факты потери равновесия и ориентации в пространстве при воздействии импульсных звуков большого уровня. Важно отметить, что сигнал отоакустической эмиссии компенсирует колебания основной мембраны улитки таким образом, что отсутствуют перемещения барабанной перепонки и движения перилимфы в области полукружных каналов.

Музыкальные акустические сигналы, так же как и речевые, можно описать моделью (2). Они состоят из конечного количества сигналов нот с разной несущей частотой, амплитуда которых не изменяется, либо меняется незначительно в соответствии с параметром декремента затухания деталей музыкального инструмента.

Для случая воздушного судна, которое находится в процессе взлёта либо посадки, необходимо учитывать эффект Доплера, как для скорости самолёта, так и скорости ветра. Составляющая скорости ветра случайна и векторно суммируется со скоростью самолёта. Модель данного сигнала описывает процесс со случайными параметрами, поэтому выражение (2) может быть представлено:

$$s(t) = Md_{\Psi} \left[k_n(t), \sum_j s_{\text{тон}_j}(\omega_{\text{тон}_j}, v_o, v_v, t) \right], \quad (3)$$

$$t \in (T_p],$$

где $k_n(t)$ – функция изменения параметров планера, которая влияет на его резонансные частоты и модулирует тоновый сигнал $s_{\text{тон}_j}^*$; v_o – скорость самолёта; v_v – скорость ветра.

Сигналы промышленного шума, не принадлежащие пространству, которое описывается моделями благоприятных сигналов (1), (2) и не идентифицируются в зоне Вернике ЦНС. Вследствие этого сигнал отоакустической эмиссии не компенсирует колебания основной мембраны внутреннего уха и психофизиологические процессы идентификации происходят непрерывно (неприродно), что вызывает преждевременную усталость и деструктивные изменения физиологических органов. Постоянные перемещения перилимфы в улитке внутреннего уха влияют на работу рецепторов полукружных каналов, что нарушает координацию движений и чувство равновесия человека. Можно отметить разрешение противоречия, которое заключается в том, что идентифицируемые сигналы могут поступать в слуховую

систему с большим уровнем, чем приведены в нормативной документации, не нанося при этом психофизиологических травм.

Можно сделать **первый промежуточный вывод**.

На экологические свойства сигнала влияет закон модуляции (2) его тоновых (частотных) составляющих. Тоновые сигналы неизменной частоты с единственным индексом амплитудной модуляции идентифицируются ЦНС как чистый тон и не могут быть определены как неблагоприятные. К таким сигналам, при стендовых испытаниях ГТД, относятся все составляющие деталей двигателя, которые вращаются с неизменной круговой частотой.

3. Анализ погрешности метода оценки тоновых составляющих в шумах ГТД

Для оценки погрешности метода, предложенного в методике (1) проведем анализ адекватности его применения [14] при оценке наличия тоновых составляющих в сигналах шума.

В методике ИСАО применён наиболее распространённый и интуитивно понятный метод спектрального анализа. Учитывая требования и ограничения, предъявляемые спектральными методами [15] к функции $s(t)$, проведём теоретический анализ соответствия им характеристик и параметров сигнала шума ГТД.

Для применения спектрального метода в [2] модель (3) упрощена до спектральной модели путём исключения функциональной зависимости составляющих сигнала шума от динамических параметров планера и случайного изменения величины и направления его вектора скорости:

$$\begin{aligned} s(\omega, t) &= \sum_j A_j(t) \exp(-j\omega_j t), \\ t &\in [T_p], \\ \omega &\in [\Delta\Omega], \Delta\Omega = (50 - 10000)\text{Hz}, \end{aligned} \quad (4)$$

при этом предполагается, что, в случае принятия гипотезы о локальном постоянстве параметров тоновых сигналов на интервале времени анализа T_p , функция распределения плотности вероятностей амплитуд $A(t)$ сигнала шума детерминирована и подчиняется нормальному закону распределения. В методике [2] отсутствуют требования определения свойства «квазистационарности» сигналов (4), поэтому применение метода спектрального анализа, мягко говоря, строго не обосновано.

Проведём оценку погрешности применения метода.

В основе спектральной математической модели лежит метод обратимых преобразований сигнала

$s(t)$ по системе ортогональных функций. Главное достоинство таких преобразований состоит в том, что они позволяют представить сигнал шума в виде конечной суммы j независимых детерминированных составляющих $s(t) = \sum_j a_j \psi_j(t)$.

В существе современного спектрального подхода можно выделить две основные идеи: синтеза и анализа информационной и идентификационной (по отношению к детали двигателя) составляющих шума. Под спектральным синтезом сигнала понимается процесс информационного генерирования деталями двигателя детерминированных ортогональных составляющих $a_j \psi_j(t)$ с их пространственным суммированием. Количество j ортогональных составляющих и значения их весовых коэффициентов a_j аутентифицируют информационную и идентификационную составляющие. Под спектральным анализом, соответственно, понимается процесс информационного разложения сигнала $s(t)$ на ортогональные составляющие $a_j \psi_j(t)$ с их последующей информационной обработкой.

Наибольшее применение в спектральном анализе получила система комплексных экспоненциальных функций. При известных выражениях базисных функций $\psi_j(t) = \exp(-j\omega_j t)$ сигнал $s(t)$ однозначно определяется совокупностью коэффициентов a_j и может быть с любой ($j \rightarrow \infty$) степенью точности восстановлен по этим коэффициентам. Таким образом, любая стационарная функция гильбертова пространства может быть представлена в виде комплексного ряда Фурье, который лежит в основе спектральной модели (4). При практических применениях ряд Фурье ограничивается определённым количеством членов j . Ограничение числа членов ряда означает аппроксимацию бесконечномерного сигнала j – мерной системой базисных функций спектра сигнала с определенной методической погрешностью в зависимости от фактического спектра сигнала.

Ограничение интервала суммирования $t \in [T_p]$ временем «квазистационарности» параметров приводит к дополнительным (в сумме с вышеуказанной) погрешностям, которые влияют на информационную адекватность. Кроме того, тригонометрические (и связанные с ними комплексно-экспоненциальные) функции являются собственными (детерминированными на интервале интегрирования T_p) функциями и поэтому пригодны для исследования информационных характеристик и параметров сигналов, у которых изменения парамет-

ров во времени отсутствуют $A(t) = \text{const}$ и $\omega(t) = \text{const}$ (4), т.е. детерминированных.

На рис. 3 приведен фрагмент графика звукового давления сигнала шума, записанного на интервале времени анализа в передней полусфере при стендовых испытаниях двигателя Д18Т. Визуальная оценка девиации амплитуд $A(t)$ на интервале времени анализа $T_p = 55\text{s}$ показывает несоответствие параметров сигнала критериям стационарности.

Корректность определения и локализации тональных составляющих. Разрешающая способность локализации амплитуд и частот спектрального метода определяется принципом неопределённости Гейзенберга – невозможно получить произвольно точное частотно-временное представление сигнала, то есть нельзя определить для какого-то момента времени, какие спектральные компоненты присутствуют в сигнале. Чем меньше окно T_p , тем лучше временное разрешение, но хуже частотное, и наоборот. Кроме того, чем меньше окно, тем более строгими становятся наши предположения о стационарности сигнала в пределах окна.

С позиций анализа сигнала (рис. 3) в частотной области и точного восстановления его после преобразований можно отметить недостатки разложения сигналов в ряды Фурье, отметим основные из них.

Ограниченная информативность анализа на нестационарных временных интервалах и практически полное отсутствие возможностей анализа параметров особенностей сигналов (сингулярностей), т.к. в частотной области происходит «размытие» особенностей сигналов (разрывов, ступенек, пиков и т.п.)

как по окну анализа, так и по всему частотному диапазону спектра. Так, например, преобразование Фурье не различает сигнал с суммой двух синусоид (стационарный сигнал), от сигнала с двумя последовательно следующими синусоидами с теми же частотами (нестационарный сигнал), т.к. спектральные коэффициенты a_j вычисляются интегрированием по всему интервалу T_p анализа сигнала, т.е. идентифицируют качественный спектральный состав. Преобразование Фурье в принципе не имеет возможности анализировать частотные характеристики сигнала в произвольные моменты времени.

Детерминированные тригонометрические собственные базисные функции разложения $\psi_j(t) = \exp(-j\omega_j t)$ не способны в принципе отображать перепады сигналов с бесконечной крутизной изменения параметра, т.к. для этого требуется бесконечно большое число членов ряда. При ограничении числа членов ряда Фурье в окрестностях скачков и разрывов восстановленного сигнала возникают осцилляции (эффект Гиббса).

Второй промежуточный вывод.

Применение метода спектрального анализа для сигналов, у которых не определены параметры стационарности приводит к неопределённой методической погрешности, которая не учтена в методике [2]. Определение значения параметра тональности, который определяет поправку ухудшения шумовой оценки объекта, строго не обосновано и носит случайный характер.

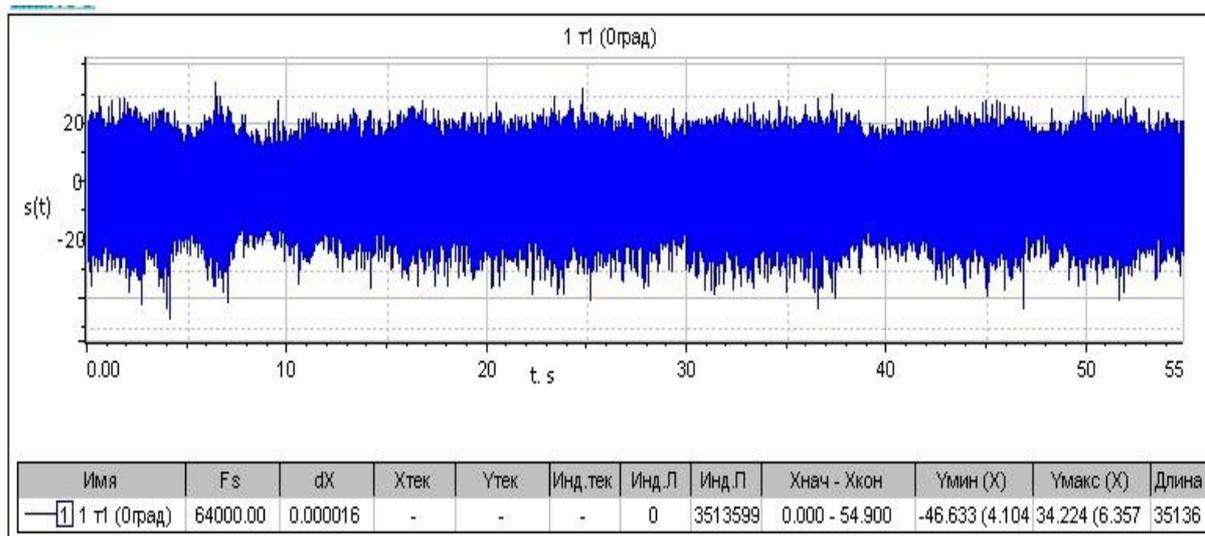


Рис. 3. Фрагмент графика звукового давления сигнала шума, записанного в передней полусфере при стендовых испытаниях двигателя Д18Т

4. Предложения по корректировке методики идентификации неблагоприятных составляющих в шумах ГТД

В соответствии с вышеизложенным анализом, по нашему мнению, необходимо корректировать традиционные методики экологической сертификации воздушных судов по уровню шума. Методика должна предполагать идентификацию нейтральных (суммарный параметр не корректируется), неблагоприятных (суммарный параметр корректируется в сторону ухудшения) и благоприятных (суммарный параметр корректируется в сторону улучшения) шумов. Алгоритм ранжирования, в связи с приложением результата к биообъектам, может быть интеллектуальным и идентичным работе центра Вернике ЦНС [16], т.е. расчёта взаимной корреляционной функции либо коэффициента корреляции сигнала шума воздушного судна с сигналами базы данных "благоприятных" либо "неблагоприятных" сигналов. Как указывалось ранее, ресурсы современных цифровых приборов позволяют вести разнообразную обработку результатов непосредственно в ходе измерения.

Выводы

Проведен анализ методики применения поправки на тональность при стендовых испытаниях ГТД на соответствие экологическим требованиям. На основании результатов анализа можно сделать следующие выводы.

1. На экологические свойства сигнала влияет закон модуляции (2) его тональных (частотных) составляющих. Тоновые сигналы неизменной частоты с единичным индексом амплитудной модуляции идентифицируются ЦНС как чистый тон и не могут быть определены как неблагоприятные. К таким сигналам, при стендовых испытаниях ГТД, относятся все составляющие деталей двигателя, которые вращаются с неизменной круговой частотой.

2. Применение метода спектрального анализа для сигналов, у которых не определены параметры стационарности, приводит к неопределённой методической погрешности, которая не учтена в методике [2]. Определение значения параметра тональности, который определяет поправку ухудшения шумовой оценки объекта, строго не обосновано и носит случайный характер.

3. Предложена методика экологического ранжирования сигнала шума в приложении к биообъектам, которая предполагает интеллектуальный алгоритм обработки сигналов, соответствующий работе речевых зон центральной нервной системы человека.

Литература

1. Картышев, О. А. Проекты санитарно-защитных зон аэропортов, аэродромов и посадочных площадок как основа оценки соответствия их деятельности экологическим требованиям [Текст] / О. А. Картышев, Н. И. Николайкин // Научный Вестник НТУ МГТУ ГА. Сер. : Машиностроение и машиноведение. – М. : НТУ МГТУ ГА. - 2017. – № 4 (20). – С. 146-153.
2. Охрана окружающей среды. Авиационный шум. Том 1. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. [Текст] // ИКАО. – М., 2014.
3. ГОСТ 23337-2014 Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий. [Текст]. – М. : Стандартинформ, 2016.
4. ГОСТ 12.1.003. «Шум. Общие требования безопасности» [Текст]. – М. : Стандартинформ, 2013.
5. СН 2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки [Текст]. – М. : Стандартинформ, 1997.
6. ГОСТ Р 53187-2008. Акустика. Шумовой мониторинг городских территорий [Текст]. – М. : Стандартинформ, 2009.
7. ГОСТ 31296.1-2005 (ISO 1996-1:2003). Шум. Описание, измерение и оценка шума на местности. Часть 1. Основные величины и процедуры оценки. [Текст]. – М. : Стандартинформ, 2004.
8. ГОСТ 31296.2-2006 (ISO 1996 - 2:2007). Шум. Описание, измерение и оценка шума на местности. Часть 2. Определение уровней звукового давления [Текст]. – М. : Стандартинформ, 2008.
9. ГОСТ 31301—2005 (ISO 15664:2001). Шум. Планирование мероприятий по управлению шумом установок и производств, работающих под открытым небом [Текст]. – М. : Стандартинформ, 2014.
10. Журавлёв, В. Н. Синергетический процесс передачи энергии речевого сигнала [Текст] / В. Н. Журавлёв // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. – К., 2010. – № 1. – С. 29-42.
11. Фланаган, Дж. Анализ, синтез и восприятие речи [Текст] : пер. с англ. / Дж. Фланаган ; под ред. А. А. Пирогова. – М. : Связь. - 1968. – 396 с.
12. Бекеши, Г. Механические свойства уха. [Текст]. Т. 2 : Экспериментальная психология / Г. Бекеши, В. А. Розенблит. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. – 1035 с.
13. Найда, С. А. Объективная аудиометрия на основе формулы среднего уха – новый метод исследования и дифференциальной диагностики слуха. [Текст] / С. А. Найда // Электроника и связь. – 2004. – № 23. – С. 66–70.
14. Журавлёв, В. Н. Методическая адекватность спектральной модели в задаче технического диагностирования роторных деталей редукторов

ГТД / В. Н. Журавлёв, А. В. Папчёнков, С. А. Борзов // *Вестник двигателестроения*. - 2014. - № 2. - С. 221–228.

15. Сорокин, В. Н. *Теория речеобразования. [Текст] / В. Н. Сорокин*. – М. : Радио и связь, 1985. – 312 с.

16. Журавлёв, В. Н. *Анализ методов и результатов исследований зависимости информационного параметра речевого сигнала от фазовых соотношений его гармонических составляющих [Текст] / В. Н. Журавлёв, И. В. Жуковицкий // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті*. – 2007. – № 3 (65). – С. 8-13.

References

1. Kartyshev, O. A., Nikolaikin, N. I. *Proekty sanitarno-zashchitnykh zon aeroportov, aerodromov i posadochnykh ploshchadok kak osnova otsenki sootvetstviya ikh deyatel'nosti ekologicheskim trebovaniyam [Projects of sanitary-protective zones of the airports, airdromes and airfields as the fundamentals of an estimation of conformity of their activity to ecological requirements]*. *Nauchnyi Vestnik NTU MGTU GA. Seriya: Mashinostroenie i mashinovedenie*, 2017, no. 4 (20), pp. 146-153.

2. *Okhrana okruzhayushchei sredy. Aviatsionnyi shum. Tom 1. Prilozhenie 16 k Konventsii o mezhdunarodnoi grazhdanskoj aviatsii*. [Preservation of the environment. Aviation noise. Volume 1. The application 16 to the Convention on the international civil aircraft] ICAO. Moscow, 2014.

3. *GOST 23337-2014. Shum. Metody izmereniya shuma na selitebnoi territorii i v pomeshcheniyakh zhilykh i obshchestvennykh zdaniy*. [State Standard 23337-2014. Noise. Methods of measurement of noise on residential district and in locations of inhabited and public buildings.] Moscow, Standartinform Publ., 2016.

4. *GOST 12.1.003. Shum. Obshchie trebovaniya bezopasnosti*. [State Standard 12.1.003. Noise. Common safety requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2013.

5. *SN 2.4/2.1.8.562-96. Shum na rabochikh mestakh, v pomeshcheniyakh zhilykh, obshchestvennykh zdaniy i na territorii zhiloi zastroiki*. [SN 2.4/2.1.8.562-96. Noise on workplaces, in locations of inhabited, public buildings and in housing estate territory]. Moscow, Standartinform Publ., 1997.

6. *GOST R 53187-2008. Akustika. Shumovoi monitoring gorodskikh territorii*. [State Standard R 53187-2008. Noise monitoring of city territories]. Moscow, Standartinform Publ., 2009.

7. *GOST 31296.1-2005 (ISO 1996-1:2003). Shum. Opisanie, izmerenie i otsenka shuma na mestnosti. Chast' 1. Osnovnye velichiny i protsedury otsenki*. [State Standard 31296.1-2005 (ISO 1996-1:2003). Noise. The

exposition, measurement and a noise estimation on district. A part 1. The basic magnitudes and estimation procedures]. Moscow, Standartinform Publ., 2004.

8. *GOST 31296.2-2006 (ISO 1996 - 2:2007). Shum. Opisanie, izmerenie i otsenka shuma na mestnosti. Chast' 2. Opredelenie urovnei zvukovogo davleniya*. [State Standard 31296.2-2006 (ISO 1996 - 2:2007). Noise. The exposition, measurement and a noise estimation on district. A part 2. Definition of levels of acoustical pressure] Moscow, Standartinform Publ., 2008.

9. *GOST 31301—2005 (ISO 15664:2001). Shum. Planirovanie meropriyatii po upravleniyu shumom ustanovok i proizvodstv, rabotayushchikh pod otkrytym nebotom*. [State Standard 31301—2005 (ISO 15664:2001). Noise. Scheduling of actions for control of noise of installations and the manufactures working open-air] Moscow, Standartinform Publ., 2014.

10. Zhuravlev, V. N. *Sinergeticheskii protsess peredachi energii rechevogo signala [Synergetic process of a transmission of energy of a speech signal]*. Kiev, *Pravove, normativne ta metrologichne zabezpechennya sistemi zakhistu informatsii v Ukraïni*, 2010, no. 1, pp. 29-42.

11. Flanagan, Dzh. *Analiz, sintez i vospriyatie rechi [The analysis, synthesis and perception of speech]*. Moscow, Link Publ., 1968. 396 p.

12. Bekeshi, G. *Mekhanicheskie svoystva ukha*. V kn. *Ekspierimental'naya psikhologiya (tom 2)*. [Mechanical properties of an ear] Moscow, Publishing house of the foreign literature, 1963. 1035 p.

13. Naida, S. A. *Ob'ektivnaya audiometriya na osnove formuly srednego ukha – novyi metod issledovaniya i differentsial'noi diagnostiki slukha [Objective audiometry on the basis of the formula of an average ear - a new method of research and differential diagnostics of hearing]*. *Elektronika i svyaz'*, 2004, no. 23, pp. 66–70.

14. Zhuravlev, V. N. *Metodicheskaya adekvatnost' spektral'noi modeli v zadache tekhnicheskogo diagnostirovaniya rotornykh detalei reduktorov GTD [Methodical adequacy of spectral model in a problem of technical diagnosing rotor details of reducers gas-turbine engines]*. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2014, no. 2, pp. 221–228.

15. Sorokin, V. N. *Teoriya recheobrazovaniya. [The theory of voiceformation]*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 312 p.

16. Zhuravlev, V. N. *Analiz metodov i rezul'tatov issledovaniy zavisimosti informatsionnogo parametra rechevogo signala ot fazovykh sootno-shenii ego garmonicheskikh sostavlyayushchikh [The analysis of methods and results of researches of dependence of informational parametre of a speech signal from phase parities of its wave constituents]*. *Informatsiionno-keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transporti*, 2007, no. 3 (65), pp. 8-13.

АНАЛІЗ МЕТОДИКИ ЗАСТОСУВАННЯ ПОПРАВКИ НА ТОНАЛЬНІСТЬ ПРИ СТЕНДОВИХ ВИПРОБУВАННЯХ ГТД НА ВІДПОВІДНІСТЬ ЕКОЛОГІЧНИМ ВИМОГАМ ПО ШУМУ*В. М. Журавльов, Т. В. Критська*

Розглядається завдання, суть якого полягає в аналізі методики застосування поправки на тональність при стендових випробуваннях газотурбінних двигунів на відповідність екологічним вимогам. Доведено, що на екологічні властивості сигналу впливає закон модуляції його тональних складових. Тонові сигнали незмінної частоти з одиничним індексом амплітудної модуляції ідентифікуються центральною нервовою системою як чистий тон і не можуть бути визначені як несприятливі. До таких сигналів, при стендових випробуваннях газотурбінних двигунів, відносяться усі складові деталей двигуна, які обертаються з незмінною круговою частотою. Показано, що застосування методу спектрального аналізу для сигналів, у яких не визначені параметри стаціонарності, приводить до невизначеної методичної погрішності, яка не врахована в традиційній методиці. Значення параметра тональності, який визначає поправку погіршення шумової оцінки об'єкта, строго не обґрунтовано і носить випадковий характер.

Запропонована методика екологічного ранжирування сигналу шуму стосовно до біооб'єктів, яка припускає інтелектуальний алгоритм обробки сигналів, що відповідає роботі мовних зон центральної нервової системи людини.

Ключові слова: газотурбінні двигуни, захист довкілля, шум, тонова складова, стендові випробування.

ANALYSIS OF APPLICATION METHODS OF THE TONALITY AMENDMENT DURING GAS-TURBINE ENGINES DEVELOPMENT TESTS FOR CORRESPONDENCE WITH NOISE ENVIRONMENTAL REQUIREMENTS*V. N. Zhooravlyov, T. V. Kryts'ka*

The important and actual task of the modern engine engineering is an objective estimation of gas-turbine engine noise levels during its development tests, which will allow to estimate the expected noise levels as part of aircraft. The problem is under review, whose content consists in the analysis of application methods of the tonality amendment during gas-turbine development tests for correspondence with environmental requirements.

Classification of tonal noise is contained in many sources. Unfortunately, the determinations and criteria, provided there, are not always consistent with one another that indicate uncomplete determination processes of influence of tonal noise component on its sanitary-hygienic evaluation. The ecological properties of the signal are affected by the modulation law of its tonal (frequency) components. Tone signals of a constant frequency with a unit amplitude modulation index are recognized by the central nervous system as a pure tone and cannot be defined as adverse. These signals, during gas-turbine development tests, include all components parts of the engine that rotate with the constant circular frequency.

It is shown that the application of the method of spectral analysis for signals with not determined parameters of stability, leads to undefined methodical error which is not taken into consideration in traditional methods. Determining the value of the tonality parameter, which defines the amendment of the deterioration of object noise assessment, is not strictly validated and is random. In accordance with the foregoing analysis, in our opinion, it is necessary to adjust traditional methods of environmental certification of aircraft on noise level. The methodology should involve the identification of neutral (the summary parameter is not adjusted), unfavorable (the summary parameter is adjusted to the downside) and favorable (the summary parameter is adjusted in the direction of improvement) noises.

The ranking algorithm, in connection with the application of the result to biological objects, can be intellectual and identical to the function of Wernicke's area of the central nervous system, i.e. the calculation of mutual correlation function or the correlation coefficient of the signal noise of the aircraft with the database of "favorable" or "unfavorable" signals.

Keywords: gas turbine engines, environmental protection, noise, tone component, development tests.

Журавлѐв Владимир Николаевич – д-р техн. наук, нач. сектора обработки сигналов ГТД Управления информационных технологий ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: ws50@i.ua.

Критская Татьяна Владимировна – д-р техн. наук, профессор, зав. каф. электронных систем, Запорожский государственный инженерная академия, Запорожье, e-mail: krytskaja2017@gmail.com.

Zhooravlyov Vladimir Nikolaevich – Doctor of Technical Science, Head of Gas turbine engines signal processing Sector of the Information technology Office of GP "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: ws50@i.ua.

Krytskaya Tatiana Vladimirovna – Doctor of Technical Science, Professor, Head of electronic systems Dep. of Zaporozhye State Engineering Academy, Zaporozhye, e-mail: krytskaja2017@gmail.com.