

Лабораторна робота № 6

«Оптимізація конструкції вітрогенератора малої потужності»

Мета роботи Визначення найбільш оптимальної конструкції вітроенергетичної установки малої потужності з конфузorzом шляхом комп'ютерного моделювання та симуляції.

Внутрішній профіль експериментальної установки (див. Рис. 1.) сконструйовано так, що в розтині він є наближеним до лінії найшвидшого спуску – брахістохрми. Зовнішній – подібний до зовнішнього профіля авіатурбіни. Гвинт встановлений всередині конфузора, в найвужчу область, де швидкість наскрізного потоку вітру є найшвидшою. Відразу за гвинтом встановлений електрогенератор, що являє за формою конус, коаксиальний з конфузorzом. Довжина турбіни 884 мм, діаметр поперечного перерізу спереду – 531 мм, а ззаду – 370 мм. Відповідні площі вхідного і вихідного отвору дорівнюють $0,22 \text{ м}^2$ і $0,11 \text{ м}^2$. Діаметр в найвужчій частині, де встановлений гвинт – 194 мм, площа – $0,03 \text{ м}^2$. Довжина відсіку, де встановлений генератор становить 330 мм. Його ж діаметр у задній частині, основі конуса, – 110 мм. Таким чином ширина кільцевого отвору, через який повітря виходить з турбіни, становить 80 мм, площа – $0,075 \text{ м}^2$.

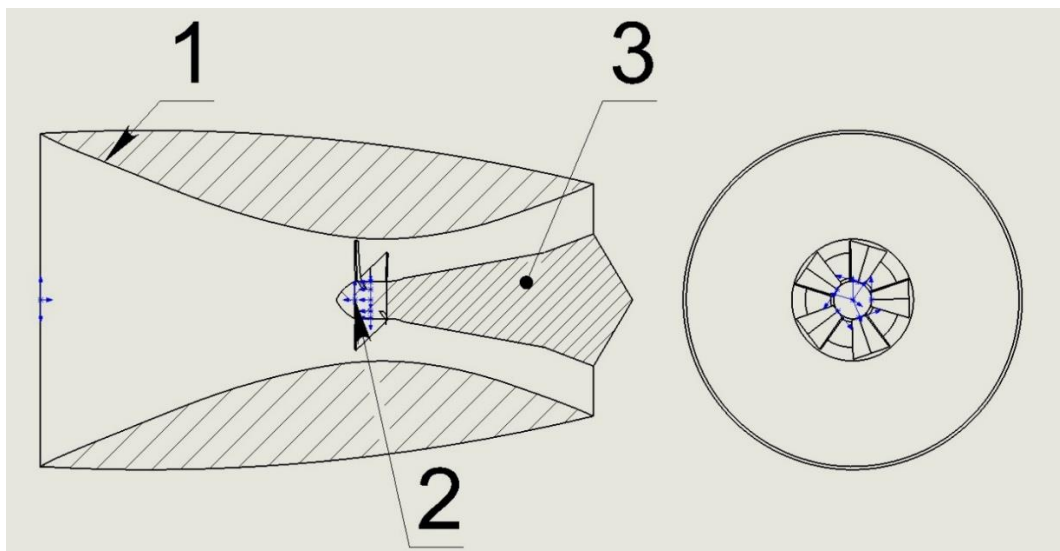


Рис. 1. Схема експериментальної установки. 1.Внутрішній профіль. 2.Гвинт.
3.Область встановлення генератора.

1. Опис методики вимірювань і розрахунків

1. Студентам пропонується провести аналіз результатів комп'ютерного моделювання. Спочатку необхідно ознайомитися з методикою розрахунків.

З допомогою системи автоматизованого проектування Solid Works, було побудовано тривимірну модель експериментальної установки в натуральний розмір. Даний програмний комплекс призначений для автоматизації робіт на етапах конструкторської підготовки проекту, аналізу та на етапі дизайну. Далі, використовуючи програмний модуль Flow Simulation, була проведена математична симуляція процесів у ВЕУ. Програма для своїх розрахунків використовує метод скінченних елементів. Ціль - розв'язання диференціальних та інтегральних рівнянь у частинних похідних зведенням їх до системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Розмірність задачі зазвичай підвищується в рази, але самі рівняння є набагато простішими. Сутність методу полягає в апроксимації складних тіл та їх поверхонь сіткою з більш простими – трикутниками, прямокутниками тощо. Використовується при вирішенні задач механіки твердого тіла, теплообміну, гідро- і газодинаміки, електро- та магнітостатики та інших областей фізики. При цьому, що є важливим, розміри елементів сітки можуть бути різними. Це дає змогу більш точно отримувати результат поблизу складних поверхонь. Програма для побудови сітки використовує розбиття тіла на прямокутні елементи, які або повністю знаходяться у тілі, або частково, або повністю у зовнішньому середовищі. Елементи, що частково і в тілі, і в середовищі, додатково подрібнюються для більш точного розв'язку.

Основна ідея методу полягає в тому, що усі неперервні величини апроксимуються дискретною моделлю, побудова якої виконується з допомогою кусково заданих перервних функцій, визначених на кінцевій множині підобластей. Перевагами такого розбиття є мінімізація похибок, гарна обумовленість системи рівнянь (стійкість до малих змін параметрів), тобто помилки не акумулюються і не спричиняють беззмістовних результатів та швидкість генерації сітки. Коли сітка згенерована, вихідні диференціальні

та інтегральні рівняння апроксимуються лінійними та одночасно розв'язуються.

2. Проаналізувати систему диференціальних рівнянь.

У випадку обтікання тіл, основною є система диференціальних рівнянь гідрогазодинаміки у часткових похідних, яка складається з рівняння нерозривності (1), та з рівняння руху рідини, відомого як рівняння Нав'є – Стокса. В даній задачі повітря можна розглядати як рідину, що не стискається, тоді рівняння руху рідини переходить в окремий випадок рівняння Нав'є – Стокса (2), з відсутнім членом, що відповідає за стискання. Ці рівняння доповнюються початковими та граничними умовами на стінках установки та в оточуючому середовищі, такими як: тиск, температура, вологість.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \cdot \Delta \vec{v} \quad (2)$$

де ρ – щільність газу,

\vec{v} – швидкість потоку газу,

t – час,

P – тиск,

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості,

∇ – оператор градієнту,

Δ – оператор Лапласа.

Важливим у рівнянні (2) є доданок, що містить коефіцієнт кінематичної в'язкості ν , адже саме він відповідає за виникнення турбулентності. В даній роботі велику вагу, при створенні конфузора, було приділено саме усуненню турбулентностей і спробам надати потоку вигляду якнайбільш близького до ламінарного. Як відомо, число Рейнольдса, що є характеристикою турбулентності потоку за визначенням є $Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$, де D – гідравлічний діаметр (міра ефективності русла у пропусканні потоку рідини). Отже, чим

менша в'язкість, тим більшим є число Рейнольдса і турбулентність. Звісно, під час розрахунків враховувався і ламінарний і турбулентний потік.

3. Виконати аналіз результати для крутного моменту на гвинті.

По-перше, зібрати результати для крутного моменту, який виникає на гвинті при різних швидкостях набігаючого потоку та при різних кутових швидкостях. Результати відобразити в таблиці 1.

Таблиця 1

Крутний момент на ВЕУ без конфузора

Крутний момент(Н*м)	Швидкість потоку вітру (м/с)	3	5	10	14
Кутова швидкість(об/с)					
3		0.004	0.011	0.074	0.131
5		0.002	0.008	0.065	0.13
7		0.0009	0.007	0.054	0.121
10		-0.005	0.006	0.049	0.116
14		<0	-0.08	0.043	0.111
17		<0	<0	0.036	0.107

4. Розрахувати потужність і занести дані до таблиці 2..

При такому крутному моменті, потужність вираховується по формулі:
 $L = M * \omega$, де M – це момент, а ω – це кутова швидкість у рад/с. Тоді отримаємо такі значення потужностей:

Потужність ВЕУ без конфузора

Потужність(Вт)	Швидкість потоку вітру (м/с)	3	5	10	14
Кутова швидкість(об/с)					
3		0,075	0,207	1,394	2,468
5		0,063	0,251	2,044	4,088
7		0,040	0,308	2,357	5,327
10		0	0,377	3,082	7,296
14		0	0	3,786	9,774
17		0	0	3,849	11,441

Звісно, для проектування конфузора треба виходити з аеродинамічних принципів. Тобто, він має усувати існуючі недоліки – такі як вихори і зриви потоку. При цьому створювати зону розрідження позаду турбіни.

5. Проаналізувати результати комп'ютерного моделювання траєкторії вітрового потоку навколо ВЕУ.

З допомогою програмного модулю Flow Simulation, було змодельовано траєкторії вітрового потоку навколо ВЕУ.

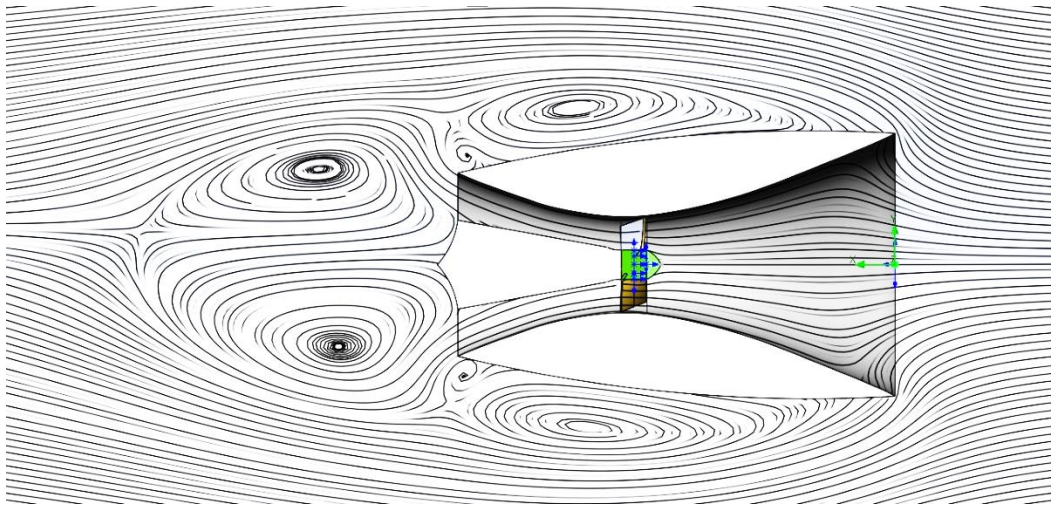


Рис. 2. Траєкторії потоку навколо БЕУ

Як видно на рис. 2., існує дві принципіальні зони, де утворюються вихори – по боках від корпусу гондоли, та позаду неї, в зоні розрідження. Ті вихори, що знаходяться навколо, суттєво не впливають на роботу установки, адже наскрізний потік навіть не контактує з ними. Сама їх присутність викликана формою внутрішнього та зовнішнього контуру конструкції, і усунення потребувало б значних витрат матеріалу і завдало б шкоди компактності установки, яка є її безперечним плюсом. Тому, більшу увагу було звернено на ті нерівномірності, що виникли позаду оболонки турбіни. Адже, вочевидь саме вони і впливають на продуктивність БЕУ, і їх відсутність могла б збільшити крутний момент на роторі. Саме з рис. 2 добре видно що лінії току на виході з турбіни дуже вигинаються, стикаючись з цими вихорами. Тобто в цих областях тиск є підвищеним відносно до тиску всередині турбіни. При цьому, вочевидь, втрачається енергія потоку і падає його швидкість. Тому, зокрема, було запропоновано боротися з ними шляхом встановлення конфузора. Були протестовані принципово різні профілі (див. Додаток А), та виявлено такий, що найкращим чином впливав на потужність установки і зменшував вплив вихорів (див. Рис.3.).

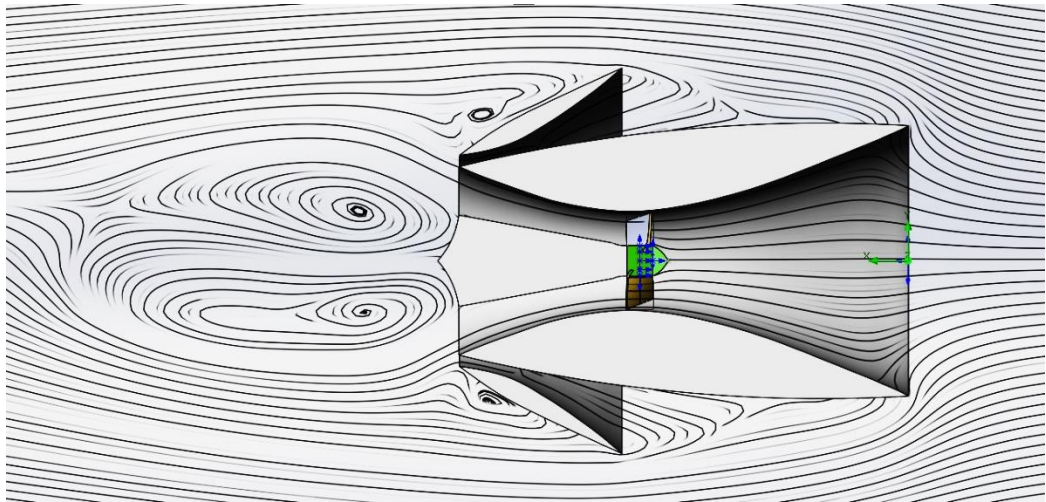


Рис. 3. Лінії току навколо ВЕУ з конфуззором

6. Провести порівняльний аналіз крутного моменту і потужності ВЕУ з конфуззором і без.

Помітно, що досліджена конфігурація конфузора не прибрала вихори позаду турбіни повністю, але зрушила їх далі від вихідного каналу і витягнула ближче до осі ВЕУ. Це дало змогу повітрю, що вже пройшло ротор, більш вільно виходити з турбіни. Якщо порівнювати, з рис. 2., то видно, що тут лінії току вигинаються набагато менше. Тобто, виникла додаткова тяга позаду гондоли. Як наслідок, швидкість збільшилася і крутний момент на гвинті виріс.

Таблиця 3

Крутний момент на ВЕУ з конфуззором

	Швидкість потoku вітру (м/с)	3	5	10	14
<i>Крутний момент(Н*м)</i>					
Кутова швидкість(об/с)					
3		0.005	0.021	0.08	0.194

5		0.003	0.019	0.1	0.203
7		0.001	0.012	0.1	0.189
10		0	0.008	0.087	0.184
14		0	0	0.075	0.172
17		0	0	0.047	0.161

При цьому, дані щодо потужності представлені на наступній таблиці.

Таблиця 4

Потужність ВЕУ з конфузоров

Потужність(Вт)	Швидкість потоку вітру (м/с)	3	5	10	14
Кутова швидкість(об/с)					
3		0,094	0,395	1,508	3,656
5		0,094	0,596	3,141	6,377
7		0,044	0,528	4,53	8,312
14		0	0	6,59	15,129
17		0	0	5,02	17,197

В середньому, потужність зросла на 62% для швидкостей вітру 3 та 5 м/с. І на 51% – для швидкостей 10 та 14 м/с. Цей факт безперечно доводить енергетичну обумовленість наявності додаткового конфузора на даній ВЕУ. Далі наведено відповідні графіки, які ілюструють характеристики турбіни без конфузору та з ним.

На графіку рис.4 наведено криві залежності потужності від швидкості

набігаючого потоку. Криві різного кольору відображають різну кутову швидкість обертання гвинта. В цьому випадку виміри були проведені з гондолою без конфузора.

На наступному графіку рис 5 відображено ту ж саму залежність, але при наявності конфузора. Помітно, що потужність зростає.

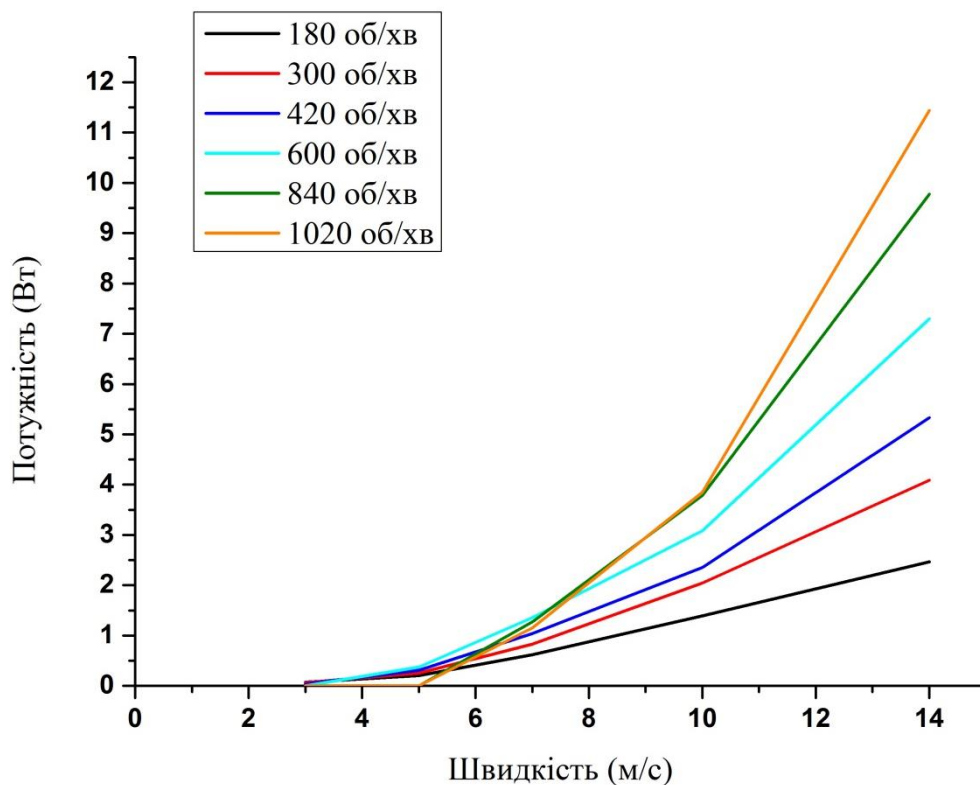


Рис. 4. Графік залежності потужності від швидкості вітру без конфузора

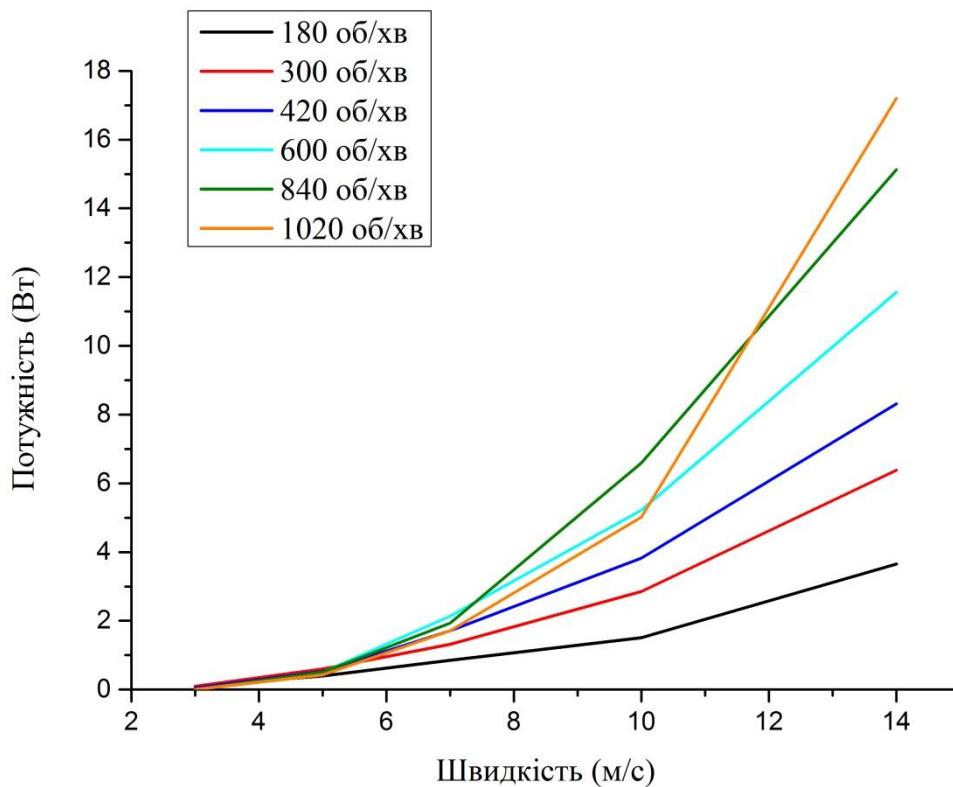


Рис. 5. Графік залежності потужності від швидкості вітру з конфуззором

Однак, більш інформативним є графік, що відображає залежність потужності установки від енергії вітру. Так на рис. 6. проілюстровано відповідні залежності для двох випадків – з конфуззором, та без нього. Якщо враховувати, що площа вхідного отвору ВЕУ становить $0,22 \text{ м}^2$, то в середньому ККД установки виріс з 3-4% до 6%. З іншого ж боку, площа яку замітають лопаті гвинта є в сім разів меншою – $0,03 \text{ м}^2$. Тобто, порівняння з традиційними вітряками відкритого типу, ККД яких сягає 30%, було б некоректним.

Іншим важливим висновком є той факт, що потужність залежить як від швидкості вітру, так і від кутової швидкості обертання гвинта. І якщо на першу вплинути неможливо, то регулювати другу – наступна задача. Адже, при швидкості 10 м/с, більшу ефективність можна отримати при обертах порядку 850 на хвилину. Тобто в зоні, де встановлений генератор, має знаходитися резистор, який би регулював опір, і таким чином давав би

можливість отримувати максимально можливу кількість енергії. Наступний графік рис. 6 побудовано з розрахунку, що вітряк видає максимально можливу потужність при заданій швидкості потоку. Тобто в ньому встановлений вищеописаний резистор.

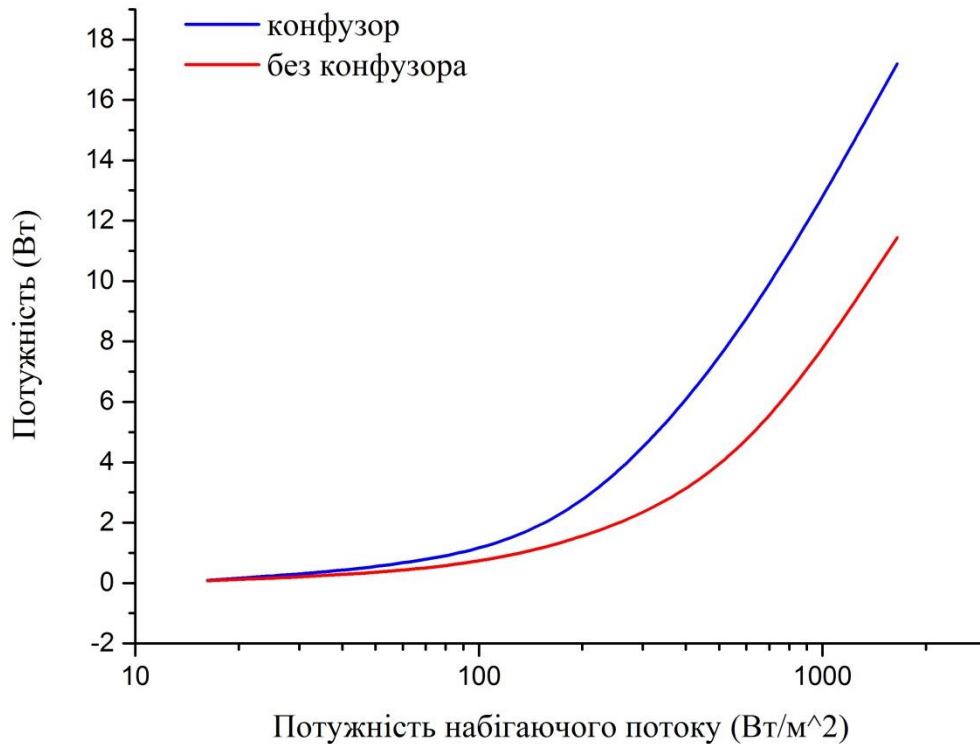


Рис. 6. Графік залежності потужності ВЕУ від потужності набігаючого потоку вітру

Вищенаведені графіки демонструють, що для отримання значної потужності, необхідна швидкість вітру має складати не менше, ніж 8 метрів на секунду. Такі цифри не є характерними для більшості території України, але в деяких регіонах (Карпатські гори, південь України) швидкості є достатніми. До того ж, як було зазначено раніше, безперечною перевагою даного вітряка є його компактність і легкість, що дає змогу підіймати його високо над поверхнею. Однак, на жаль невідомо як вестиме себе дана ВЕУ при вітрах швидших за 15 м/с, адже це викликає серйозні навантаження на корпус установки. З іншого ж боку, конструкція даної ВЕУ є такою, що легко

масштабується. Як відомо (див. формулу (2)), потужність вітрової установки є прямопропорційною до площі перерізу вхідного каналу. Отже, збільшуючи розміри установки, можна отримати відповідно більшу потужність. При цьому, є усі підстави розраховувати, що при збільшені, покращиться і стійкість до коротких поривів вітру.

7. За результатами проведеного аналізу зробити висновки і скласти звіт.

Контрольні питання

1. Якого типу вітрова енергетична установка досліджується в роботі?
2. З яких основних елементів складається досліджувана вітрова енергетична установка?
3. У чому полягає новизна концептуального вирішення щодо модернізації даної вітрової енергетичної установки?
4. У чому полягає сутність методу, що лежить в основі комп'ютерної моделі?
5. Система яких рівнянь лежить в основі гідродинамічної задачі, що розглядається?
6. Які комп'ютерні дані були використані для створення Віртуальної ВЕУ?
7. Як наявність конфузора змінила крутний момент?
8. Як наявність конфузора відобразилася на потужності ВЕУ?
9. Назвіть основні переваги запропонованої вітрової енергетичної установки над традиційними.