

**АНАЛИЗ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТ БАШНИ К ФУНДАМЕНТУ  
ВЕТРОЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ПРИМЕРЕ ЕРЕЙМЕНТАУСКОЙ ВЭС****THE ANALYSIS OF VIBRATIONAL EFFECT FROM THE TOWER BLOCK TO THE  
FOUNDATION OF THE WIND POWER UNIT (WPU) OF EREYMENTAU WIND  
POWER STATION (WPS)**

*Бул макалада атайын байкоо жүргүзүп, Ерейментау шамал энерго курумунун (ВЭУ – ШЭК) пайдубалына (фундаментине) мунаранын титирөө таасиринин анализи келтирилген. ШЭКтин пайдубалына келтирилген титиретүүчү таасирдин күчү шамалдын күчүнүн интенсивдүүлүгүнө көз карандылык графиги көрсөтүлгөн.*

***Ачкыч сөздөр:** шамал энергетикасы, Шамал энергия станциясы, шамал энергокуруму, титирөө, термелүү, пайдубал.*

*В данной статье по результатам натурных наблюдений приведен анализ вибрационного воздействия от башни к фундаменту ветроэнергоустановки (ВЭУ) Ерейментауской ВЭС. Показаны графики зависимости вибрационной нагрузки, воспринимаемой фундаментом ВЭУ от интенсивности напора ветра.*

***Ключевые слова:** ветроэнергетика, ВЭС, ВЭУ, колебания, вибрации, фундамент.*

*This article includes the analysis of vibrational effect from the tower block to the foundation of the wind generating unit of Ereymentau WPS. In the article are presented diagrams of dependence of vibrational load taken by the WPU foundation from wind pressure intensity.*

**Keywords:** vibrations, foundation

**Введение**

Ветроэнергетика является наиболее динамично развивающимся видом возобновляемых источников энергии. После изучения энергетического потенциала ветра в Казахстане, Правительство Республики Казахстан совместно с Программой развития ООН «Казахстан - инициатива развития рынка ветроэнергетики» определили Ерейментауский район Акмолинской области как наиболее перспективный для строительства ветровых электростанций [1].

Первые шаги по реализации программы были осуществлены в Акмолинской области в городе Ерейментау.

На данный момент запустили в эксплуатацию 22 ВЭУ, которые присоединяются к Экибастузской ЛЭП и снабжают электроэнергией город Ерейментау, поселок Еркеншилик, а также частично г. Астана.

В рамках проведения предстоящей выставки «EXPO-2017», за счет энергии, выработанной Ерейментауской ВЭС, планируется обеспечить электроснабжение объектов выставки в Астане.

**Описание площадки**

Участки строительства ВЭУ расположены на свободной от застройки территории. Главными формами рельефа являются куполовидные сопки, сложенные плотными породами. Сопки разделены ветвящимися сухими логами и долинами временных ручьев, которые приурочены к менее устойчивым породам. Относительные превышения сопок колеблются от 30 до 110 метров.

В геологическом строении описываемой территории принимают участие осадочные и метаморфические породы протерозоя и палеозоя, прорываемые в северо – восточной части города интрузиями, и перекрытые чехлом элювиально – делювиальных четвертичных отложений, представленных суглинками, супесями и глинами с дресвой и щебнем, сапролитами, глинистыми и суглинистыми, щебенисто-дресвяными и дресвяно-щебенистыми грунтами с песчаным и суглинистым заполнителем.

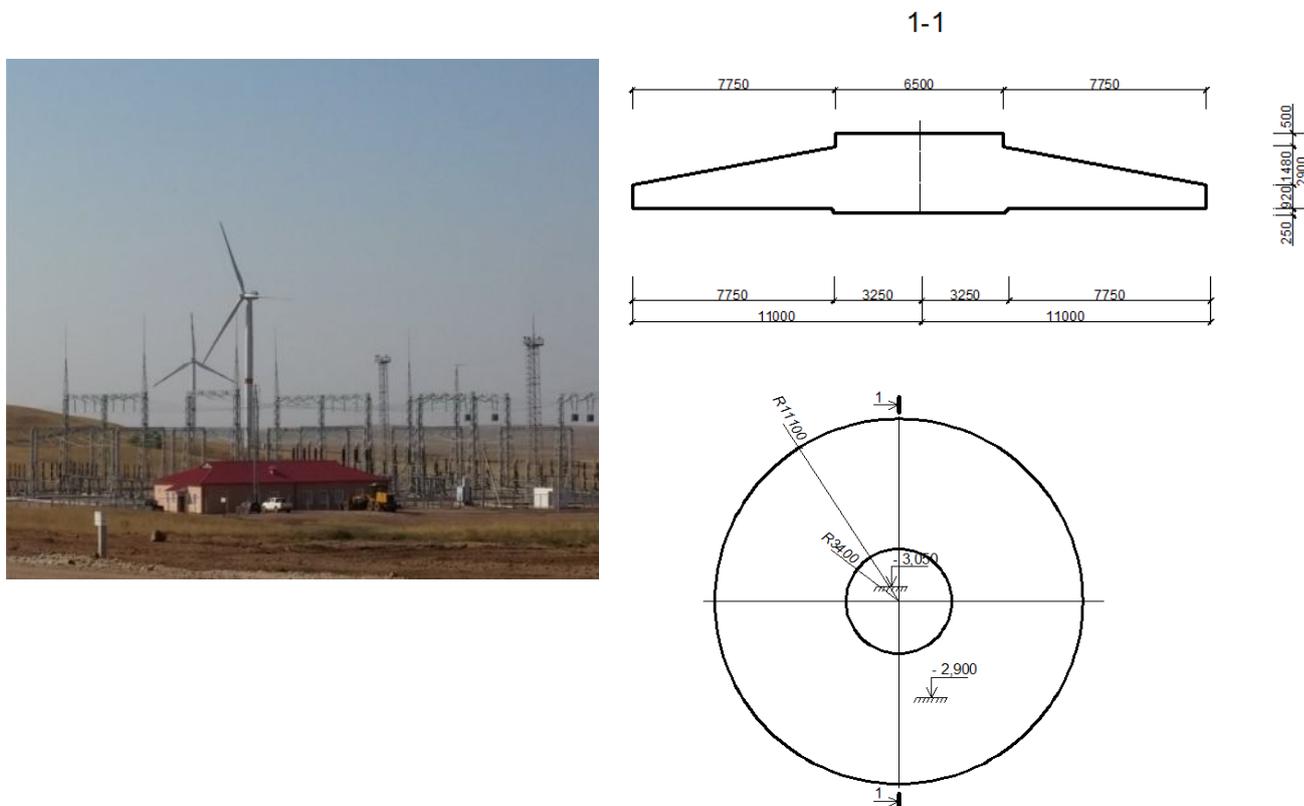


Рис. 1. Действующая Ерейментауская ВЭС и плитный фундамент

В качестве фундамента было принято решение применить плитный фундамент диаметром 22 м.

#### Методика измерений колебаний и вибраций на приборе VIBRA Profound

Натурные наблюдения, а также измерения вибрационного воздействия на фундамент ВЭУ были проведены с помощью прибора VIBRA Profound. Прибор позволяет определить скорость, ускорение, частоту вибраций, а также перемещения фундамента, вызванные напором ветра.

Система прибора отвечает национальным и международным стандартам SBR 2002, DIN 4150 и DIN 45669.

Выполнение измерений проведено в следующей последовательности:

- 1) Измерения вибрационного воздействия проводились на площадке Ерейментау с 26 по 27 сентября 2015 года.
- 2) Датчик вначале устанавливался на фундаменте ВЭУ на расстоянии 100 мм от башни. Вторым этапом было установление датчика на башне ВЭУ.
- 3) Стандарт измерения отвечает международным стандартам DIN 4150 и DIN 45669.
- 4) Промежуточные измерения отсчитывались через каждый 10 секунд.

#### Оценка ветрового потенциала на площадке ВЭС

В рамках проекта ПРООН по ветроэнергетике на площадке были произведены годовые замеры скорости и направления ветра. Замеры производились в соответствии с международными стандартами в области измерений скорости ветра для оценки ветрового потенциала (IEA/IEC) [2].

Распределения скорости ветра, параметры Weibull на высоте 51 м (ось гондолы) для площадки Ерейментауской ВЭС, показаны на рисунке 2.

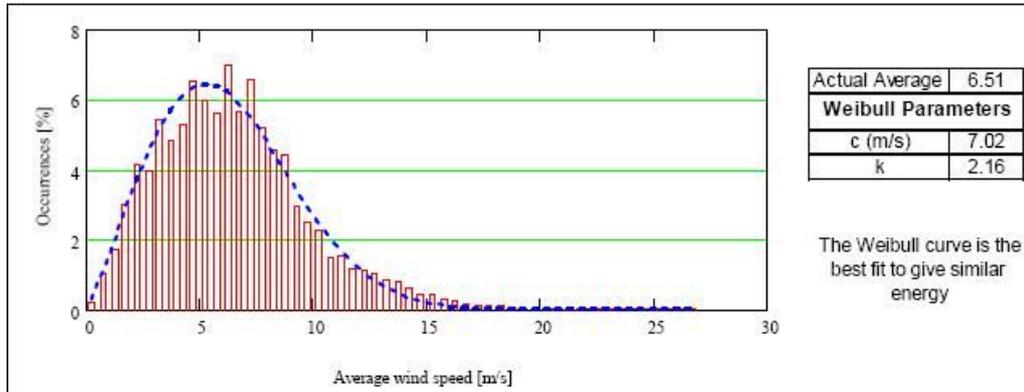


Рис. 2. Распределение скорости ветра и параметры Weibull на высоте 51 м

Роза направления ветра и роза энергии ветра на высоте 50м показаны на рисунке 3. Роза направления ветра показывает, что преобладающее часть ветра имеет направление с юго-востока. Распределение энергии ветра показывает, что основная часть энергии ветра идет с юго-восточного направления.

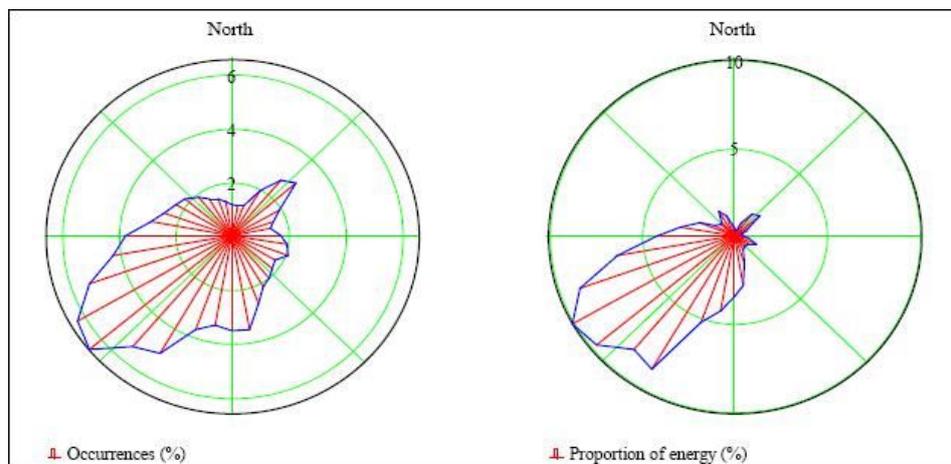


Рис. 3. Роза направления ветра (слева) и роза энергии ветра (справа)

По результатам замеров напора ветра построена диаграмма сезонного распределения скорости ветра, демонстрирующего характер изменения скорости ветрового потока по месяцам по отношению к среднегодовой скорости ветра (Рис. 4).

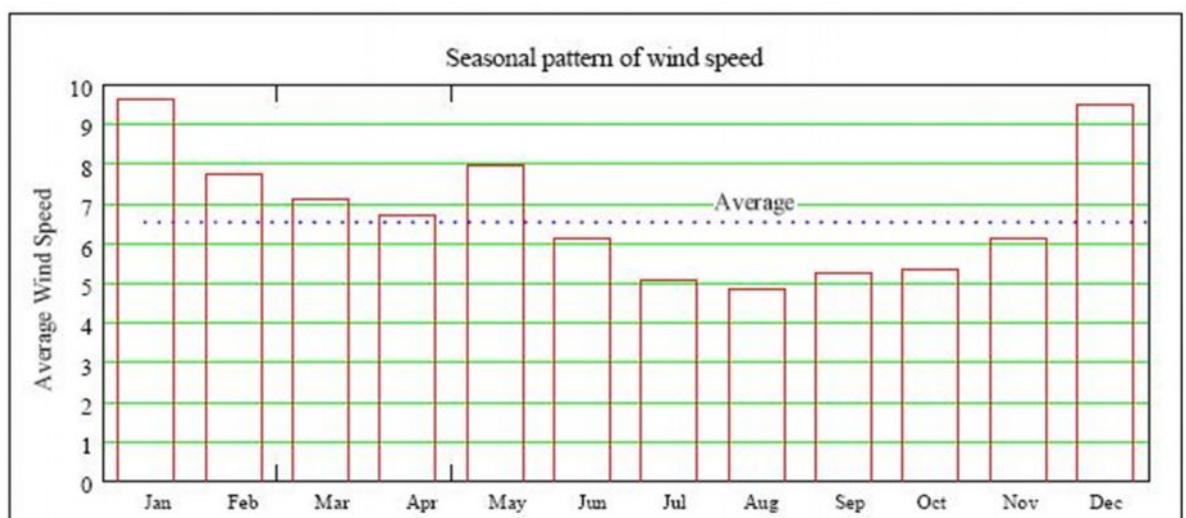


Рис. 4. Ежемесячные средние скорости ветра на высоте 50 м

### Проведение испытания фундамента ВЭУ

С применением прибора VIBRA Profound проводились испытания фундамента ВЭУ на стройплощадке на вибрационные воздействия.

Перед началом измерения вибродатчики устанавливаются на фундамент ВЭУ на расстоянии 100 мм от башни ВЭУ, во избежание прямого контакта с источником возбуждения (башни)(Рис. 5.).

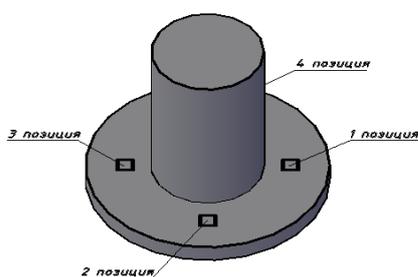


Рис. 5. Фиксирование вибродатчика на фундаменте ВЭУ

С помощью прибора получен график зависимости абсолютных перемещений фундамента и времени на данном участке (Рис. 6.). По графику видны максимальные значения перемещений для каждой позиции. Для 1 позиции максимальные значения перемещений 0,1 мм, для 2 и 3 позиции максимальные значения перемещений 0,2мм, для 4 позиции соответственно значения 0,3мм при максимальном напоре ветра 4,75 м/с.

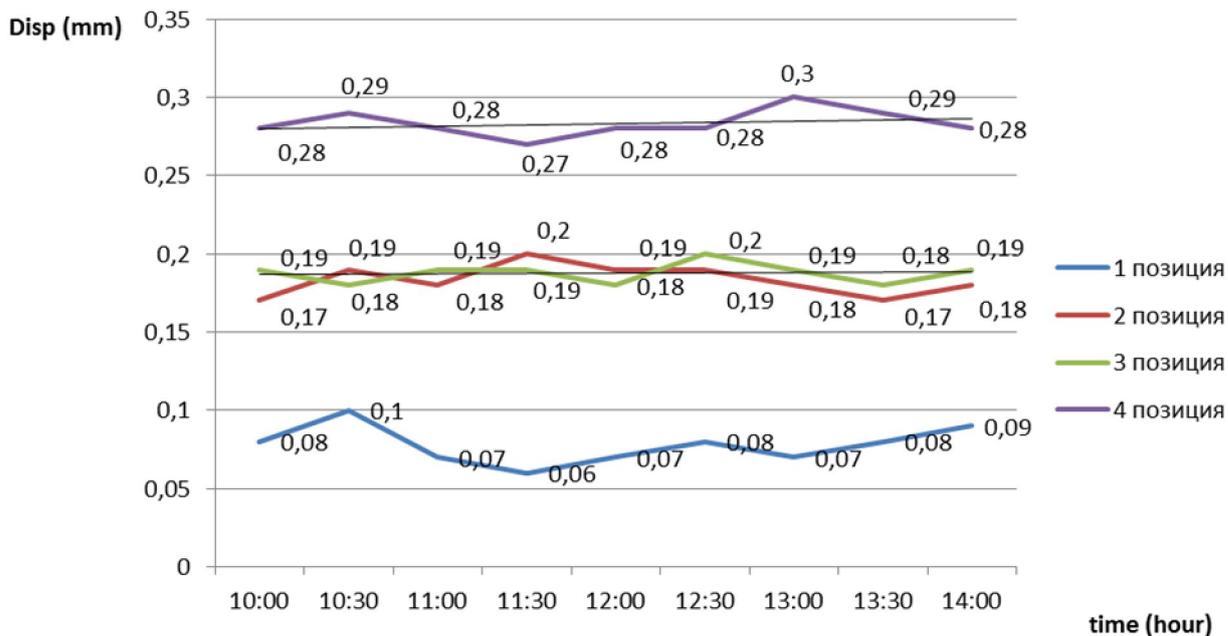


Рис. 6. График зависимости перемещений от времени

Вторым этапом было установление вибродатчика непосредственно на источник возбуждения (башню) ВЭУ. Результаты измерений вибраций показаны на графиках зависимости перемещений, ускорений, частоты вибраций, скорости вибраций от скорости ветра (Рис.7.).

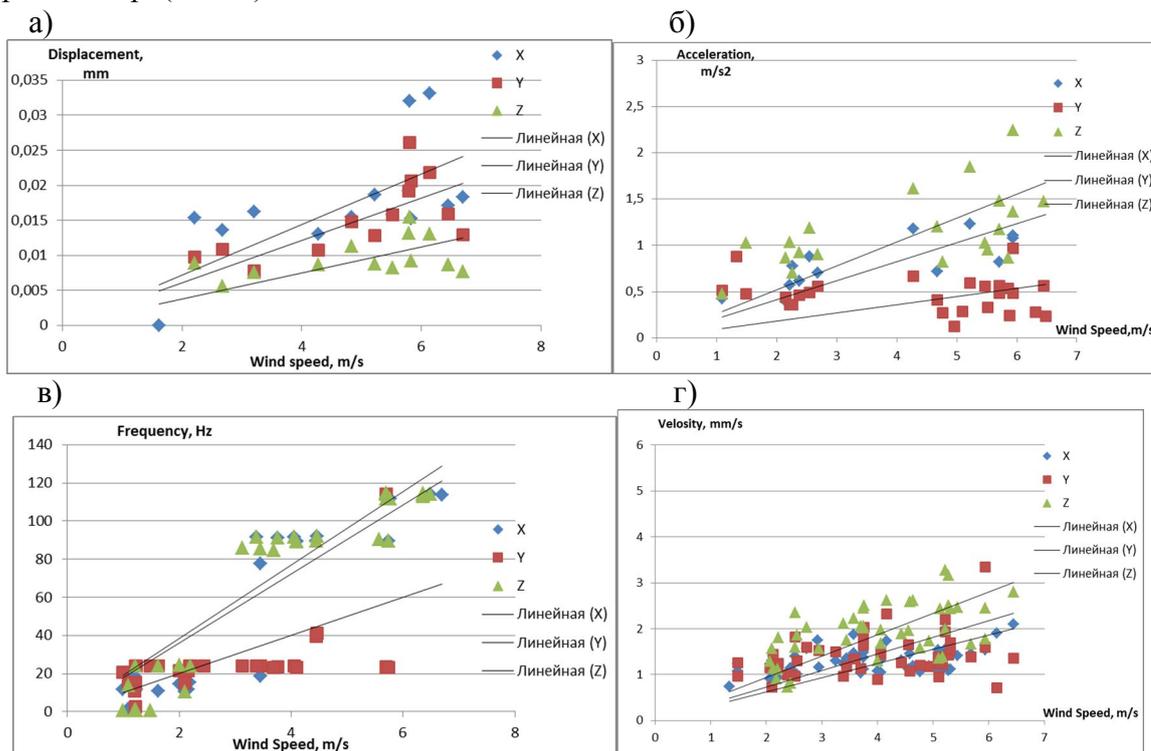


Рис.7. Графики зависимости перемещений, ускорений, частоты вибраций, скорости вибраций от скорости ветра:

- а) график зависимости перемещений и скорости ветра
- б) график зависимости ускорений и скорости ветра
- в) график зависимости частоты вибраций и скорости ветра
- г) график зависимости скорости вибраций и скорости ветра

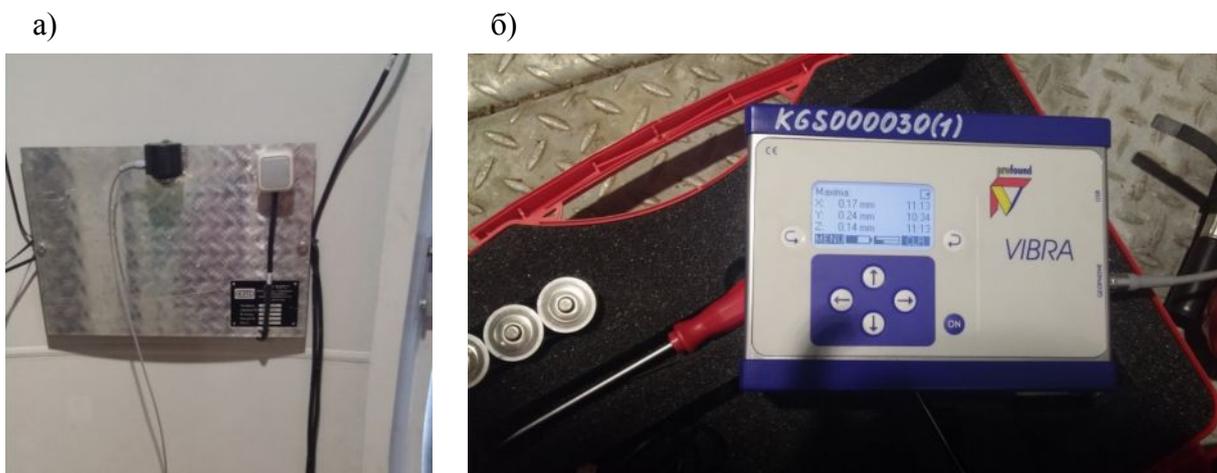


Рис. 8. Расположение и показания датчика измерений колебаний:  
 а) расположение датчика на башне ВЭУ  
 б) показания датчика максимальных перемещений башни ВЭУ

### Выводы

По результатам измерений был сделан прогноз вибрационных параметров фундамента ВЭУ от напора ветра. Максимальные значения параметров при максимальном ветровом напоре данного региона составляют:

- 1) Максимальное перемещение по  $X=0,038$  мм,  $Y=0,031$  мм,  $Z=0,08$  мм;
- 2) Максимальное ускорение по  $X=2,8$  м/с<sup>2</sup>,  $Y=2,1$  м/с<sup>2</sup>,  $Z=0,7$  м/с<sup>2</sup>;
- 3) Максимальная частота вибраций по  $X=122$  Гц,  $Y=120$  Гц,  $Z=65$  Гц;
- 4) Максимальная скорость вибраций по  $X=4,2$  мм/с,  $Y=3,6$  мм/с,  $Z=2,8$  мм/с.

Данные параметры перемещений для башни ВЭУ не превышают предельно допустимого значения 5мм [3].

В дальнейшем необходимо произвести прогноз МКЭ состояния ВЭУ при максимальных ветровых нагрузках.

*Авторы выражают глубокую благодарность работникам Казахстанских компаний ТОО "Первая ветровая электрическая станция" и ТОО«KGS» за техническую поддержку проведения экспериментальных исследований.*

### Список литературы

1. Национальная программа развития ветроэнергетики до 2015 г. с перспективой до 2024г (проект) [Текст] / Алматы, Астана. – 2007.
2. Проект Правительства Казахстана и Программы Развития ООН « Казахстан – инициатива развития рынка ветроэнергетики», Ветровая электростанция вблизи г. Ерейментау, Прединвестиционное исследование [Текст] / Алматы. – 2008.
3. СТО 70238424.27.100.059-2009. Ветроэлектростанции (ВЭС). [Текст] Условия создания. Нормы и требования.