

УДК 620.92

Б. И. Мокин, д. т. н., проф.; А. Б. Мокин, д. т. н., доц.;
В. П. Базалицкий; В. В. Горенюк

ОЦЕНКА МОЩНОСТИ, КОТОРАЯ МОЖЕТ БЫТЬ ПОЛУЧЕНА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ ИЗ ВЕТРОВОГО ПОТОКА, ПРОИЗВОДИМОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ПОЕЗДОМ

В работе выложены результаты экспериментального исследования ветровых потоков, производимых железнодорожным поездом, выполненного с целью оценки мощности, которую можно отобрать из этих потоков с помощью ветроэнергетической установки, размещённой возле железнодорожной колеи.

***Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, ветроэнергетика, ветровые потоки, ветроэнергетическая установка, оценка мощности, эксперимент.*

Введение

Известно [1, 2], что мощность $P_{ен}$ (Вт), которая отбирается у ветрового потока, имеющего плотность ρ (кг/м³), с помощью ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения и площадью осевого сечения ветрового колеса S_o (м²) и коэффициентом мощности ε , пропорциональна этой площади и кубу скорости $v_{ен}$ (м/с) ветрового потока, т. е.

$$P_{ен} = \varepsilon \frac{S_o}{2} \rho v_{ен}^3. \quad (1)$$

А каждый, кто стоял на перроне вокзала во время прохождения без остановки грузового поезда, мог убедиться в том, что скорости ветровых потоков, создаваемых этими поездами во время движения, могут достигать значительных величин и при сверхвысоких скоростях поездов достигать скорости штормового ветра. На сегодняшний день энергия этих ветровых потоков рассеивается в атмосфере без всякой пользы, в то время как ее можно использовать для генерации электрической энергии с помощью ветроэнергетической установки, размещенной рядом с железнодорожными путями.

Напомним, что для питания дополнительного оборудования (вспомогательных систем) железнодорожного хозяйства используют специальные дополнительные линии электропередачи, которые тянутся вдоль всего железнодорожного пути, что приводит к существенным и расходам, и потерям электроэнергии [3]. Существует также проблема повышения надежности электроснабжения дополнительного оборудования железнодорожных линий.

На наш взгляд, существенный вклад в решение этих проблем можно сделать путем подключения к системе электроснабжения железнодорожного хозяйства ветроэнергетических установок, расположенных около железнодорожного пути, которые будут превращать энергию ветровых потоков, создаваемых поездами, в электрическую энергию.

В работе [4] нами уже рассмотрены вопросы создания новых специальных ветроэнергетических установок (ВЭУ) и определения условий их расположения вдоль железнодорожных путей для преобразования энергии ветрового потока, создаваемого поездом во время движения, в электрическую энергию, которую планируется использовать для питания вспомогательного оборудования железнодорожных путей, населенных пунктов,

расположенных вблизи железнодорожных путей, или для рекуперации либо накопления энергии. Но в этой работе не были рассмотрены вопросы количественной оценки энергии, производимой ветроэнергетическими установками, на которые будут направлены ветровые потоки, создаваемые поездами, проходящими рядом.

В работе [5] нами было осуществлено количественное оценивание мощности ветровых потоков, которые создает поезд во время движения, но с использованием данных, приведенных Американской железнодорожной ассоциацией в работе [6].

С целью уточнения результатов этой оценки и приближения к реалиям эксплуатации отечественного железнодорожного транспорта мы провели собственный эксперимент по измерению характеристик ветрового потока, создаваемого железнодорожным составом, с помощью оригинальной измерительной установки, сконструированной нами специально для измерения ветровых потоков, создаваемых поездами, подробное описание которой осуществлено в нашей работе [7].

Описание условий и места проведения эксперимента и характеристики измеренных величин

Для проведения эксперимента был выбран отрезок железнодорожного пути недалеко от Винницы на закрытом переезде с. Парпуровцы. Данное место было выбрано с разрешения железнодорожной администрации, исходя из соображений удобства монтажа измерительной установки, хорошего дорожного подъезда и относительно большой скорости движения поездов.

Поскольку безопасное расстояние от железнодорожного полотна согласно нормативным документам составляет 3 м, экспериментальная измерительная установка была размещена именно на этом расстоянии (рис. 1) перпендикулярно пути, т. е. перпендикулярно оси ветровых потоков, движущихся параллельно с поездом.



Рис. 1. Место размещения экспериментальной измерительной установки (рамка сенсоров обведена красной линией)

Как видно из рис. 1, сенсоры размещались по четыре в три столбца в 3, 4, 5 м от пути соответственно.

Данные на компьютер записывались одновременно для каждого из сенсоров скорости с интервалом в 1 секунду в виде пачек импульсов, каждая из которых содержала количество

импульсов, пропорциональное скорости вращения валов этих сенсоров (рис. 2). Проверка каждого измерительного канала была осуществлена в аэродинамической трубе кафедры возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов (ВЭТЭСК) Винницкого национального технического университета (ВНТУ) с помощью эталонного анемометра. Для всех измерительных каналов были построены зависимости скорости ветровых масс в функции количества дискретных импульсов сенсоров [7].

```

7,8,8,6,7,7,8,5,13,2,15
5,8,7,5,6,7,7,5,12,3,13
6,8,6,4,6,7,7,4,13,2,12
6,7,7,5,7,7,7,4,12,3,12
5,8,6,4,7,8,8,4,11,3,11
7,8,6,6,7,8,9,5,12,4,11
4,6,5,4,6,7,8,4,11,3,10
7,7,5,5,6,8,13,4,13,9,13
6,8,7,17,8,29,57,4,20,43,14
6,8,13,25,13,35,73,5,34,71,17
10,11,22,50,15,37,83,7,50,93,20
25,29,49,59,34,60,93,24,67,74,31
48,32,59,79,35,62,82,31,72,41,33
58,31,57,78,36,50,90,35,71,58,27
61,27,92,98,42,87,143,33,69,127,42
62,33,68,72,39,75,110,41,79,90,46
63,45,72,94,55,84,124,39,92,97,49
94,87,103,138,113,116,163,77,120,77,68
90,76,75,127,82,85,121,59,98,65,68
83,63,65,113,69,95,127,56,98,90,55
57,73,72,82,69,91,108,50,96,79,68
71,96,93,88,63,92,107,35,86,71,112
65,88,102,100,75,98,116,50,87,74,93
66,80,84,96,75,87,113,44,76,72,88
61,62,64,80,59,77,103,39,63,61,66
74,52,59,85,50,71,109,36,61,79,55
64,43,50,73,44,73,114,39,79,96,50
50,40,43,62,49,66,97,36,71,81,49
    
```

Рис. 2. Формат полученных экспериментальных данных

Все полученные при прохождении поезда показания сенсоров вносились в матрицы входных значений F1 в пакете прикладных программ (ППП) Mathcad (рис. 3).

Экспериментальные данные снимались при прохождении грузового поезда с локомотивом ВЛ80к и смешанным составом вагонов в количестве 56 шт. Скорость движения поезда составляла 66 километров в час, а время его прохождения мимо экспериментальной измерительной установки составляло 45 секунд.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
47	74	93	59	25	67	60	49	28	24	34	29	31
48	41	82	79	48	72	62	59	41	31	35	32	33
49	58	90	78	58	71	50	57	43	35	36	31	27
50	127	143	98	61	69	87	92	52	33	42	27	42
51	90	110	72	62	79	75	68	54	41	39	33	46
52	97	124	94	63	92	84	72	56	39	55	45	49
53	77	163	138	94	120	116	103	81	77	113	87	68
F1 = 54	65	121	127	90	98	85	75	79	59	82	76	68
55	90	127	113	83	98	95	65	69	56	69	63	55
56	79	108	82	57	96	91	72	63	50	69	73	68
57	71	107	88	71	86	92	93	92	35	63	96	112
58	74	116	100	65	87	98	102	79	50	75	88	93
59	72	113	96	66	76	87	84	77	44	75	80	88
60	61	103	80	61	63	77	64	64	39	59	62	66
61	79	109	85	74	61	71	59	65	36	50	52	55
62	96	114	73	64	79	73	50	57	39	44	43	...

Рис. 3. Матрица исходных данных для ППП Mathcad

Построив полученные зависимости в функции времени, получим график, отражающий изменение скоростей для каждого канала измерения в функции времени, который приведен на рис. 4 в координатах: ось абсцисс – секунды, ось ординат – метры в секунду.

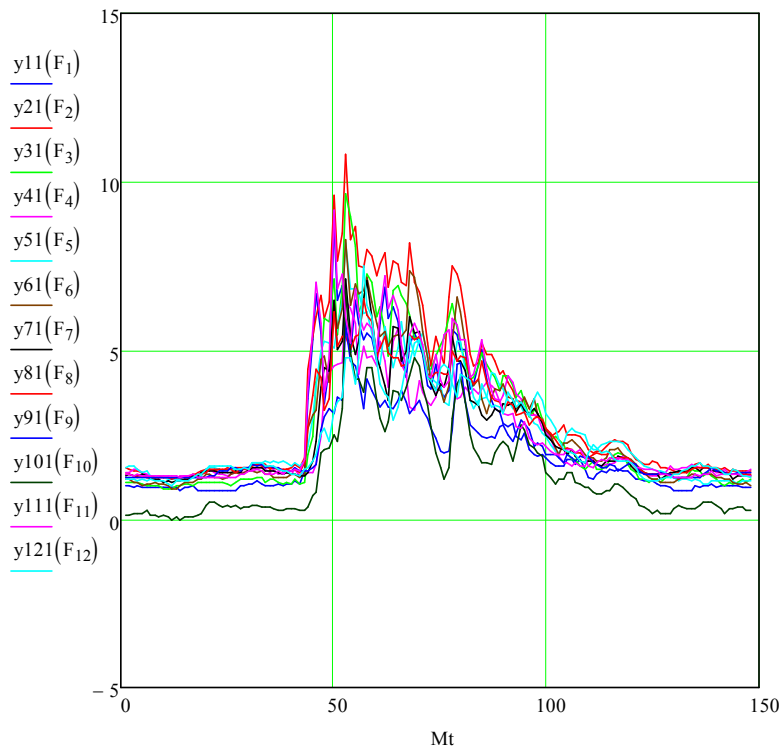


Рис. 4. Графики скорости ветровых потоков, измеренной каждым из измерительных каналов

Из рис. 4 четко видно момент времени ($M_t = 43 \text{ с}$), в который поезд достигает измерительной установки, и то, что ветровой поток увеличивается в несколько раз по сравнению со значениями естественной скорости ветра. Интересен тот факт, что после прохождения поезда ($M_t = 88 \text{ с}$) еще некоторое время t_n , которое составляет при скорости поезда 66 километров в час примерно 35 с (вплоть до $M_t^* = 121 \text{ с}$), наблюдается заметное превышение скорости ветрового потока над ее значением в невозмущенном поезде состоянии.

Обработка результатов эксперимента

Для определения мощности ветрового потока, который пересекает площадь рамки измерительной установки, сенсорами в которой служат 12 ветровых колес небольшого диаметра с горизонтальной осью вращения, используем выражение (1), которое для каждого измерительного канала будет иметь вид

$$P_i = \varepsilon \cdot \rho \cdot \frac{S \cdot V_i^3}{2}, \quad i = 1, \dots, 12, \quad (2)$$

где S – площадь круга с диаметром, равным диаметру колеса ветрового датчика.

Используя кривые скоростей, представленные на рис. 4, и кубические сплайны для реализации выражения (2) в ППП Mathcad, получим:

$$P_i(u) = \text{int erp}(cspline(M_t, P_i), M_t, P_i, u) \quad (3)$$

Графики мощностей ветровых потоков за время прохождения поезда по каждому из измерительных каналов, рассчитанных по выражению (3), отраженные на рис. 5 в координатах: ось абсцисс – секунды, ось ординат – ваты.

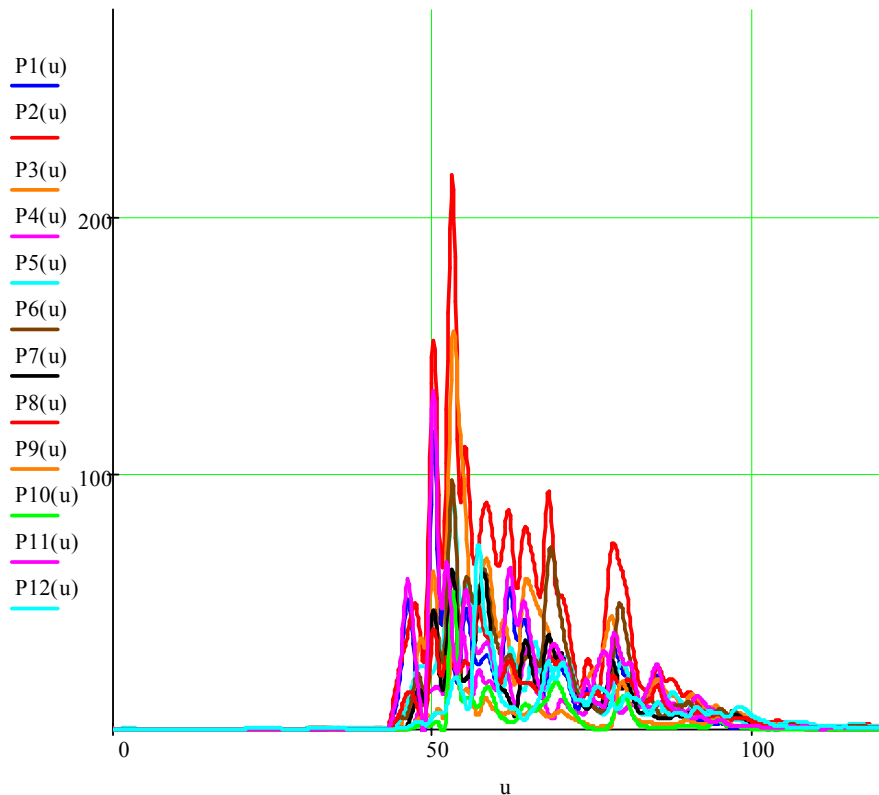


Рис. 5. Графики мощностей ветровых потоков в функции времени для каждого из измерительных каналов

Из этих графиков видно, что мощности ветровых потоков отличаются между собой в зависимости от места расположения датчика. Для большей наглядности покажем это на трехмерном графике, который отражает количество полученной мощности по каждому из измерительных каналов в соответствии с их размещением в рамке измерительной установки. Для этого каждую из зависимостей, определяющую мощность ветрового потока по каждому измерительному каналу, проинтегрируем в пределах времени от $M_t = 43$ с до $M_t^* = 121$ с и разделим на интервал интегрирования $(M_t^* - M_t)$ и таким образом найдем среднюю мощность $Ps_i, i = 1, 2, \dots, 12$ ветрового потока по каждому измерительному каналу

$$Ps_i = \frac{1}{121 - 43} \int_{43}^{121} P_i(u) du, \quad i = 1, 2, \dots, 12. \quad (4)$$

Для привязки значений средней мощности $Ps_i, i = 1, 2, \dots, 12$ ветрового потока по каждому измерительному каналу, рассчитанных по выражению (4), к месту расположения сенсоров скорости на рис. 6 показана в различных цветах в виде квадратов схема размещения в рамке измерительной установки всех измерительных сенсоров в проекции «вид спереди» по направлению движения поезда.

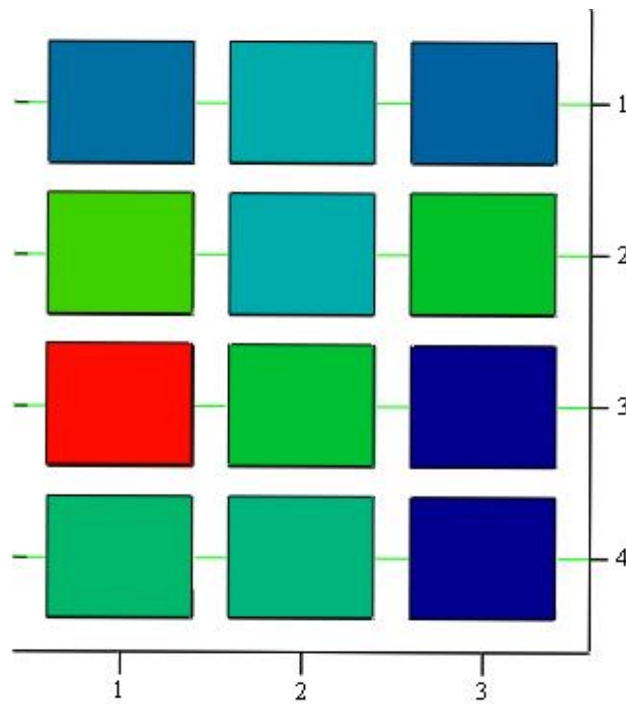


Рис. 6. Размеченная разными цветами схема размещения датчиков скорости в рамке измерительной установки (вид спереди по ходу поезда)

Этой схеме соответствует матрица средних мощностей, которая имеет вид

$$P_s = \begin{pmatrix} P_{s4} & P_{s8} & P_{s12} \\ P_{s3} & P_{s7} & P_{s11} \\ P_{s2} & P_{s6} & P_{s10} \\ P_{s1} & P_{s5} & P_{s9} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

После проведения расчетов по выражению (4) эта матрица наполняется такими значениями суммарных мощностей (выраженных в ваттах):

$$P_s = \begin{pmatrix} 9.924 & 12.263 & 9.276 \\ 22.357 & 12.338 & 18.399 \\ 35.016 & 17.96 & 4.468 \\ 15.495 & 14.71 & 4.511 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

А на рис. 7 и 8 показаны пространственные графики средних мощностей, рассчитанных по выражению (4), соответствующие приведенному на рис. 6 размещению сенсоров скорости, причем на рис. 7 показано пространственное изображение в виде столбцов соответствующей высоты, заданной матрицей (6), а на рис. 8 показана сглаженная поверхность, отражающая изменения значений мощностей по всей площади рамки измерительной установки, в которой установлены сенсоры скорости.

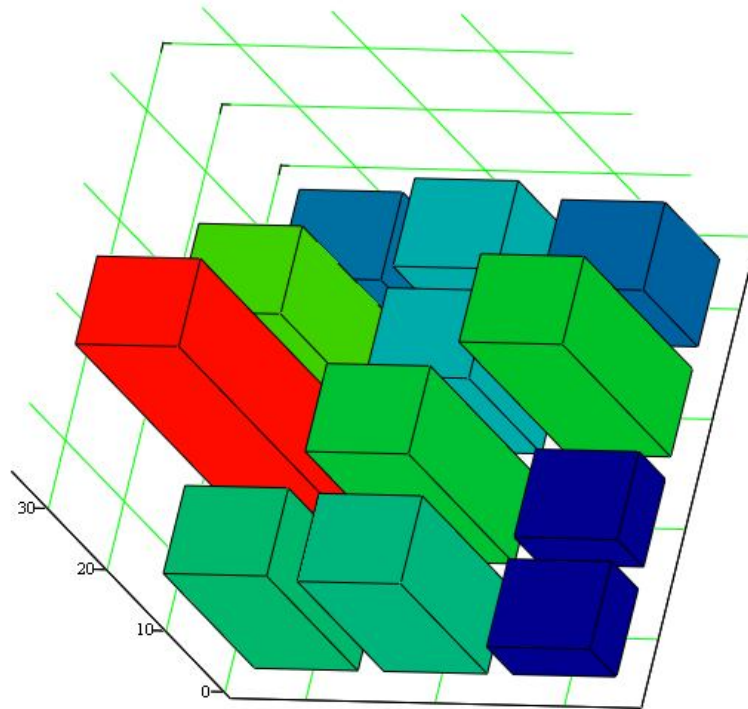


Рис. 7. Диаграмма средних мощностей, полученных по каждому из измерительных каналов за время $M_t^* - M_t$

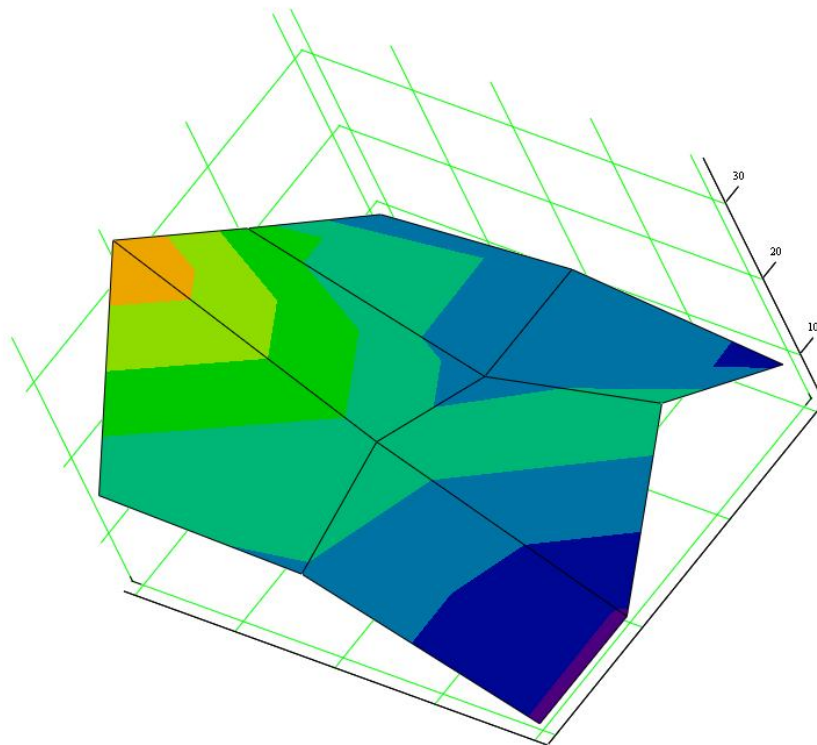


Рис. 8. Поверхность средней мощности ветрового потока, измеренной экспериментальной измерительной установкой, с отражением вклада каждого из измерительных каналов

Для оценки же суммарной мощности ветрового потока, прошедшего через сенсорную рамку измерительной установки за время возмущения воздушных масс, вызванных прохождением поезда мимо, подсчитаем сумму мощностей по всем измерительным каналам и определим, что

$$P_{S_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^{12} P_{S_i} = 176.715 \text{ (Вт)}. \quad (7)$$

Во время проведения эксперимента, кроме грузового поезда, мимо измерительной установки прошло также несколько пассажирских поездов с однопрофильными вагонами обтекаемой формы и несколько пригородных электропоездов. При их прохождении сенсорами экспериментальной измерительной установки были зафиксированы незначительные возмущения воздушных масс и измерены совсем малые значения мощностей, отбираемых от ветровых потоков, создаваемых поездами этого класса, к тому же без существенных различий по всей площади измерения. То есть боковые аэродинамические потоки, обусловленные этими поездами, существенно менее мощные по сравнению с теми потоками, которые создаются грузовыми поездами с разнопрофильными вагонами. Они более вытянутые по поезду и почти не расходятся в стороны, как это имеет место в грузовых поездах с разнопрофильными вагонами.

Следовательно, приоритетным использованием ВЭУ являются те участки дороги, на которых интенсивность движения грузовых поездов достаточно высокая.

Мы экспериментально исследовали и определили то количество мощности, которую можно отобрать от ветровых потоков, создаваемых грузовым поездом, который проходил мимо измерительной установки со скоростью 66 километров в час. Но в Украине есть довольно много участков дороги, на которых грузовым поездам разрешена скорость в полтора раза больше. А в недалеком будущем по отдельным участкам украинской железной дороги грузовые поезда будут двигаться и со скоростями в два раза выше.

И поскольку мощность, которая отбирается ветроэнергетической установкой от ветрового потока, пропорциональна кубу скорости этого потока, то в случае увеличения скорости грузового поезда до уровня 100 километров в час мощность, отобранная ВЭУ от ветрового потока, создаваемого этим поездом, будет в 3,5 раза больше той, которую мы рассчитали выше. А в случае увеличения скорости грузового поезда в два раза, то есть до 132 километров в час, мощность, которая будет отбираться ВЭУ от ветрового потока, создаваемого этим поездом, будет в 8 раз больше той, которую мы рассчитали выше. А это уже серьезный вклад в альтернативную энергетику.

Выводы

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

1. Полевые испытания экспериментальной измерительной установки, разработанной на кафедре ВЭТЭСК ВНТУ для измерения скорости ветровых потоков, создаваемых железнодорожными составами во время движения, подтвердили ее высокую измерительно-вычислительную эффективность и экспериментопригодность.

2. Установлено, что довольно мощные ветровые потоки на разрешенном нормативными документами трехметровом расстоянии от железнодорожного пути создаются только грузовыми поездами с разнопрофильными вагонами, движущимися со скоростями выше 60 километров в час.

3. Предлагается считать экономически эффективной установку ветроэнергетических установок возле железнодорожного пути на участках, характеризующихся высокой интенсивностью движения грузовых поездов со скоростями 90 километров в час и выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фатеев Е. М. Ветродвижатели и ветроустановки / Фатеев Е. М. – М : Сельхозгпз, 1948. – 545 с.
2. Мхитарян Н. М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников. Опыт и перспективы / Мхитарян Н. М. – К. : Наукова думка, 1999. – 320 с.
3. Иванов Э. А. Электрическая централизация трілок и светофоров / Э. А. Иванов, О. Н. Масловская, О. И. Колотова. – М : Маршрут, 2002. – 167 с.

4. Мокін Б. І. Вітроелектротехнічні комплекси для відбору потужності вітрових потоків, створюваних електропотягами / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, В. П. Базалицький // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4 – С. 111 – 113.

5. Мокін Б. І. Оцінка потужності, яка може бути отримана з вітрового потоку, створюваного рухом залізничного потяга / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, В. П. Базалицький // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 81 – 84.

6. Measurement of the aerodynamic pressures produced by passing trains : (Proceedings of the 2002 ASME/IEEE Joint Rail Conference Washington, DC, April 23-25, 2002) [Електронний ресурс] / Robert A. MacNeill and Samuel Holmes. – Режим доступу: <http://www.acusim.com/papers/Train-Aero-Paper.pdf>.

7. Мокін Б. І. Структура та характеристики лабораторного стенда для оцінки енергетичного потенціалу вітрових потоків / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, В. П. Базалицький, В. В. Горенюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 2. – С. 69 – 72.

Мокин Борис Иванович – акад. НАПН України, д. т. н., професор кафедри восстановительной энергетики и транспортных электрических систем и комплексов, тел.: (0432) 598-223.

Мокин Александр Борисович – д. т. н., доцент, заведующий кафедрой восстановительной энергетики и транспортных электрических систем и комплексов, тел.: (0432) 598-223.

Базалицкий Вадим Павлович – аспирант кафедры восстановительной энергетики и транспортных электрических систем и комплексов, тел.: (093) 031-47-90.

Горенюк Виктор Васильевич – инженер первой категории, кафедра восстановительной энергетики и транспортных электрических систем и комплексов, тел.: (0432) 598-223.

Винницкий национальный технический университет.