

**ВПЛИВ ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ (ВЕС)
З ВІТРОТУРБІНАМИ WTU 5,2-140 НА АКУСТИЧНИЙ СТАН
НАЙБЛИЖЧИХ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ**

Семашко П.В.
Думанський В.Ю.
Галак С.С.
Безверха А.П.
Гоц О.В.
Сердюк Є.А.

Державна установа
«Інститут громадського
здоров'я ім. О.М. Марзеєва
Національної академії
медичних наук України»,
м. Київ, Україна

- **МЕТА.** Оцінити акустичний вплив вітрової електростанції з вітротурбінами WTU 5,2-140 на прилеглі сільбищні території та обґрунтувати мінімальний санітарний розрив між вітровими енергетичними установками і житловою забудовою.
- **МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ.** Проведено натурні акустичні вимірювання та розрахунки рівнів звукового тиску і звукової потужності вітрової турбіни WTU 5,2-140. Дослідження виконували відповідно до вимог ДСТУ EN 61400-11:2022, ISO 1996-1:2016, ISO 1996-2:2017 та ISO 9613-2:2024. Гігієнічну оцінку результатів здійснювали згідно з ДСН № 463-2019. Визначали відстані від ВЕУ до найближчих населених пунктів, проводили аналіз октавних спектрів шуму, оцінювали невизначеність вимірювань та здійснювали прогнозування рівнів шуму на сільбищних територіях.
- **РЕЗУЛЬТАТИ.** Встановлено, що середній рівень звуку вітрової турбіни WTU 5,2-140 при швидкості вітру 10 м/с становить 57,5 дБА, а рівень звукової потужності — 111,5±2 дБА. При відстані 913 м від ВЕУ до найближчої житлової забудови прогнозовані та фактичні рівні шуму перевищували допустимі нормативи для нічного часу доби в октавних смугах 250–1000 Гц; перевищення рівня звуку становило до 0,5 дБА. У населених пунктах, розташованих на відстанях понад 1000 м, рівні шуму переважно відповідали вимогам ДСН № 463-2019. Порівняння результатів математичного моделювання за ISO 9613-2:2024 з натурними вимірюваннями підтвердило достовірність прогнозовної моделі для оцінки акустичного впливу ВЕС.
- **ВИСНОВКИ.** Встановлено, що для забезпечення нормативних рівнів шуму при експлуатації вітрових турбін WTU 5,2-140 необхідний санітарний розрив повинен бути не менше 1250 м від центру ротора ВЕУ до найближчої житлової забудови. Отримані результати можуть бути використані для удосконалення санітарно-гігієнічних вимог до проектування та експлуатації сучасних ВЕС великої потужності в Україні.
- **КЛЮЧОВІ СЛОВА:** шумове забруднення, вітрова енергетика, акустика, моніторинг довкілля, вплив факторів довкілля.

**IMPACT OF A WIND POWER PLANT (WPP)
WITH WTU 5.2-140 WIND TURBINES ON THE ACOUSTIC
ENVIRONMENT OF THE NEAREST RESIDENTIAL AREAS**

Semashko P.V.
Dumanskyi V.Yu.
Halak S.S.
Bezverkha A.P.
Hots O.V.
Serdiuk Ye.A.

State Institution
«Marzieiev Institute
for Public Health
of the National Academy
of Medical Sciences
of Ukraine»,
Kyiv, Ukraine

- **AIM.** To assess the acoustic impact of a wind power plant equipped with WTU 5.2-140 wind turbines on adjacent residential areas and to substantiate the minimum sanitary setback distance between wind energy installations and residential development.
- **MATERIALS AND METHODS.** Field acoustic measurements and calculations of sound pressure and sound power levels of the WTU 5.2-140 wind turbine were performed. The study was conducted in accordance with DSTU EN 61400-11:2022, ISO 1996-1:2016, ISO 1996-2:2017, and ISO 9613-2:2024 requirements. Hygienic assessment of the obtained results was carried out according to State Sanitary Norms No. 463-2019. Distances from wind turbines to the nearest settlements were determined, octave-band noise spectra were analyzed, measurement uncertainty was assessed, and noise levels in residential areas were predicted.
- **RESULTS.** The average sound level of the WTU 5.2-140 wind turbine at a wind speed of 10 m/s was found to be 57.5 dBA, while the sound power level was 111.5±2 dBA. At a distance of 913 m from the wind turbine to the nearest residential area, the predicted and measured noise levels exceeded permissible nighttime limits in the 250–1000 Hz octave bands; the exceedance of the overall sound level reached up to 0.5 dBA. In settlements located more than 1000 m away, noise levels generally complied with the requirements of State Sanitary Norms No. 463-2019. Comparison of mathematical modeling results according to ISO 9613-2:2024 with field measurements confirmed the sufficient reliability of the predictive model for assessing the acoustic impact of wind power plants.
- **CONCLUSIONS.** It was established that, in order to ensure compliance with regulatory noise limits during the operation of WTU 5.2-140 wind turbines, the sanitary setback distance should be at least 1250 m from the turbine rotor center to the nearest residential development. The obtained results may be used to improve sanitary and hygienic requirements for the design and operation of modern high-capacity wind power plants in Ukraine.
- **KEYWORDS:** noise pollution, wind energy, acoustics, environmental monitoring, environmental exposure.

ВСТУП

Стрімкий розвиток відновлюваної енергетики в світі та в Україні супроводжується активним впровадженням вітрових електростанцій (ВЕС) великої потужності. Сучасна тенденція розвитку вітроенергетики полягає у переході до використання вітрових турбін потужністю понад 5 МВт із збільшеними висотою башти та діаметром ротора. Такі технічні зміни дозволяють суттєво підвищити ефективність генерації електроенергії, особливо в районах зі складним рельєфом та нестабільними вітровими характеристиками. Разом з тим збільшення електричної потужності вітрових турбін цього типу та діаметру їх ротора призводять до зростання їх акустичної потужності, що може суттєво впливати на акустичний стан, прилеглих до ВЕС, територій населених пунктів.

За даними сучасних систематичних оглядів [1, 2], шум від вітрових турбін є одним із провідних факторів впливу ВЕС на населення прилеглих територій. У науковій літературі встановлено зв'язок між експозицією до шуму ВЕУ та виникненням скарг на подразнення, порушення сну, погіршення психоемоційного стану та зниження якості життя населення [8, 9, 12, 13]. При цьому рівень шумового впливу суттєво залежить від відстані до турбін, метеорологічних умов, рельєфу місцевості та потужності самих установок [10].

У міжнародній практиці розміри необхідних відстаней від ВЕС до житлової забудови визначаються переважно на основі вимірів акустичних характеристик вітрових турбін з подальшим моделюванням для прогнозування очікуваних рівнів звуку та звукових тисків на прилеглих територіях. Водночас для турбін великої потужності питання достатності таких відстаней поки залишається дискусійним та потребує додаткових натурних досліджень, особливо в умовах складного рельєфу та наближення сельбищних територій до ВЕС [11, 14].

Іншими словами, для подальшого практичного застосування цих турбін, результати математичного моделювання повинні бути підтверджені результатами натурних акустичних вимірів.

Мета. Оцінити акустичний вплив вітрової електростанції з вітротурбінами WTU 5,2-140 на прилеглі сельбищні території та обґрунтувати мінімальний санітарний розрив між вітровими енергетичними установками і житловою забудовою.

Мета роботи досягалась вирішенням наступних основних завдань:

1. Визначити висоти розташування над рівнем моря найближчих до ВЕС населених пунктів та найближчих до населених пунктів майданчиків ВЕУ з вітровими турбінами WTU 5,2-140.
2. Розрахувати відстані від центрів роторів ВЕУ до найближчого житла.
3. Провести виміри рівнів звукових тисків та корегованих рівнів звуку (від ВЕУ при швидкості вітру 7,5 м/с та на територіях найближчих населених пунктів).
4. Проаналізувати акустичні спектри ВЕУ на наявність тональних складових.
5. Розрахувати розширену невизначеність вимірів акустичних характеристик ВЕУ.
6. Перерахувати результати вимірів при вітрі 7,5 м/с в рівні при швидкості вітру 10 м/с.
7. Розрахувати рівні звукової потужності в октавних смугах та корегований рівень звукової потужності з урахуванням невизначеностей (при вітрі 10 м/с).
8. Розрахувати очікувані октавні рівні та рівень звуку на найближчих до ВЕС територіях населених пунктів та надати їм гігієнічну оцінку.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Натурні акустичні вимірювання рівнів звукового тиску проводилися вимірювачем рівня звуку — аналізатором спектра портативним SV977D в Мукачівському районі Закарпатської області. Кількість населення в найближчих до ВЕУ населених пунктах становило приблизно 50-600 мешканців.

Розрахунки звукової потужності вітрової турбіни WTU 5,2-140 (5,2 МВт) проводили згідно з ДСТУ EN 61400-11:2022 «Вітрові турбіни. Частина 11. Методи вимірювання акустичного шуму» (EN 61400-11:2013, IDT; IEC 61400-11:2012, IDT) [3].

Акустичні виміри та розрахунки проводили згідно з ISO 1996-1:2016 «Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 1: Basic quantities and assessment procedures» [4], ISO 1996-2:2017 «Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of sound pressure levels» [5] та ISO 9613-2:2024. Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: Engineering method for the prediction of sound pressure levels outdoors [6].

Медико-санітарну оцінку отриманим результатам проводили згідно з ДСН № 463-2019 [7].

З огляду на близькість місця проведення вимірювань до ВЕУ значення рівнів звукового тиску на частоті 31,5 Гц були виключені з подальших розрахунків.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ
ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати досліджень представлені в табл. 1–5.

Таблиця 1. Висоти території майданчиків ВЕУ та найближчих селищ над рівнем моря

Точки вимірів	Висоти найближчих ВЕУ над рівнем моря, м	Висоти селищ над рівнем моря, м
Селище В	965	598
Селище L	880	720
Селище І	920	680
Селище К	850	690

За результатами розрахунків відстаней між селами та ВЕУ за їх координатами (з урахуванням висот над рівнем моря) встановлено, що: відстань від околиць с. В до найближчої ВЕУ дорівнює 2595,9 м. Відстань від околиць с. L до найближчої ВЕУ дорівнює 912,6 м. Відстань від околиць с. І до найближчої ВЕУ дорівнює 1055,4 м. Відстань від околиць с. К до найближчої ВЕУ дорівнює 2618,3 м.

Результати вимірів рівнів звуку та звукових тисків від вітрових турбіни WTU 5,2-140 при швидкості вітру 7,5 м/с та розрахунки невизначеностей представлені в табл. 2.

Стандартна невизначеність середнього (u_A) для рівня звуку дорівнює 0,851 дБА; сумарна стандартна невизначеність (u_C) дорівнює 1,01 дБ (А); розширена невизначеність (U) ви-

мірів акустичних характеристик ВЕУ з вітро-турбіною WTU 5,2-140 (при коефіцієнті охопту для довірчої вірогідності 95%, $k=2$) дорівнює 2,02 дБ (А).

В табл. 3 представлено перерахунок рівнів звукових тисків і рівня звуку при швидкості вітру 7,5 м/с в рівні звукових тисків і рівень звуку при швидкості вітру 10 м/с.

Середній рівень звуку вітрової турбіни дорівнює: 57,5 дБА при швидкості вітру 10 м/с.

Розрахунки рівнів звукової потужності вітрової турбіни WTU 5,2-140 при швидкості вітру 10 м/с представлені в табл. 4.

Рівень звукової потужності вітрової турбіни WTU 5,2-140 при швидкості вітру 10 м/с дорівнює 111,5±2 дБА.

В табл. 5 представлено розрахунок очікуваних рівнів звукових тисків на найближчий сельбищній території (селище L) від турбіни WTU 5,2-140 при відстані 913 м.

При відстані від центру ротора ВЕУ з WTU 5,2-140 до мікрофону в 913 м розрахункові рівні звукових тисків та рівень звуку перевищують допустимі значення для нічного часу доби (в октавній смузі 250 Гц — на 2,0 дБ; в октавній смузі 500 Гц — на 3,6 дБ; в октавній смузі 1000 Гц — на 0,1 дБ).

В табл. 6 представлено розрахунок очікуваних рівнів звукових тисків на найближчий сельбищній території (селище L) від турбіни WTU 5,2-140 при відстані 1250 м.

При відстані від центру ротора ВЕУ з WTU 5,2-140 до мікрофону в 1250 м розрахункові рівні звукових тисків та рівень звуку не перевищують допустимих значень для нічного часу доби.

В табл. 7 представлено результати вимірів рівнів звуку та звукових тисків від турбіни WTU 5,2-140 на найближчих сельбищних територіях та їх гігієнічна оцінка.

Таблиця 2. Результати розрахунків вимірів та невизначеностей

№ виміру	Рівні звукових тисків, дБ, в октавних смугах з середньгеометричними значеннями частот, Гц:								Рівні звук, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Розрахунок середнього арифметичного результатів вимірів (вітер 7,5 м/с)									
1	53,6	60,8	61,3	56,0	46,4	48,1	41,3	36,0	55,9
2	51,6	46,1	39,3	42,7	38,7	46,4	43,9	41,8	58,7
3	49,7	50,7	54,7	46,7	42,5	35,9	30,6	28,7	51,6
4	62,9	59,5	55,7	53,0	48,3	42,9	37,7	30,8	54,1
5	59,8	60,3	56,8	54,2	48,3	41,9	35,7	29,8	54,7

Закінчення таблиці 2

№ виміру	Рівні звукових тисків, дБ, в октавних смугах з середньгеометричними значеннями частот, Гц:								Рівні звук, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
6	59,3	60,7	57,3	55,0	49,7	44,0	36,7	30,8	55,4
7	54,8	59,1	57,3	54,3	49,5	45,0	37,1	32,5	55,6
8	55,9	59,1	57,9	57,1	49,5	43,6	36,4	32,2	56,2
9	61,3	58,8	57,9	55,8	50,3	44,3	37,8	30,2	56,4
Середнє	56,5	57,2	55,4	52,8	47,0	43,6	37,5	32,5	53,8
Розрахунок стандартного відхилення вибірки, s									
(Li – Lcp) ²	8,7	12,7	35,3	10,5	0,4	20,6	14,7	12,0	4,4
	24,4	124,0	257,8	101,1	69,3	8,0	41,4	85,9	23,9
	46,8	42,7	0,4	36,7	20,5	58,8	47,2	14,7	4,9
	40,4	5,1	0,1	0,1	1,6	0,4	0,1	3,0	0,1
	10,6	9,4	2,1	2,1	1,6	2,8	3,1	7,5	0,8
	7,6	12,0	3,8	5,0	7,2	0,2	0,6	3,0	2,5
	3,0	3,5	3,8	2,4	6,1	2,1	0,1	0,0	3,2
	0,4	3,5	6,5	18,9	6,1	0,0	1,1	0,1	5,7
	22,6	2,5	6,5	9,3	10,7	0,5	0,1	5,4	6,7
Σ =	164,6	215,3	316,3	186,0	123,6	93,4	108,4	131,6	52,2
n =	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
n – 1	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
s =	4,536	5,188	6,288	4,822	3,930	3,416	3,681	4,056	2,554
Розрахунок стандартної невизначеності середнього, u _A									
u _A =	1,512	1,729	2,096	1,607	1,310	1,139	1,227	1,352	0,851
Розрахунок сумарної стандартної та розширеної невизначеності									
Стандартна невизначеність, u _A	1,512	1,729	2,096	1,607	1,310	1,139	1,227	1,352	0,851
Коефіцієнт чутливості, c _i	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Акустичний калібратор, дБ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,15
Шумомір і мікрофон, дБ	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Вплив фоновому шуму, дБ	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Вітрозахисний екран, дБ	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2
Похибка метеодатчика, дБ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Сумарна стандартна невизначеність, u _c	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Коефіцієнт охопту для довірчої вірогідності 95% k=2	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Розширена невизначеність, U	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02

Таблиця 3. Перерахунок рівнів звукових тисків і рівня звуку при швидкості вітру 7,5 м/с в рівні звукових тисків і рівень звуку при швидкості вітру 10 м/с

Середні рівні при швидкостях вітру	Рівні звукових тисків, дБ, в октавних смугах з середньгеометричними значеннями частот, Гц:								Рівні звук, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Середні рівні при вітрі 7,5 м/с	56,5	57,2	55,4	52,8	47,0	43,6	37,5	32,5	53,8
ΔL, дБ, дБА	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
Середні рівні при вітрі 10 м/с	60,2	60,9	59,1	56,5	50,7	47,3	41,2	36,2	57,5

Таблиця 4. Розрахунки рівнів звукової потужності турбіни WTU 5,2-140 при швидкості вітру 10 м/с

Критерії для розрахунків	Параметри критеріїв в октавних смугах з середньо-геометричними значеннями октавних смуг, Гц:							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Висота до осі ротора, м	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0
Відстань від мікрофона до башти, м	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Довжина лопаті, м	78,6	78,6	78,6	78,6	78,6	78,6	78,6	78,6
Висота мікрофону над поверхнею землі, м	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Відстань від кінця лопаті до поверхні землі, м	61,4	61,4	61,4	61,4	61,4	61,4	61,4	61,4
Відстань від кінця лопаті до рівня мікрофону, м	59,9	59,9	59,9	59,9	59,9	59,9	59,9	59,9
Відстань від площини ротора до вежі, м	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Відстань від мікрофону до центру ротора, м	139,5	139,5	139,5	139,5	139,5	139,5	139,5	139,5
ВЕУ (20 м від башти, швидкість вітру 10,2 м/с)	60,2	60,9	59,1	56,5	50,7	47,3	41,2	36,2
Рівень звуку, дБА	57,5							
Lw, дБ	114,2	114,9	113,1	110,5	104,7	101,3	95,2	90,2
LwA, дБА	111,5							
Розширена невизначеність, U	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Lw з урахуванням розширеної невизначеності, дБ	116,2	116,9	115,1	112,5	106,7	103,3	97,2	92,2
LwA з урахуванням розширеної невизначеності, дБА	113,5							

Таблиця 5. Розрахунок очікуваних рівнів звукових тисків на найближчій сельбищній території (селище L) від турбіни WTU 5,2-140 при відстані 913 м

Критерії для розрахунку	Рівні звукових тисків та їх зниження, дБ, в октавних смугах з середньгеометричними значеннями частот, Гц:								дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Lw турбіни з урахуванням розширеної невизначеності, дБ, дБА	116,2	116,9	115,1	112,5	106,7	103,3	97,2	92,2	113,5
Розрахунок корекції, яка враховує спрямованість випромінювання (Dc), дБ									
Ω — просторовий кут випромінювання, рад	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56
Dc — корекція на спрямованість випромінювання, дБ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Розрахунок зниження рівнів за рахунок:									
Вплив дивергенції									
d — відстань до приймача, м	912,6	912,6	912,6	912,6	912,6	912,6	912,6	912,6	912,6
d ₀ — референтна відстань (= 1 м)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
A _{div} — за рахунок геометричної дивергенції (точкове джерело, дБ(А))	70,21	70,21	70,21	70,21	70,21	70,21	70,21	70,21	70,21
Затухання в атмосфері, дБ(А)									
d — дійсна відстань до приймача, м	912,6	912,6	912,6	912,6	912,6	912,6	912,6	912,6	912,6
α _{atm} — коефіцієнт загасання в атмосфері (10 град. С, 70% вологість), дБ/км	0,10	0,40	1,00	1,90	3,70	9,70	32,80	117,00	1,90
A _{atm} , дБ	0,09	0,37	0,91	1,73	3,38	8,85	29,93	106,78	1,73

Закінчення таблиці 5

Критерії для розрахунку	Рівні звукових тисків та їх зниження, дБ, в октавних смугах з середньгеометричними значеннями частот, Гц:								дБА	
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Вплив ґрунту (затухання у приземному шарі)										
As (поблизу джерела)										
Gs	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
hs	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5
dp	861,9	861,89	861,89	861,9	861,9	861,89	861,9	861,89	861,89	861,9
	-1,5									
a''(h)		1,5								
b''(h)			1,5							
c''(h)				1,5						
d''(h)					1,5					
As, дБ	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5
Ar (поблизу РТ)										
Gr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
hr	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
dp	861,9	861,89	861,89	861,9	861,9	861,89	861,9	861,89	861,89	861,9
	-1,5									
a''(h)		1,5								
b''(h)			1,5							
c''(h)				1,5						
d''(h)					1,5					
Ar, дБ	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5
At (між джерелом та РТ)										
dp	861,9	861,89	861,89	861,9	861,9	861,89	861,9	861,89	861,89	861,9
hs	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5
hr	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
30*(hs+hr)	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
q	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Am, дБ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agr''	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
Kgeo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Agr	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00
A — сумарне зниження, дБ	67,3	67,6	68,1	68,9	70,6	76,1	97,1	174,0	68,9	
Очікувані рівні в РТ, дБ та, дБА	48,9	49,3	47,0	43,6	36,1	27,2	0,1	-81,8	44,6	
Допустимі рівні, прилегла територія, ніч	60	52	45	40	36	34	33	32	45	
Відносно доп. рівнів	-11,1	-2,7	2,0	3,6	0,1	-6,8	-32,9	-113,8	-0,4	
Поправка (Cmet)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Таблиця 6. Розрахунок очікуваних рівнів звукових тисків на найближчій сельбищній території (селище L) від турбіни WTU 5,2-140 при відстані 1250 м

Критерії для розрахунку	Рівні звукових тисків та їх зниження, дБ, в октавних смугах з середньгеометричними значеннями частот, Гц:								дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Lw турбіни з урахуванням розширеної невизначеності (верхня межа 95% інтервалу), дБ, дБА	116,2	116,9	115,1	112,5	106,7	103,3	97,2	92,2	113,5
<i>Розрахунок корекції на спрямованість випромінювання (Dc), дБ:</i>									
Ω — просторовий кут випромінювання, рад	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56	12,56
Dc — корекція на спрямованість випромінювання, дБ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Розрахунок зниження рівнів за рахунок:</i>									
<i>Вплив дивергенції</i>									
d — дійсна відстань від джерела до приймача, м	1250,0	1250,0	1250,0	1250,0	1250,0	1250,0	1250,0	1250,0	1250,0
d ₀ — референтна відстань (=1 м)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
A _{div} — послаблення за рахунок дивергенції — точкове джерело, дБ(А)	72,94	72,94	72,94	72,94	72,94	72,94	72,94	72,94	72,94
<i>Затухання в атмосфері, дБ(А)</i>									
d — дійсна відстань від джерела до приймача, м	1250,0	1250,0	1250,0	1250,0	1250,0	1250,0	1250,0	1250,0	1250,0
α_{atm} — коефіцієнт загасання в атмосфері (10 град.С, 70% вологість), дБ/км	0,10	0,40	1,00	1,90	3,70	9,70	32,80	117,00	1,90
A _{atm} , дБ	0,13	0,50	1,25	2,38	4,63	12,13	41,00	146,25	2,38
<i>Вплив ґрунту</i>									
<i>As (біля джерела)</i>									
Gs	0	0	0	0	0	0	0	0	0
hs	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5
dp	861,9	861,89	861,89	861,9	861,9	861,89	861,9	861,89	861,9
	-1,5								
a''(h)		1,5							
b''(h)			1,5						
c''(h)				1,5					
d''(h)					1,5				
As, дБ	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5
<i>Ar (поблизу РТ)</i>									
Gr	0	0	0	0	0	0	0	0	0
hr	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
dp	861,9	861,89	861,89	861,9	861,9	861,89	861,9	861,89	861,9
	-1,5								
a''(h)		1,5							
b''(h)			1,5						
c''(h)				1,5					

Закінчення таблиці 6

Критерії для розрахунку	Рівні звукових тисків та їх зниження, дБ, в октавних смугах з середньгеометричними значеннями частот, Гц:								дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
d''(h)					1,5				
Ar, дБ	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5
At (між джерелом та РТ)									
dp	861,9	861,89	861,89	861,9	861,9	861,89	861,9	861,89	861,9
hs	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5	298,5
hr	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
30*(hs+hr)	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
q	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gm	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Am, дБ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agr''	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
Kgeo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Agr	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00
A — Сумарне зниження, дБ	70,1	70,4	71,2	72,5	74,6	82,1	110,9	216,2	72,3
Очікувані рівні в РТ, дБ, дБА	46,1	46,5	43,9	40,0	32,1	21,2	-13,7	-124,0	41,2
Допустимі рівні на прилеглій території, ніч	60	52	45	40	36	34	33	32	45
Відносно допустимих рівнів	-13,9	-5,5	-1,1	0,0	-3,9	-12,8	-46,7	-156,0	-3,8
Cмет, дБ	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблиця 7. Результати вимірів рівнів звуку та звукових тисків від турбіни WTU 5,2-140 на найближчих сельбищних територіях та їх гігієнічна оцінка

Селище	Рівні звукових тисків в октавних рівнях з геометричними значеннями частот, Гц:								дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Селище В	48,6	51,4	43,6	39,5	31,5	33	30,3	27,1	42,2
Доп. рівні, ніч, дБ, дБА	60	52	45	40	36	34	33	32	45
Відносно доп. рівнів, ніч	-11,4	-0,6	-1,4	-0,5	-4,5	-1,0	-2,7	-4,9	-2,8
Селище L	51,3	49	42,6	43,8	42,5	31,1	27	28	45,7
Фоновий рівень, день, дБ, дБА	44	38	34	32	30	27	24	21	35,3
Без фону, день, дБ, дБА	50,4	48,6	42,0	43,5	42,2	29,0	24,0	27,0	45,2
Доп. рівні, день, дБ, дБА	67	60	54	49	46	44	43	42	55
Відносно доп. рівнів, день	-16,6	-11,4	-12,0	-5,5	-3,8	-15,0	-19,0	-15,0	-9,8
Фоновий рівень, ніч, дБ, дБА	38	37	30	28	27	23	20	18	31,8
Без фону, ніч, дБ, дБА	51,1	48,7	42,4	43,7	42,4	30,4	26,0	27,5	45,5
Доп. рівні, ніч, дБ, дБА	60	52	45	40	36	34	33	32	45
Відносно доп. рівнів, ніч	-8,9	-3,3	-2,6	3,7	6,4	-3,6	-7,0	-4,5	0,5

Селище	Рівні звукових тисків в октавних рівнях з геометричними значеннями частот, Гц:								дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Селище І	42,6	36	31,4	31,4	32,4	31,8	25,8	26,8	37,5
Доп. рівні, ніч, дБ, дБА	60	52	45	40	36	34	33	32	45
Відносно доп. рівнів	-17,4	-16,0	-13,6	-8,6	-3,6	-2,2	-7,2	-5,2	-7,5
Селище К	34,4	32,3	30,3	34,3	36,5	33,2	28,4	27,4	40,0
Доп. рівні, ніч, дБ, дБА	60	52	45	40	36	34	33	32	45
Відносно доп. рівнів	-26	-19,7	-14,7	-5,7	0,5	-0,8	-4,6	-4,6	-5,0

Результати вимірів рівнів звуку та звукових тисків від турбіни WTU 5,2-140 на найближчих сельбищних територіях показали наступне.

Селище В. Рівні звукових тисків і рівень звуку відповідають вимогам ДСН № 463-2019 для денного та нічного часу доби.

Селище Л. Зафіксовано перевищення допустимого рівня звукового тиску в октавній смузі 500 Гц (для нічного часу доби) на 3,7 дБ; зафіксовано перевищення допустимого рівня звукового тиску для нічного часу доби, в октавній смузі 1000 Гц на 6,4 дБ; рівень звуку перевищує допустимий для нічного часу доби на 0,5 дБА [8–10, 13].

Селище І. Рівні звукових тисків і рівень звуку не перевищують вимоги ДСН 463-2019 для денного та нічного часу доби.

Селище К. Рівні звукових тисків і рівень звуку не перевищують вимоги ДСН 463-2019 для денного та нічного часу доби.

Отримані результати свідчать, що акустичний вплив вітрових турбін великої потужності суттєво залежить не лише від геометричної відстані до житлової забудови, а й від поєднання рельєфних та метеорологічних чинників. Встановлено, що при відстані 913 м від ВЕУ WTU 5,2-140 до найближчої сельбищної території (селище Л) розрахункові та фактичні рівні шуму перевищують нормативні значення для нічного часу доби, насамперед у середньочастотному діапазоні 250-1000 Гц. Саме цей діапазон, за даними сучасних досліджень, є найбільш значущим для формування суб'єктивного дискомфорту, порушень сну та скарг населення, яке проживає поблизу ВЕС [8–10]. Отримані результати узгоджуються з даними міжнародних досліджень щодо необхідності збільшення санітарних відстаней для сучасних турбін потужністю понад 5 МВт.

Порівняння результатів математичного моделювання за ISO 9613-2 із результатами натурних вимірювань показало достатньо високу відповідність прогнозованих та фактичних рівнів звуку на сельбищних територіях. Це підтверджує доцільність використання зазначеної методики для прогнозування акустичного впливу ВЕС на етапі проектування та оцінки впливу на довкілля. Разом із тим результати дослідження свідчать, що для гірських та пересічених територій, де існують значні перепади висот між майданчиками ВЕУ та житловою забудовою, розрахункові моделі потребують обов'язкової верифікації шляхом натурних вимірювань. Подібний підхід рекомендований також у роботі Bowdler & Leventhall [11], де наголошується на необхідності поєднання інструментальних вимірів із прогнозними моделями для оцінки ризиків впливу шуму вітротурбін на населення.

Особливу увагу слід звернути на те, що навіть незначні перевищення нормативних рівнів шуму у нічний час можуть мати суттєве гігієнічне значення. Згідно з рекомендаціями Всесвітньої організації охорони здоров'я, хронічний вплив нічного шуму здатний спричинити порушення сну, підвищення рівня стресу, розвиток серцево-судинних розладів та зниження якості життя населення [1, 8]. У проведеному дослідженні перевищення допустимих рівнів були зафіксовані саме у найближчому до ВЕУ селищі Л, тоді як у населених пунктах, розташованих на відстанях понад 1000–2500 м, нормативні показники дотримувались. Це підтверджує визначальне значення санітарного розриву як основного профілактичного заходу мінімізації шумового навантаження від ВЕС.

Встановлена за результатами дослідження мінімальна відстань 1250 м між ВЕУ WTU 5,2-

140 та житловою забудовою забезпечує досягнення допустимих рівнів шуму з урахуванням розширеної невизначеності вимірювань та несприятливих метеорологічних умов поширення звуку. Отримані результати можуть бути використані при розробці санітарно-гігієнічних вимог до проектування сучасних ВЕС великої потужності, а також у процедурах оцінки впливу на довкілля та планування сельбищних територій.

ВИСНОВКИ

1. У результаті проведених натурних акустичних вимірювань та розрахунків встановлено, що середній рівень звуку вітрової турбіни WTU 5,2-140 при швидкості вітру 10 м/с становить 57,5 дБА, а рівень звукової потужності — 111,5±2 дБА.

2. Визначено, що при відстані 913 м від ВЕУ до найближчої сельбищної території прогнозовані та фактичні рівні звукового тиску перевищують допустимі значення для нічного часу доби в октавних смугах 250–1000 Гц, а рівень звуку перевищує нормативне значення на 0,5 дБА.

3. Результати натурних вимірювань у населених пунктах, розташованих на відстанях понад 1000 м від ВЕУ, засвідчили зниження рівнів шумового навантаження до величин, що переважно відповідають вимогам ДСН № 463-2019.

4. Порівняльний аналіз результатів натурних вимірювань та розрахунків за методикою ISO 9613-2:2024 підтвердив достатню достовірність прогнозованої моделі для оцінки акустичного впливу вітрових електростанцій на прилеглі сельбищні території.

5. Встановлено, що для гарантованого забезпечення нормативних рівнів шуму на території житлової забудови при експлуатації ВЕУ WTU 5,2-140 необхідний санітарний розрив не менше 1250 м від центру ротора вітрової турбіни до найближчої житлової забудови.

6. Отримані результати можуть бути використані для удосконалення санітарно-гігієнічних підходів до проектування та експлуатації сучасних вітрових електростанцій великої потужності в Україні.

REFERENCES

1. World Health Organization. Environmental noise guidelines for the European region. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark; 2018.

Available from: <https://www.who.int/publications/item/9789289053563>

2. Gusk R, Schreckenberg D, Schuemer R. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017;14(12):1539. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph14121539>
3. International Electrotechnical Commission. Wind turbines — Part 11: Acoustic noise measurement techniques (IEC 61400-11:2012). Geneva: IEC; 2012.
4. International Organization for Standardization. Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 1: Basic quantities and assessment procedures (ISO 1996-1:2016). Geneva: ISO; 2016.
5. International Organization for Standardization. Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of sound pressure levels (ISO 1996-2:2017). Geneva: ISO; 2017.
6. International Organization for Standardization. Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: Engineering method for the prediction of sound pressure levels outdoors (ISO 9613-2:2024). Geneva: ISO; 2024.
7. Ministry of Health of Ukraine. State sanitary norms of permissible noise levels in the premises of residential and public buildings and on the territory of residential areas (Sanitary Norms No. 463-2019). Kyiv: Ministry of Health of Ukraine; 2019.
8. Basner M, Babisch W, Davis A, Brink M, Clark C, Janssen S, Stansfeld S. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *Lancet*. 2014 Apr 12; 383(9925):1325–32. doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)61613-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)61613-X)
9. Pedersen E, van den Berg F, Bakker R, Bouma J. Response to noise from modern wind farms in The Netherlands. *J Acoust Soc Am*. 2009 Aug;126(2):634–43. doi: <https://doi.org/10.1121/1.3160293>
10. Michaud DS, Feder K, Keith SE. Exposure to wind turbine noise: Perceptual responses and reported health effects. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2016 Mar;139(3):1443–54. doi: <https://doi.org/10.1121/1.4942391>
11. Bowdler D, Leventhall G. Wind Turbine Noise. Multi-Science Publishing; 2011.
12. Bakker RH, Pedersen E, van den Berg GP, Stewart RE, Lok W, Bouma J. Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress. *Sci Total Environ*. 2012 May 15;425:42–51. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.005>
13. Schmidt JH, Klokke M. Health effects related to wind turbine noise exposure: a systematic review. *PLoS One*. 2014 Dec 4;9(12):e114183. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114183>
14. Janssen SA, Vos H, Eisses AR, Pedersen E. A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2011;130(6):3746–53. doi: <https://doi.org/10.1121/1.3653984>

ДЖЕРЕЛА ФІНАНСУВАННЯ

Дослідження виконано в межах договірної науково-дослідної роботи.

ІНФОРМАЦІЯ ПРО КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Генеративний ШІ (GPT-5.2, OpenAI, версія 5.2, використаний 23.05.2026) застосовувався винятково для мовного редагування тексту. Промпти включали запити на стилістичну редактуру. Автори перевірили увесь контент і підтверджують його точність, оригінальність та відсутність плагіату.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ ТА ЇХ ВНЕСОК

СЕМАШКО Петро: наукове керівництво, концептуалізація, методологія, дослідження, формальний аналіз, підготовка первинного тексту, залучення фінансування.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3075-4245>

e-mail: pws240653@gmail.com

ДУМАНСЬКИЙ Вадим: наукове керівництво, дослідження, ресурси.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2704-1649>

ГАЛАК Станіслав: дослідження, упорядкування даних, формальний аналіз, редагування та доопрацювання, адміністрування проєкту.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9502-7198>

БЕЗВЕРХА Анна: дослідження, упорядкування даних, формальний аналіз, редагування та доопрацювання, адміністрування проєкту, залучення фінансування.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5362-2899>

ГОЦ Олексій: дослідження, ресурси.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6044-343X>

СЕРДЮК Євген: дослідження, ресурси.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4947-6045>

Отримано: 25.05.2026

Прийнято до друку: 01.07.2026

Опубліковано: 15.07.2026

SOURCES OF FUNDING

The study was carried out within the framework of a contractual research project.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of a conflict of interest.

APPLICATION OF GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Generative AI (GPT-5.2, OpenAI, version 5.2, used on 23 May 2026) was employed exclusively for language editing of the manuscript. The prompts included requests for stylistic editing. The authors reviewed all content and confirm its accuracy, originality, and absence of plagiarism.

AUTHOR INFORMATION AND CONTRIBUTIONS

SEMASHKO Petro: supervision, conceptualization, methodology, investigation, formal analysis, writing — original draft, funding acquisition.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3075-4245>

e-mail: pws240653@gmail.com

DUMANSKYI Vadym: supervision, investigation, resources.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2704-1649>

HALAK Stanislav: investigation, data curation, formal analysis, writing — review & editing, project administration.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9502-7198>

BEZVERKHA Anna: investigation, data curation, formal analysis, writing — review & editing, project administration, funding acquisition.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5362-2899>

HOTS Oleksii: investigation, resources.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6044-343X>

SERDIUK Yevhen: investigation, resources.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4947-6045>

Received: 25.05.2026

Accepted: 01.07.2026

Published: 15.07.2026

