

# ИМПУЛЬСНЫЙ ИНФРАЗВУКОВОЙ СИГНАЛ, ПРОИЗВОДИМЫЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ. ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ

*Виділені основні принципи оптимізації моніторингу техногенного впливу об'єктів вітроенергетики на довколишнє природне середовище. Аналіз даних досліджень імпульсної звукової емісії в геологічному та повітряному середовищах, дозволив привести поняття емісії до поняття сигналу, загальної теорії сигналів. Сформовані принципи оцінки впливу імпульсного звукового сигналу вітроенергетичної установки. Розраховано спектр гармонік вітрогенератора FL 2500-100*

*Ключові слова: вітроенергетична установка, імпульсний інфразвуковий сигнал, спектр*

*Выделены основные принципы оптимизации мониторинга техногенного воздействия объектов ветроэнергетики на окружающую природную среду. Анализ данных исследований импульсной звуковой эмиссии в геологической и воздушной средах позволил привести понятие эмиссии к понятию сигнала, общей теории сигналов. Сформированы принципы оценки импульсного звукового сигнала ветроэнергетической установки. Рассчитан спектр гармоник ветрогенератора FL 2500-100*

*Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, импульсный инфразвуковой сигнал, спектр*

**Н. А. Афанасьева**

Аспирант\*

E-mail: nadiya.afanaseva@yandex.ua

**Л. Д. Пляцук**

Доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедрой\*  
ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, Украина, 40007

E-mail: plyacuk@teko.sumy.ua

**Л. Г. Филатов**

Доктор технических наук, профессор\*

**И. А. Трунова**

Кандидат технических наук, доцент,  
заместитель заведующего кафедрой\*

E-mail: inna.trunova@rambler.ru

\*Кафедра прикладной экологии

Сумский государственный университет  
ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, Украина, 40007

## 1. Введение

Явление импульсной звуковой эмиссии в окрестностях ветроэнергетических объектов (ВЭО), в частности ветряных электростанций (ВЭС), вызывало проблемы разного рода и привлекало интерес исследователей различных областей знаний. На уровне законодательного ограничения, по сложившейся тенденции, подобные явления часто рассматриваются с позиции безопасности окрестных техногенных объектов, а не безопасности живых организмов.

Ветроэнергетические установки (ВЭУ) большой мощности, обладают массивной, хорошо проводящей звуковые и механические сигналы, башней. Последняя жестко соединена с литосферой через укрепленный фундамент соответствующей массы. Таким образом, ВЭУ осуществляют эмиссию механического сигнала низкой частоты, вызванного вращательной работой ротора, в литосферу [1].

Параметр атмосферного давления при прохождении через ветроколесо меняется скачком. В результате возникают импульсы давления в воздушном потоке, сопутствуемые импульсной эмиссией звуковых волн в атмосфере, и воспринимаемые как импульсный шум [2].

Механический сигнал низкой частоты обладает комплексным спектром:

- переменная во времени частота импульсного сигнала, связанная с частотой вращения ротора;
- относительно постоянная частота, связанная с маятниковым колебанием массивного ротора и башни.

Путь распространения эмиссии сигнала также понятие комплексное и может проходить преимущественно в литосфере либо преимущественно в атмосфере, частично переходя из одной сферы в другую.

Распространение механического сигнала низкой частоты вокруг ВЭУ в литосфере, как слабого сейсмического шума, в настоящее время законодательно ограничивается. В Соединенном Королевстве Великобритания после специальных исследований (Styles P. et.al., 2005), для предупреждения зашумления систем сейсмического мониторинга станции Eskdalemuir (Шотландия) звуковыми сейсмическими сигналами ВЭО была законодательно утверждена защитная зона  $\geq 50$  м.

Прежде (Schofield R., 2001) и после (Fiori I. et.al., 2009) этих исследований в различных странах наблюдали и прогнозировали сопоставимые значения и зависимости. Так, Schofield в 2001 г. обнаружил, что интенсивный сейсмический сигнал низкой частоты от

местной ВЭС (Вашингтон-Орегон, США), значительно превышает сейсмический фон местности, вплоть до расстояния  $\approx 18$  км. В 2009 г. Fiori et.al. исследовали сейсмический шум, производимый ветряным парком, возведенным вблизи одной из станций детектирования гравитационных волн GEO-600 (Германия), и констатировали присутствие данного сигнала вплоть до расстояния 2 км.

Станции детектирования гравитационных волн используют специфический тип оборудования – интерферометрическую антенну, работающую по принципу интерферометра Мичелсона. Специфика состоит в том, что, обеспечивая чувствительность к сигналам определенной интенсивности частотного ранга 10–10000 Гц, данный интерферометр не способен изолировать интенсивные сигналы частоты  $< 10$  Гц. В результате посторонний шум низкой частоты вредит достоверности детектируемых данных и может привести впоследствии к нарушению функциональности самой системы.

Группа ученых (G. Saccorotti, D. Piccinini, L. Cauchie, I. Fiori) для подобной станции в Италии (VIRGO), провела ряд исследований по отношению к ВЭС, состоящей из ВЭУ 2 МВт и расположенной в 6 км от станции. В результате авторы получили зависимости и фактически наблюдали, что среди отдельных частотных полос частота 1,7 Гц обладает наибольшей интенсивностью и отчетливо фиксируется на расстоянии 11 км [1].

Во же время, чувствительность окружающей ВЭУ биосферы и человека в частности, к импульсной звуковой эмиссии ВЭУ низкой частоты, законодательно все еще спорно и не регулируется. Исследования этого направления ведутся на протяжении всего времени развития ветроэнергетической отрасли. Обострилась обеспокоенность в последнее время, в связи с тенденцией увеличения мощности и габаритов ветряных агрегатов.

Большая работа по изучению физиологических реакций на инфразвук высокой интенсивности, что возникает вокруг ВЭУ, ведется группой ученых кафедры Отоларингологии (Washington University School of Medicine). В экспериментах на животных авторы зафиксировали достоверную реакцию слухового аппарата на звук низкой частоты при уровне звукового давления 80–90 дБ SPL. Также авторы установили, что чувствительность к инфразвуку усиливается на 20 дБ при частичном перекрытии флюидного пространства апекса ушной улитки, что бывает при болезни Меньера (эндолимфатической водянке). Позднее была зафиксирована аналогичная реакция на звук производимый ВЭУ. Женщина, страдающая этим заболеванием, наблюдала ухудшение симптомов болезни во время пребывания вблизи ВЭС, что одновременно засвидетельствовало ее гиперчувствительность и специфику шума от ВЭУ. В дальнейшем, авторы представили собственную модель слуховой реакции человека на инфразвуковой сигнал, сопоставимый с сигналом ВЭУ [3].

Основой в оценке импульсной звуковой эмиссии низкой частоты, производимой ВЭУ, следует считать выделение узких частотных полос, составляющих спектр сигнала. Состав спектра определяется техническими характеристиками ротора, в первую очередь частотой его вращения. Вполне обоснованно, что этот

принцип применяется во всех ведущих методиках оценки и прогнозирования такого сигнала.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

### 2.1. Разделение звуковой эмиссии от ВЭУ в сферах ОПС

В своей работе Schofield R. (2001) представил результаты сейсмологических исследований окрестностей ВЭС, состоящей из 399 однотипных ВЭУ марки VESTA V47 (по 660 кВт) общей номинальной мощностью 150 МВт. Наблюдения согласовывались с данными Лазерной Интерферометрической Гравитационной Обсерватории LIGO, расположенной в 20-и км от исследуемой ВЭС (Вашингтон).

Сейсмический сигнал, образуемый в результате работы ВЭС, фиксировался на различном удалении от 24 м до 20 км от ВЭС (обсерватория LIGO).

Фактически полученный спектр сейсмического сигнала оказался сопоставим с расчетным спектром импульсов звукового давления, основанного на частоте вращения ротора (табл. 1).

Таблица 1

Гармонический состав частот импульсов звукового давления, при скорости ветра на установленную мощность (частота снижается при снижении скорости ветра) [4]

Предполагаемые значения частоты при большой скорости ветра (Гц)	Описание
0,49	Частота вращения ротора (29 об./мин.)
1,47	3-я гармоника частоты вращения (частота прохождения лопастей)
2,95	6-я гармоника
4,34	9-я гармоника (наибольший пик близкий к фоновому)
5,88	12-я гармоника
7,35	15-я гармоника
Высшие гармоники, присутствуют, но сложны для выделения	–
30	Частота вращения генератора

При этом, заметные пики амплитуды сейсмических колебаний во всех точках удаления (24 м, 720 м, 1,66 км, 10,66 км, 18,27 км, 20 км) были обнаружены на частотах близких 4,34 Гц, 10 Гц. В районе обсерватории LIGO замечен пик на частоте близкой 7,35 Гц.

В результате анализа данных исследований автор делает вывод, что звуковая эмиссия от ВЭУ проходит как инфразвуковой сигнал в атмосфере и параллельно, в виде сейсмического сигнала, в литосфере [4]. Это говорит о единообразии, общей основе звукового сигнала, производимого ВЭУ и проходящего в окружающей среде.

Принцип единообразия звукового сигнала является основой его мониторинга. В свою очередь, принцип разделения импульсного сигнала ВЭУ в сферах окружающей среды позволяет рассматривать его в каждой из сфер по отдельности.

## 2. 2. Анализ звукового сигнала ВЭС проходящего в сферах ОПС

Аналізу звукового сигнала ВЭС, проходящего в окружающих геологической и воздушной средах, посвящена работа группы ученых Styles, P et.al. (1997). Авторы исследовали ВЭС (St Breock Downs), состоящие из 11 однотипных ВЭУ фирмы «Bonus» по 450 МВт, общей номинальной мощностью 4,95 МВт. Результаты исследований базировались на трех видах экспериментальных измерений:

– сейсмометрические измерения с углублением датчика в землю, на расстояниях 100 м, 50 м и 25 м от крайней ВЭУ.

– сейсмографические измерения в частотном диапазоне 0,2–64 Гц, с постепенным удалением от ВЭС (10 позиций) вплоть до расстояния 1 км.

– измерения акустической звуковой эмиссии по азимуту вокруг ВЭУ.

Среди основных выводов по проведенной работе авторы отметили:

1. Низшая гармоника с тоном 0,5 Гц явно присутствует в основном спектре. Гармонический состав спектра импульсной эмиссии: 0,5; 3,0; 4,5; 6,0; 7,5 Гц и более высокие частоты. Амплитуда сигнала в литосфере в среднем 50–80 нм/с, и максимум 250 нм/с. Частотная полоса 7,5 Гц прослеживается наиболее четко.

Гармонический состав сигнала близок к спектру, рассчитанному на основе частоты вращения ротора. Амплитуда сигнала ослабевает по мере удаления от ВЭС.

2. Измерения с частотным ограничением  $\geq 3$  Гц, проведенные на расстояниях 20, 50 и 100 м от ВЭУ, также показали ослабление амплитуды сигнала с расстоянием.

Ослабление происходит тем быстрее, чем выше частота составного тона сигнала. Превышение высших тонов спектра (над фоновыми значениями), присутствует на расстояниях, более чем 500–700 м от ВЭУ, наиболее низкие частоты, по мере отдаления, постепенно маскируются фоновым шумом. Присутствие тона 0,5 Гц наблюдалось вплоть до расстояния 1 км от ВЭС.

3. При вариации скорости ветра 7–14 м/с, на равном расстоянии, амплитуда сигнала главным образом возрастает с ростом скорости ветра. В особенности, это характерно для частот 0,5 Гц, 3,0 Гц и 7,5 Гц. В то же время, частота 6 Гц демонстрирует обратную зависимость, и ослабевает с ростом скорости ветра. Это говорит об особенной зависимости участка частотной полосы между 6 и 7,5 Гц от скорости ветра.

Авторы заключают также, что исходя из результатов наблюдений, тон 0,5 Гц достаточно явно демонстрирует связь с ВЭС.

4. Измерения изменений в сигнале по азимуту  $120^\circ$ – $310^\circ$  при постоянной скорости ветра 10 м/с, показали явную вариацию в амплитуде примерно на 2 порядка. Вариация эта, в среднем, одинакова для большинства частот. Эта тенденция одновременно прослеживается и в акустических измерениях.

6. Наряду с явно выраженными тонами, в общем спектре сейсмического сигнала производимого ВЭС, между отдельными ВЭУ присутствует существенная вариация индивидуальных частот и амплитуд (50–100 нм/с). Все же, частотные полосы 4,5 и 7,5 Гц, фиксируемые на расстоянии 1 км, также отчетливо

измеряются на основании фундамента. Эти частоты наблюдаются наиболее стабильно, по сравнению с другими (например 1,5 Гц).

Самая низкая частота сигнала 0,5 Гц присутствует даже при полной остановке ВЭС, вероятно в результате действия ветрового потока на саму конструкцию ВЭУ [5].

Результаты, полученные авторами, подтверждают принципиальность единообразия звукового сигнала ВЭУ в различных сферах окружающей среды. Анализ сигналов, проходящих в атмосфере и литосфере, позволил авторам ориентировочно выделить фактически присутствующие в эмиссии частоты расчетного спектра.

## 2. 3. Анализ спектра звукового сигнала ВЭС на основе его единообразия

Исследования проводились группой ученых Styles, P et.al. (2005) на ВЭС (Dun Law), состоящей из 26 ВЭУ с постоянной скоростью вращения VESTAS V-47 (660 кВт), номинальной мощностью 17 МВт.

В результате исследований авторы подтвердили, что присутствующие гармоники вращения лопастей ротора в спектре сейсмического импульсного сигнала являются основой этого спектра.

Базисный спектр гармоник импульсной эмиссии ветрогенератора VESTAS V-47 (табл. 2) формируется авторами исходя из частоты вращения ротора  $28,5 \text{ мин}^{-1}$  и в рамках инфразвуковой полосы частот 0–10 Гц (исходя из чувствительности к ней станции сейсмического мониторинга, являющейся объектом воздействия в данном исследовании).

Таблица 2

Спектр частот и гармоник импульсной сейсмической эмиссии, при заданной частоте вращения ротора VESTAS V-47 [6]

Гармоника (частота вращения лопастей)	Гармоника (вращения -3й лопасти)	Частота, Гц
1		0,48
2		0,95
3	1	<b>1,43</b>
4		1,90
5		2,38
6	2	<b>2,85</b>
7		3,33
8		3,80
9	3	<b>4,28</b>
10		4,75
11		5,23
12	4	<b>5,70</b>
13		6,18
14		6,65
15	5	<b>7,13</b>
16		7,60
17		8,08
18	6	<b>8,55</b>
19		9,03
20		<b>9,50</b>
21	7	9,98

Авторы выделяют частоту 0,75 Гц как частоту структурной вибрации башни ВЭУ. Эту частоту можно сопоставить с данными отчета Schofield R. ~0,65 Гц и данными исследований на ВЭС St Breock Downs ~0,5 Гц.

Спектр импульсного сигнала, полученного акселерометрами, установленными внутри башни, отражает в себе гармоники вращения ротора: 1,4 Гц, 2,8 Гц, 4,3 Гц, 5,7 Гц и выше. На расстоянии 2,4 км от ВЭС авторы наблюдали преобладание спектра: 2,8 Гц, 4,3 Гц, 5,7 Гц, 7,1 Гц, 8,5 Гц. Первая гармоника ротора 1,4 Гц в общем случае маскируется частотой фонового шума (до 2 Гц) и заметна лишь при тонком спектральном анализе (рис. 1).

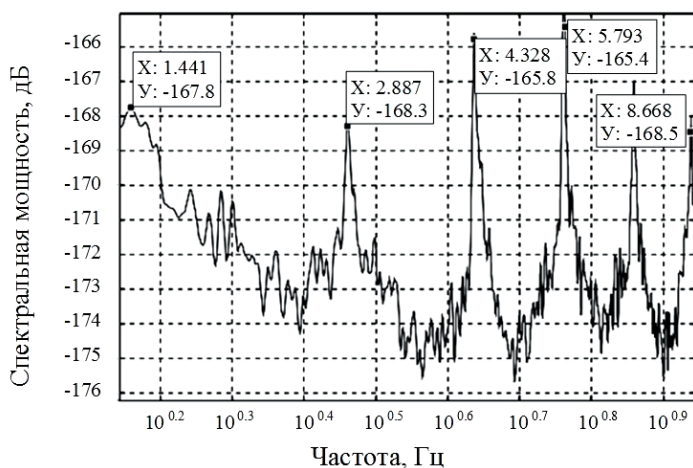


Рис. 1. Спектральный анализ участка сейсмических данных, с видимым присутствием 1-й гармоники вращения лопастей ротора 1,4 Гц и более высоких гармоник [6]

Гармонический состав импульсного сигнала прослеживался авторами и в атмосфере как спектр инфразвуковой эмиссии.

На расстоянии 4,4 км наблюдается ослабление в амплитуде сигнала более высоких гармоник (рис. 2) [6].

На расстоянии 6 км от ВЭС продолжает наблюдаться превышение над фоновым шумом еще более высших гармоник 5,7 Гц, 7,1 Гц, 8,5 Гц.

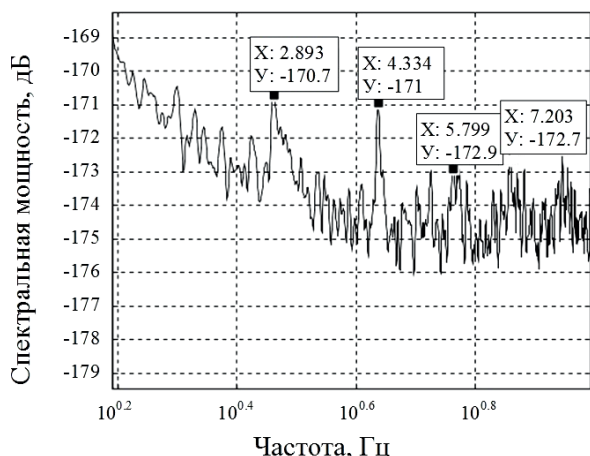


Рис. 2. Спектральный анализ участка сейсмических данных, с видимым присутствием 2-й гармоники вращения лопастей ротора 2,8 Гц и более высоких гармоник [6]

Таким образом, техногенная нагрузка ВЭО на окружающую природную среду может быть описана и оценена главным образом как нагрузка, производимая импульсным сигналом низкой частоты. Спектральный состав такого сигнала играет ключевую роль в общей ее оценке и выяснении характера ответной реакции окружающей природной среды. В свою очередь, спектр импульсной эмиссии низкой частоты в общем случае единообразен во всех сферах, связанных с ВЭУ, и определяется ее техническими характеристиками, в особенности частотой вращения лопастей ротора и их количеством.

Это позволяет заложить основу оценки и прогноза техногенной нагрузки ВЭО на окружающую природную среду в виде спектра гармоник вращения лопастей ротора ВЭУ и доминирующих частот вращения 3-й лопасти.

### 3. Цель и задачи исследования

Цель работы – выделить принципы оптимизации оценки и прогноза техногенного воздействия объектов ветроэнергетики на окружающую природную среду.

На основании проанализированных литературных данных и для достижения поставленной цели, выделены следующие задачи:

- сформировать основные принципы оценки импульсного инфразвукового сигнала ветроэнергетической установки;
- вычислить спектр вероятных и доминирующих гармоник для модели ветрогенератора FL 2500–100, применение которой наиболее актуально на территории Украины.

### 4. Основные принципы оценки импульсного инфразвукового сигнала ветроэнергетической установки

Для выделения основных принципов оценки импульсного инфразвукового (ИИЗ) сигнала и образуемого этим сигналом поля, вокруг ВЭУ, с точки зрения реакции биосферы, следует вспомнить о общих интегральных типах взаимодействия живой системы (ЖС) с окружающей средой. Изначально подобная качественная классификация реакций ЖС на воздействие применялась в работах, посвященных взаимодействию ЖС с электромагнитными полями. В природе различают три типа взаимодействия [7]: энергетическое, вещественное, информационное. Их аналоги в биологии: обмен энергией, обмен веществ, обмен информацией.

Соответственно, поскольку ИИЗ сигналы не вещество (хотя и могут влиять на обмен веществ в биосистеме), следует анализировать только два типа взаимодействия – энергетическое и информационное.

**Энергетическим действием** на биосистемы в частотном диапазоне 0–1000 Гц могут обладать только звуковые поля определенной интенсивности. ЖС, как большая и сложная система реагирует на стимул даже при достаточном поглощении энергии.

Это приводит в действие серию цепных реакций, большинство которых имеет информационную природу. Поэтому чисто энергетических эффектов ИИЗ поля в ЖС выявить крайне сложно, так как энергия высвобождается в результате развития комплексных реакций.

Это значит, что в основе всех эффектов ИИЗ поля лежит его первичное энергетическое действие.

**Информационное взаимодействие** целесообразно рассматривать в трех направлениях:

- сигнальная роль ИИЗ поля;
- его регулирующее влияние;
- его дестабилизирующее действие.

*Сигнальная роль* наиболее четко проявляется при изучении поведенческих реакций различных живых организмов, способных ориентироваться по естественным полям Земли. Такая способность обнаружена у микроорганизмов, беспозвоночных животных, рыб, птиц, млекопитающих [7].

*Регулирующее влияние.* Сверхзадача исследователей состоит в том, чтобы подобрать параметры поля, способные привести к однозначному результату. В настоящее время известны частные зависимости эффектов от амплитудно-частотных характеристик, однако регулирующее влияния в полной мере все еще не обосновано.

*Дестабилизирующее действие* состоит в том, что ИИЗ поле независимо от его параметров вызывает во многих случаях разнонаправленные изменения исследуемых показателей (возрастающее, неизменное, понижающее) у достаточно большой выборки однотипных биосистем, и в особенности у человека, как сложной ЖС [8–11]. При механическом объединении этих групп в одну выборку и регистрации по ней эффекта, во многих случаях регистрируемый эффект будет слабым или не будет зарегистрирован вовсе.

Характер изменений показателя определяется исходным состоянием биосистемы и подчиняется принципу приближения его значений к среднестатистическому по всей выборке [9, 10].

Все это позволяет считать, что дестабилизирующее влияние ИИЗ поля является ведущим в общих механизмах его биологического действия [12]. При этом все подтипы информационного воздействия на биосистему проявляются одновременно, но с разной выраженностью [13].

На основании литературного анализа и в целях оптимизации методов оценки и прогноза техногенного воздействия ВЭО на окружающую природную среду, можно выделить следующие принципы оценки:

- техногенная нагрузка ВЭУ на окружающую природную среду – результат воздействия сигнала – импульсного звука низкой частоты;
- сигнал единообразен во всех сферах природной среды, окружающей ВЭУ, и при распространении выражается в импульсной звуковой эмиссии;
- разделение сигнала в сферах окружающей природной среды, позволяет рассматривать его отдельно в каждой из сфер;
- оценка техногенной нагрузки (величины воздействия) на биосферу – оценка амплитуды реакции биосферы на воздействие звукового сигнала ВЭУ.

## 5. Вероятный спектр импульсного звукового сигнала мощных ВЭУ на территории Украины

На территории Украины, начиная с 2011 г., наблюдается строительство новых объектов ветроэнергетики. Ряд крупных проектов, запланированных до 2020 г., уже частично реализованы. Ветропарки «Новоазовский», «Очаковский», «Краснодонский», «Лутугинский», «Антрацитовский» завершают ввод в эксплуатацию первую очередь из 10 установок. Типологический состав ветропарков единообразен, используются агрегаты FL 2500-100, фирмы Фурлендер, мощностью 2,5 МВт [14].

Вероятный гармонический состав звуковой эмиссии определяется исходя из технических характеристик ротора. На примере агрегата FL 2500-100 можно сделать предварительный прогноз вероятных и доминирующих гармоник импульсного звукового сигнала. ВЭУ FL 2500-100 имеет следующие технические характеристики (табл. 3) [15].

Таблица 3

Основные технические характеристики ВЭУ FL 2500-100

установленная мощность	2500 кВт
диаметр ротора	100 м
частота вращения ротора	9.4..17.1 мин <sup>-1</sup>
частота вращения генератора	750..1310 мин <sup>-1</sup> (50 Гц)
скорость ветра: запуск	3.5 м/с
скорость ветра: на установленную мощность	11.5 м/с
скорость ветра: остановка	25 м/с
число лопастей	3

Для оценки состава частот и гармоник рассмотрим три основные частоты вращения ротора. А именно, 9.4 мин<sup>-1</sup>, 17.1 мин<sup>-1</sup>, 14.3 мин<sup>-1</sup> (частота ротора при скорости ветра на установленную мощность).

Доминирующие частоты импульсной звуковой эмиссии при известных значениях частоты вращения ротора и количества лопастей можно рассчитать по формуле:

$$f = N \cdot n \cdot \frac{\omega}{60}, \quad (1)$$

где  $n$  – номер гармоники частоты вращения лопастей ротора;  $N$  – количество лопастей ротора;  $\omega$  – частота вращения ротора, мин<sup>-1</sup>; 60 – число секунд в одной минуте.

Расчетный спектр вероятных и доминирующих гармоник импульсной эмиссии для ротора ВЭУ FL 2500–100, представим в виде таблицы (табл. 4).

В таблице наглядно видно, что вероятные и доминирующие гармоники частот, импульсного звукового сигнала расположены в инфразвуковом диапазоне. Уровень звукового давления при этом может быть достаточно высок, исходя из больших габаритов установки FL 2500–100.

Таблица 4

Спектр вероятных и доминирующих гармоник импульсной звуковой эмиссии, на основных частотах вращения ротора ВЭУ FL 2500-100

№ вероятной гармоники (частота вращения лопастей)	№ доминирующей гармоники (3-й лопасти)	Частота импульсной эмиссии (Гц) при заданной частоте вращения ротора		
		9.4 мин <sup>-1</sup>	14.3 мин <sup>-1</sup>	25 мин <sup>-1</sup>
1		0.16	0.24	0.42
2		0.31	0.48	0.83
3	1	0.47	0.72	1.25
4		0.63	0.95	1.67
5		0.78	1.19	2.08
6	2	0.94	1.43	2.50
7		1.10	1.67	2.92
8		1.25	1.91	3.33
9	3	1.41	2.15	3.75
12	4	1.88	2.86	5.00
15	5	2.35	3.58	6.25
18	6	2.82	4.25	7.50
21	7	3.29	5.01	8.75
24	8	3.76	5.72	10.00
27	9	4.23	6.44	11.25
30	10	4.70	7.15	12.50
33	11	5.17	7.87	13.75
36	12	5.64	8.57	15.00
39	13	6.11	9.30	16.25
42	14	6.58	10.01	17.50
45	15	7.05	10.73	18.75
48	16	7.52	11.44	20.00
50	Частота вращения генератора			

#### 6. Обсуждение результатов полученных в теоретическом исследовании особенностей оптимизации оценки импульсного инфразвукового сигнала, производимого ветрогенератором

Основные принципы оценки ИИЗ сигнала выражают в себе ведущие позиции оценки этого специфического воздействия. Анализ литературных данных об особенностях возникновения и распространения механических колебаний в воздушной и геологической средах вокруг ВЭУ позволил сделать вывод о том, что звуковой сигнал возникает вследствие работы ВЭУ и разделяется в окружающих средах при распространении. Исходя из природы сигнала, очевидна его строгая физическая и математическая зависимость от технических характеристик ветрогенератора, источника сигнала.

Рассматривая сигнал на этапе взаимодействия с биосферой, множество литературных источников свидетельствуют о наличии факта воздействия ИИЗ сигнала на окружающие ВЭУ биосистемы и человека в частности. С другой стороны, достаточно четко аргументированного объяснения и ограничения таких эффектов в настоящее время нет. Следует заключить, что система оценки и прогноза этого фактора современной техносферы требует оптимизации и более рационального обоснования.

Главный подход к оптимизации состоит в том, что рассматривая ИИЗ поле, производимое ВЭУ с точки зрения общих типов взаимодействия ЖС с окружающей средой, не сложно заключить, что взаимодействие ЖС с таким фактором ограничивается энергетическим и информационным типами.

При этом, в основе всех эффектов ИИЗ сигнала лежит его первичное энергетическое действие. Информационное воздействие на ЖС проявляется одновременно в трех направлениях: сигнальная роль ИИЗ поля, его регулирующее влияние, его дестабилизирующее действие. Но степень выраженности каждого подтипа разная.

Таким образом, ИИЗ сигнал способен оказывать диаметрально противоположное воздействие на однотипные ЖС. Направление изменений показателя определяется исходным состоянием биосистемы и подчиняется принципу приближения его значений к среднестатистическому значению выборки, положению равновесия. Все это позволяет считать, что дестабилизирующее влияние ИИЗ поля является ведущим в общих механизмах его биологического действия.

Исходя из тенденций последних лет, наиболее актуальным типом ВЭУ для Украины следует считать горизонтально осевые ВЭУ мегаватного и мульти-мегаватного классов. Опираясь на опыт многих исследователей, расчет вероятных и доминирующих гармоник вращения ветрогенератора будет соответствовать основному спектру импульсного звукового сигнала производимого при работе установки. Произведенный расчет спектра для ВЭУ FL 2500-100, применяемой на современных ВЭС Украины, свидетельствует о том, что основной спектр вероятных и доминирующих гармоник лежит в инфразвуковом диапазоне. При этом, интенсивность звукового давления такого сигнала должна быть значительно велика, исходя из значительных габаритов этого агрегата.

#### 7. Выводы

Тенденция к росту уровня звукового давления, производимого ВЭУ, по мере укрупнения ее конструкции и мощности, неизбежна по известным физическим причинам. В то же время, степень вероятной опасности этого фактора для окружающей природной среды, и в частности биосферы, в настоящее время изучается всесторонне и все-таки остается неопределенной. В результате законодательная регуляция такого фактора техногенного воздействия затруднена.

Переход от понятия эмиссии к понятию сигнала позволяет рассматривать систему «сигнал – эмиссия – рецептор», в рамках «общей теории сигналов». Такой подход в решение задач позволит оптимизировать структуру оценки. Опираясь на выделенные принципы оптимизации оценки в дальнейшем можно развить и оптимизировать математические подходы и методы такой оценки.

Детальный анализ спектра импульсного инфразвукового сигнала по спектру вероятных и доминирующих гармоник вращения лопастей, на основании конструктивных и технических особенностей ротора, представляет собой логическую основу мониторинга этого фактора. Последующее развитие этого базиса

в поиске оптимального математического метода расчета амплитуды импульсов сигнала и оптимальных методов оценки амплитуды реакции биологической

системы позволит найти рациональную методику мониторинга техногенного воздействия ВЭО на биосферу ОПС.

### Литература

1. Saccorotti, G. Seismic noise by wind farms: A case study from the Virgo gravitational wave observatory, Italy [Text] / G. Saccorotti, D. Piccinini, L. Cauchie, I. Fiori // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2011. – Vol. 101, Issue 2. – P. 568–578. doi: 10.1785/0120100203
2. Дэвис, Д. Энергия [Текст] / Д. Дэвис; пер. с англ.; под ред. Д. Б. Вольфберга, В. И. Владимировой. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 108 с.
3. Salt, A. How Does Wind Turbine Noise Affect People? [Text] / A. Salt, J. Lichtenhan // Acoustics Today. – 2014. – Vol. 10, Issue 1. – P. 20–28. doi: 10.1121/1.4870173
4. Schofield, R. Seismic Measurements at the Stateline Wind Project [Text] / R. Schofield. – LIGO T020104-00-Z, 2001.
5. Snow, D. J. Low frequency noise and vibration measurements at a modern wind farm [Text] / D. J. Snow, P. Styles. – ETSU W/13/00392/REP. United Kingdom, 1997. – 31 p.
6. Styles, P. Microseismic and Infrasound Monitoring of Low Frequency Noise and Vibrations from Windfarms: Recommendations on the Siting of Windfarms in the Vicinity of Eskdalemuir, Scotland [Text] / P. Styles, R. England, I. G. Stimpson, S. M. Toon, D. Bowers, M. Hayes. – Report to MOD/FT/BWEA, 2005. – 125 p.
7. Реакции биологических систем на магнитные поля [Текст]: сб. науч. тр. / Под ред. Ю. А. Холодова. – М.: Наука, 1978. – 216 с.
8. Мурзамадиева, З. А. Морфологические изменения во внутренних органах и головном мозге при воздействии производственного инфразвука [Текст]: автореф. дис. ... канд. мед. наук: 14.00.07 / З. А. Мурзамадиева. – РГБ ОД. Алматы, 1996. – 24 с.
9. Хашхожева, Д. А. Динамика интегральных показателей сердечно-сосудистой системы под влиянием нейроакустических сигналов [Текст]: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.13 / Д. А. Хашхожева. – РГБ ОД. Нальчик, 2008. – 152 с.
10. Куралесин, Н. А. Научные основы регламентации инфразвука в медицине труда: Медико-биологические аспекты [Текст]: автореф. дис. ... доктора мед. наук: 14.00.07 / Н. А. Куралесин. – НИИ медицины труда. Москва, 1997. – 48 с.
11. Москалюнов, П. П. Эколого-физиологическая оценка влияния акустических сигналов на адаптацию человека [Текст]: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16 / П. П. Москалюнов. – РГБ ОД. Москва, 2008. – 125 с.
12. Плеханов, Г. Ф. Основные закономерности низкочастотной электромагнитобиологии [Текст] / Г. Ф. Плеханов; ред. А. Г. Карташева. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990. – 188 с.
13. Плеханов, Г. Ф. Экологическая роль внешних электромагнитных полей [Текст] / Г. Ф. Плеханов. – Проблемы солнечно-земных связей. – Новосибирск, 1982. – С. 10–16.
14. 5 ветротурбин введено в эксплуатацию на Лутугинской ВЭС [Электронный ресурс] / Ветряные парки Украины. – Режим доступа: <http://wpu.com.ua/ru/news/> – Дата доступа: 16.12.2013
15. FL 2500 [Electronic resource] / die Multimegawatt Wind Turbine for all Sites: Fuhrlander. – Available at: <http://www.fuhrlander.de/en/fl-2500-gb>