



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ,
ФИЛИАЛ ПЛОВДИВ**

маг. инж. Христо Тошков Недев

**МОДЕЛИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА АДАПТИВЕН
ВЕТРОГЕНЕРАТОР**

АВТОРЕФЕРАТ

на

**ДИСЕРТАЦИЯ
ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА ОБРАЗОВАТЕЛНАТА И НАУЧНА
СТЕПЕН “Д О К Т О Р”**

**ОБЛАСТ НА ВИСШЕ ОБРАЗОВАНИЕ “ТЕХНИЧЕСКИ НАУКИ”
ПРОФЕСИОНАЛНО НАПРАВЛЕНИЕ “МАШИННО ИНЖЕНЕРСТВО” ПО
НАУЧНАТА СПЕЦИАЛНОСТ “ТЕОРИЯ НА МЕХАНИЗМИТЕ, МАШИНИТЕ
И АВТОМАТИЧНИТЕ ЛИНИИ”**

Научни ръководители:

доц. д-р инж. Николай Стоянов Петришки
доц. д-р инж. Дечко Тотев Русчев

ПЛОВДИВ 2024

ГЛАВА 1

Обзор и класификация на ветрогенераторите.

Разгледани са характерни видове ветрогенератори, съвременни тенденции за развитие и достижения в областта на ветроенергетиката.

От направения преглед на литературата и съществуващото състояние на техниката, могат да се направят следните изводи:

Проблемът с ниската ефективност на ветрогенераторите е актуален

Работи се активно за увеличаване на ефективността на ветрогенераторите в целия скоростен диапазон в който работят, но резултатите се разминават чувствително в областите под и над оптималната скорост за ветрогенераторите

Наложил се метод за промяна на стъпката на лопатите на хоризонталноосевите турбини, утежнява и оскъпява конструкцията без да показва добра ефективност на ветрогенераторите в скорости на вятъра близки до стартирането им и особено след достигане на максимална мощност.

Не могат да се адаптират хоризонталноосевите генератори към всички географски райони и това ограничава тяхното използване

Увеличаването на мощността на хоризонталноосевия генератор е свързана с негативни аеродинамични ефекти и технологични проблеми, които създават физически лимит на мощността и намаляват к.п.д. на турбината

Цел и задачи на дисертацията

Цел на дисертационния труд

Целта на този дисертационен труд е да се установят физическите характеристики на модели на адаптивен ветрогенератор, изразени в мощност и к.п.д. в обичайния ветрови скоростен диапазон на всеки ветрогенератор и да се сравнят помежду си, както и да се сравнят с показатели на ефективност на хоризонталноосевите ветрогенератори.

Основни задачи

Анализиране на съществуващото състояние на техниката

Изразяване на теоретичната ефективност на хоризонталноосев ветрогенератор

Намиране на теоретичен модел изразяващ ефективността на адаптивен ветрогенератор.

Изработване на модел на адаптивен ветрогенератор

Разработване и изработване на стенд за интегриране към аеродинамична тръба УЛАК – 1 за изследване на модели на адаптивни ветрогенератори.

Физическо изследване на модел на адаптивен ветрогенератор

Използване на числен на модел на адаптивен ветрогенератор за симулация и сравняване на резултатите с резултатите от физическото изследване.

ГЛАВА 2

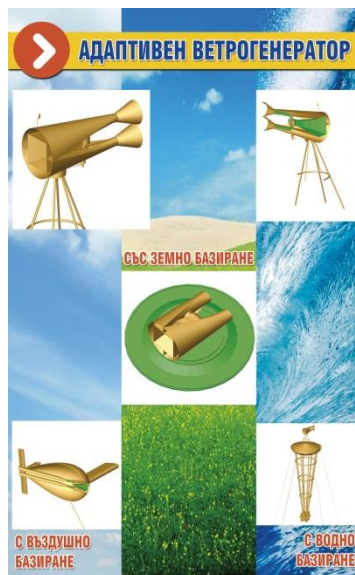
Адаптивен ветрогенератор. Същност и функционални особености

2.1 Описание на адаптивен ветрогенератор

Адаптивният ветрогенератор се състои от: носеща част, аеродинамичен трансформатор съдържащ - входно устройство, корпус, турбини, изходно устройство и ежектори, регулируеми електрически генератори или спирачка, система за насочване, електрическа част, микровълнова и електросъпротивителна или спиртна противооблединителна система.

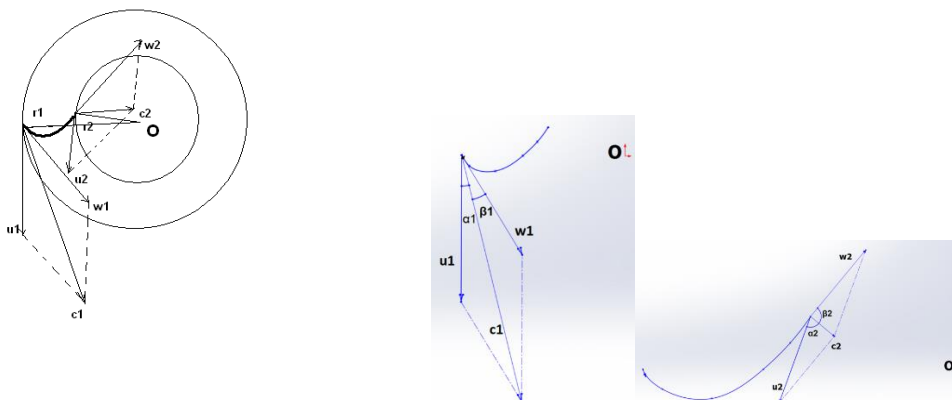
В зависимост от начина на базиране (въздушно, земно или водно) носещата част на адаптивния ветрогенератор е принципно различна. Затова при описанието се започва от общото при трите.

На фиг. 2.1 е показан адаптивен ветрогенератор



Фиг. 2.1 Адаптивен ветрогенератор

Въздухът, постъпващ на входа на ВУ има следните параметри – скорост, налягане, температура и плътност. Във ВУ се получава изменение на тези параметри, след което той навлиза в турбините. Предназначението на турбините е да преобразуват енергията на потока в механична работа. Използва се т.н. инерционен принцип. Тук енергообменът става между движещия се въздух и стените на канала през който преминава. Турбините могат да бъдат както активни така и реактивни. Скоростните триъгълници на един профил от РК е показан на фиг.2.2.



Фиг. 2.2 Скоростни триъгълници на профил от работно колело на центроостреителна турбина

u_1 – периферна скорост на входа на канала
 c_1 – скорост на въздуха постъпващ в турбината от ВУ
 w_1 – относителна скорост т.е. скоростта на потока спрямо стените на канала - представлява отношението на дебита през канала и съответното напречно сечение на канала, което е перпендикулярно на w_1

u_2 – периферна скорост на изхода на канала
 c_2 – абсолютна скорост на въздуха на изхода на канала
 w_2 – относителна скорост на въздуха на изхода на канала

O – център на ротация

r_1 – радиус на ръба на входа на канала

r_2 – радиус на ръба на изхода на канала

α_1 – ъгъл м/у директрисата на периферната скорост и вектора на абсолютната скорост на входящия въздух

α_2 – ъгъл м/у директрисата на периферната скорост и вектора на абсолютната скорост на изходящия въздух

β_1 – ъгъл м/у векторите на абсолютната и относителната скорост на входящия въздух

β_2 – ъгъл м/у векторите на абсолютната и относителната скорост на изходящия въздух

Връзката на скоростите при входящия ръб е:

$$\vec{c}_1 = \vec{u}_1 + \vec{w}_1 \quad (2.1)$$

Връзката на скоростите при изходящия ръб е:

$$\vec{c}_2 = \vec{u}_2 + \vec{w}_2 \quad (2.2)$$

От фиг.2.2 се вижда, че за който и да е скоростен триъгълник $c \cdot \cos\alpha$ представлява проекцията на абсолютната скорост c върху директрисата на периферната скорост u и се означава тази проекция с c_u . При така приетите условия за 1kg въздух преминал през канала от уравнението на Ойлер за изменението на кинетичния момент M , т.е. за момента на всички външни сили се получава:

$$M = r_1 c_{u1} - r_2 c_{u2} \quad (2.3)$$

За мощността се получава следния израз:

$$N = M \omega = u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2} \quad (2.4)$$

където:

ω – ъглова скорост на работното колело

За положителна се смята посоката на вектора c_u , когато е еднопосочен с вектора на периферната скорост u , а когато те са разнопосочни c_u има отрицателна стойност.

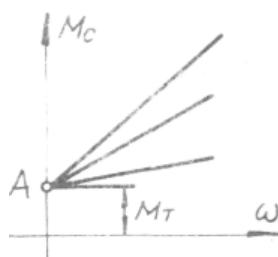
За да има максимално отдаване на енергия, необходимо е втория член от дясната страна на уравнението да бъде нула т.е. $u_2 c_{u2} = 0$. Тъй като $u_2 > 0$, следва, че $c_{u2} = 0$ или $\alpha_2 = 90^\circ$. В този случай има перпендикулярно (при $\alpha = 90^\circ$) изтичане. По този начин има максимално трансформиране на енергията на потока в механична работа.

2.2 Управление на адаптивен ветрогенератор

Съществена роля за к.п.д. на ветрогенератора играе управлението на скоростта на турбините. За улеснение се разглежда едната турбина. На вала на турбината се създават два въртящи момента. Единият е създаден от реакцията на направляващите на профилите от промяната на скоростта и направлението на въздуха, а другият от съпротивителния момент на електрическия генератор или спирачката. Разглежда се адаптивен ветрогенератор, свързан с ел. генератор, но по аналогичен начин стои въпроса и със спирачка за генериране на топлина. Понеже генератора е с външно възбуждане съпротивителния му момент може да се регулира чрез изменение на магнитния поток на възбудителната намотка.

Адаптивният вертогенератор може да има както спирачка за генериране на топлина, така и ел. генератор, като и в двата случая важното е да може да се регулира съпротивителния въртящ момент създаван от спирачката или от ел. генератора. Електрическите генератори, могат да бъдат както динама, така и алтернатори. Общото между тях е, че трябва с изменение на някой от

електрическите параметри управляващи генератора да се изменя съпротивителния му момент, а по този начин и отдаваната в електропреносната мрежа електроенергия. Това се налага за да бъде винаги системата с максимален к.п.д., както е показано при описанието на принципа на действие на турбините. На фиг. 2.3 са показани механичните характеристики на постояннотоков генератор при различно възбуждане. Съпротивлението M_T при нулева скорост се дължи на сухото триене в лагерите.



Фиг.2.3 Механични характеристики на постояннотоков генератор

За пример се разглежда постояннотоков генератор с независимо възбуждане. При него електромагнитния момент M , Nm е:

$$M = k\Phi I \quad (2.5)$$

където:

k – коефициент, индивидуален за всеки генератор зависещ от броя на полюсите, активната дължина на проводниците и техния брой

Φ – магнитния поток, Wb

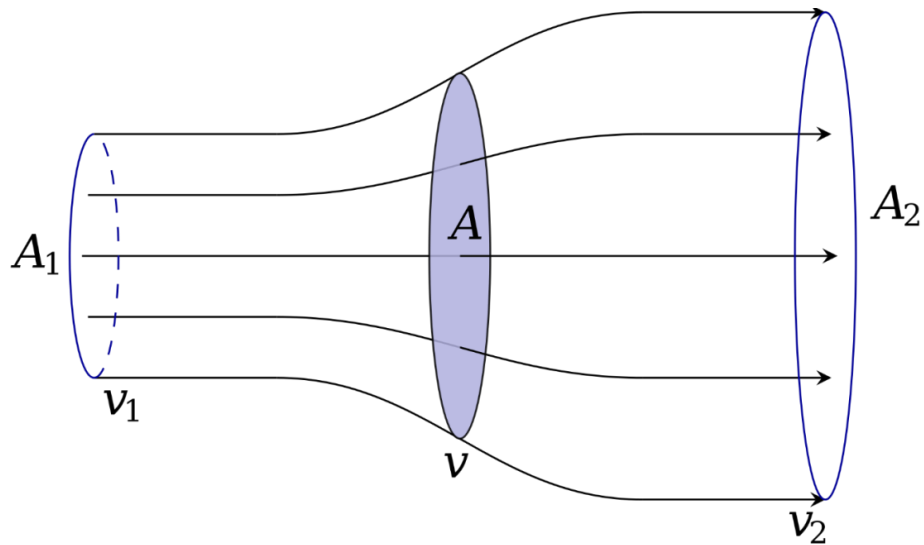
I – големината на тока в котвената намотка, A

Глава 3 Енергийна ефективност на ветрогенераторите

3.1 Енергийна ефективност на хоризонталноосев ветрогенератор

По-долу описаното изложение е валидно при следните условности:

- флуидът е идеален;
- течението в целия разглеждан участък е ламинарно;
- плътността на флуида не се променя;
- процесът е адиабатен;
- процесът се разглежда за единица време.



Фиг.3.1 Токови линии на идеален флуид преминаващ през идеализиран хоризонталноосев ветрогенератор

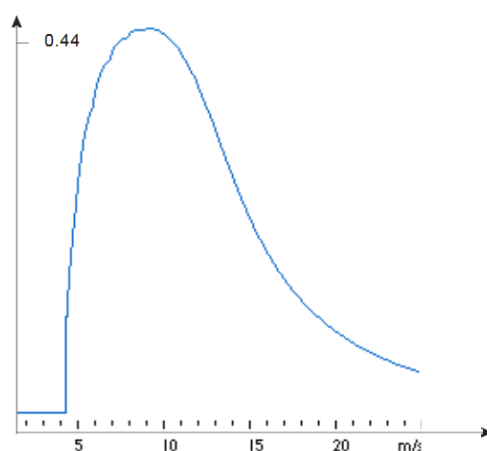
Роторът на хоризонталноосев ветрогенератор е заменен с безкрайно тънък диск със сечение A от фиг.3.1, който превръща кинетичната енергия на флуида в механична работа. Флуидът се движи в посока от сечение A_1 към сечение A_2 , както е показано на фиг.3.1. Показани са също така и токовите линии на флуида. v_1 , v и v_2 са скоростите на флуида в съответните сечения. Вижда се, че скоростта намалява, вследствие на което се увеличава напречното сечение съгласно закона за непрекъснатостта. Интерес представлява задачата, каква е максималната ефективност на този вид генератор и при какви условия се постига тя.

$$P = P_p 0,593 \quad (3.1)$$

Максималният възможен теоретичен к.п.д. на хоризонталноосев ветрогенератор е 59,3%. Скоростта в сечение А се намалява $\frac{2}{3}$ пъти:

$$v = \frac{2v_1}{3} \quad (3.2)$$

К.п.д. на хоризонталноосев ветрогенератор във функция от скоростта на вятъра има характеристика показана на фиг.3.2



Фиг. 3.2 к.п.д. на хоризонталноосев ветрогенератор

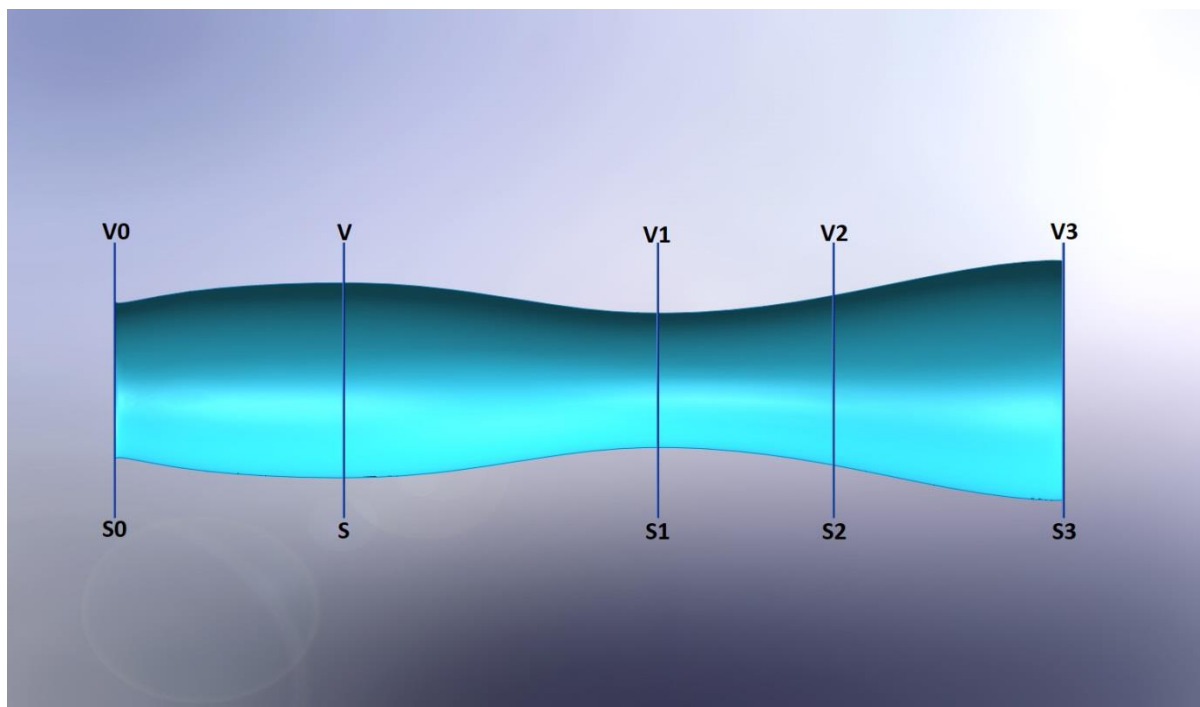
Максималната стойност на к.п.д. при съвременните хоризонталноосеви ветрогенератори е около 45%, а теоретичният им максимум е 59,3% (както е описано по-горе)

Вижда се, че к.п.д. намалява рязко след максимума, което е голям недостатък за тези генератори, понеже мощността на вятъра нараства с третата степен на скоростта, т.е. загубите при високи скорости на вятъра са значителни.

3.2 Теоретичен модел за повишаване на ефективността на идеализиран модел на хоризонталноосев ветрогенератор

Разглежда се хоризонтално преминаващ флуид, който постъпва в конфузор, в стеснената част на който условно е поставена турбина, сечение S_2 , фиг.3.3. В това

сечение става преобразуване на кинетична енергия в механична, аналогично на сечение А на модела от фиг.3.1.



Фиг.3.3 Профилиран канал

Показаният канал е избран така, че скоростите на потока V_1 , V_2 и V_3 да съответстват на (3.2), т.е. да има максимален енергообмен между потока и турбината. Участъкът от сечение S до сечение S_1 представлява конфузор в който се изменя (увеличава) скоростта на потока от V до V_1 . От сечение S_0 до сечение S , каналът следва естествения профил на потока пред конфузора, получен от изменението (намаляването) на скоростта на флуида от V_0 до V . Сечение S_1 се явява излишно съпротивление на потока, но е профилиран по този начин канала, за визуализиране на аналогията с процеса от фиг.3.1.

Интерес представлява мощността на флуида в сечение S , за скорост V_0 и мощността на турбината в сечение S_2 . Профилът на канала е избран така, че в сечение S_2 се отнема кинетична енергия, превръщайки се в механична, като това става с намаляване на скоростта на флуида при следните отношения на скоростите на флуида в тези сечения:

При така приетите условности, η_{max} се получава при отношение $n = 1,299$.

3.3. Енергийна ефективност на адаптивен ветрогенератор

В 3.1. се показва, че теоретично к.п.д. на хоризонталноосев ветрогенератор не може да надвиши 59,3%.

При центростремителната турбина, използвана в адаптивния ветрогенератор, работното колело се състои от два диска, между които са разположени работните лопатки. Ако турбината е активна, т.е. $w_1 = w_2$, нейният к.п.д. η има следния вид:

$$\eta = \frac{4 \sin(\beta_1 - \alpha_1) \sin \alpha_1 \cos \beta_1}{\sin^2 \beta_1} \quad (3.3)$$

За да се определи оптималната (от гледна точка на ефективността на работния процес) стойност на ъгъла α_1 , се решава уравнението:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \alpha_1} = 0 \quad (3.4)$$

При идеализирани условия, ефективността на адаптивния ветрогенератор ще бъде $\frac{0,471\rho_1 V_1^3 n^2}{0,297\rho_1 V_1^3} = 1,5n^2$ пъти по-голяма от ефективността на хоризонталноосевия.

$$E_{mv} = 0,471\rho_1 V_1^3 V_2^2 / v_1^2 = 0,471\rho_1 V_1 V_2^2 \quad (3.5)$$

ГЛАВА 4

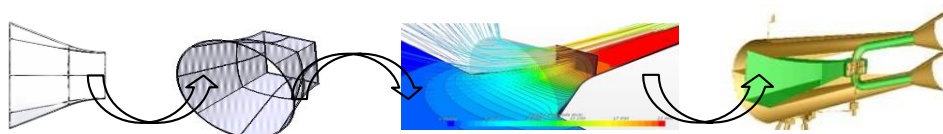
Разработване и изследване на адаптивни ветрогенератори

При разработването на модели на адаптивни ветрогенератори, подходящи за реално изследване трябва да се започне от общото за различните възможни варианти на тези модели. От Глава 2 става ясно, колко многовариантна може да бъде задачата за проектиране на адаптивен ветрогенератор. Същността на тези енергийни машини е най-общата им част и е т.нар. аеродинамичен трансформатор,

който включва в най-общия случай: турбина(и), корпус, входно устройство, изходни устройства, ежектори и спирачка(и) или ел. генератор(и). При него също обаче задачата става многовариантна, в зависимост от това, кои от тези елементи ще се включат в конструкцията и какъв вид ще имат тези елементи. Разработването и изпитването на всички тези варианти увеличава многократно обема и времето за решаването на тази задача, а и резултатите се отклоняват в посока сравняване на различните конструкции адаптивни ветрогенератори, а това няма да отговори на най-важния въпрос, а именно сравнението на този тип машини с основно използваните се в момента хоризонталноосеви ветрогенератори. Затова се разработи модел на адаптивен ветрогенератор, включващ основно елементите, които винаги присъстват в адаптивния ветрогенератор и които сами по себе си и без всичко останало представляват аеродинамичен трансформатор, а именно – турбина и корпус, както и отделно входно устройство.

4.1. Разработване и виртуално изследване на входни устройства за адаптивен ветрогенератор

Задачата с виртуалното изследване е разделена на две части с цел по-добро оптимизиране и редуциране на необходимия брой симулации. Първата част е изследване на входно устройство с подходяща геометрия, а втората е изследване на ветрогенератор, състоящ се от корпус, турбина и спирачка.

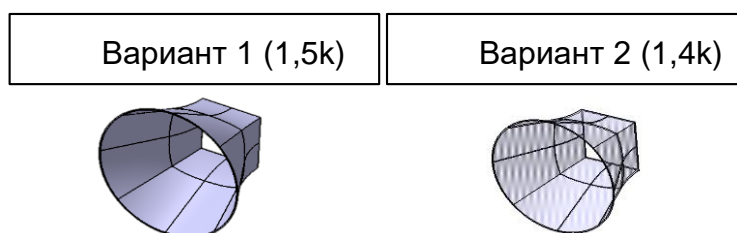


Фиг. 4.1 Етапи на разработване на адаптивен ветрогенератор

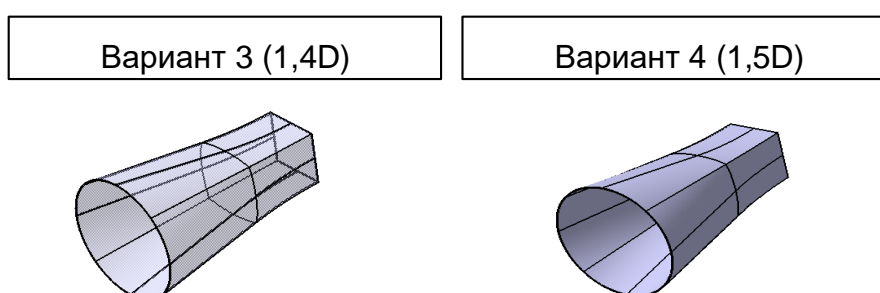
4.1.1 Избор на геометрия на входни устройства

Избрани са четири симетрични входни устройства с кръгло напречно сечение на входа и квадратно на изхода. Симетрията при симулацията създава допълнително удобство, пестящо време и ресурс.

Входните устройства са четири варианта фиг. 4.2 и фиг. 4.3.



Фиг. 4.2 Варианти на входни устройства с индекс k

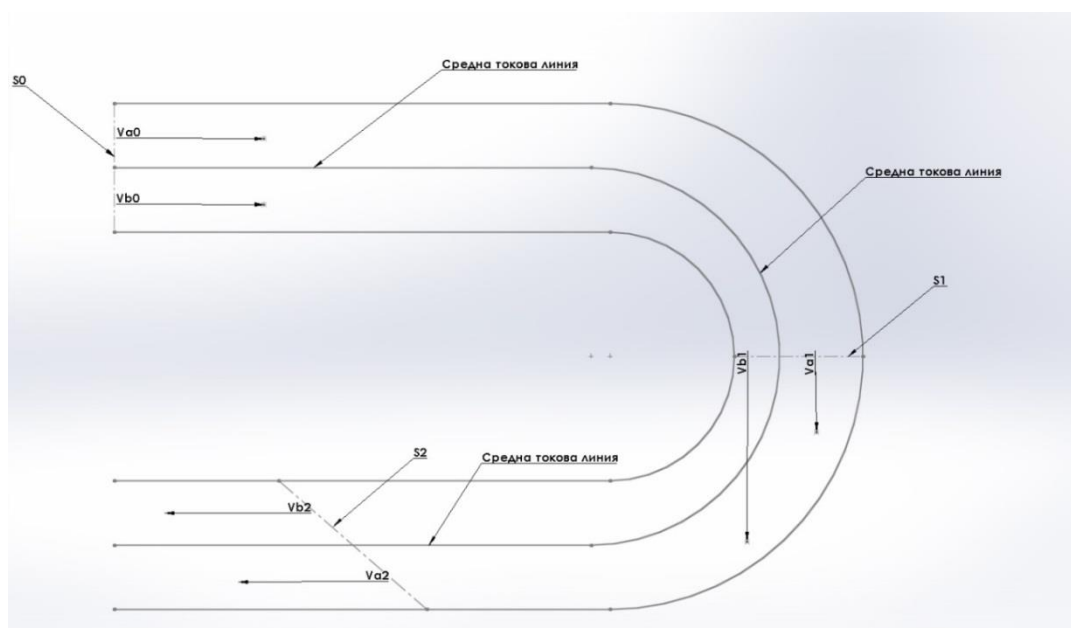


Фиг. 4.3 Варианти на входни устройства с индекс D

Вариант 1 (1,5k) показва най-добри показатели по отношение на скорост и масов дебит на изхода на входното устройство. По-важното обаче е, че разликата в скоростта на изхода и масовия дебит между него и Вариант 3 (1,4D) е в рамките на 1%. Разликата на същите параметри между Вариант 2 (1,4k) и Вариант 4 (1,5D) също е в рамките на 1%. Това означава, че дължината L_n на всяко входно устройство в интервала от $\frac{2r_n}{\varphi}$ до $\varphi 2r_n$ не е съществен фактор в изменението на скоростта и дебита в скоростния диапазон в който работят ветрогенераторите, което създава голямо удобство от конструктивна, технологична и икономическа гледна точка. Този извод може да се използва за постигане на желани резултати с по-технологични конструкции на входни устройства. Трябва да се отбележи, че диапазона на L_n от $\frac{2r_n}{\varphi}$ до $\varphi 2r_n$ е достатъчно голям и позволява различни варианти за реализиране на входни устройства.

4.2 Средства за повишаване на ефективността на адаптивните ветрогенератори.

Разглежда се течение на флуид в U-образен канал (тръба) фиг. 5.11



Фиг. 4.4 Течение на идеален флуид през U-образен канал

Каналът е с постоянен радиус в извитата си част и постоянно напречно сечение. Условието за протичащия флуид са:

флуидът е несвиваем: $\rho = \text{const}$;

флуидът е невискозен;

течението е ламинарно.

В горната част на канала, през сечение S_0 постъпва флуид с постоянна скорост. Разглеждат се две точки от сечение S_0 – а и b. Точка b е в долната част на канала между средната токова линия и вътрешната стена на канала, а точка a е в горната част на канала, между средната токова линия и външната стена на канала. V е скоростта на потока. За скоростите може да се запише:

$$V_{a0} = V_{b0} \quad (4.1)$$

$$V_{b1} > V_{a1} \quad (4.2)$$

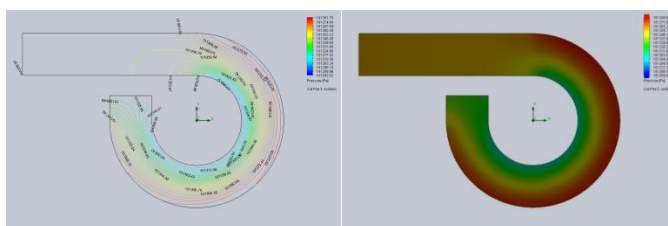
$$V_{b2} > V_{a2} \quad (4.3)$$

$$V_{b3} = V_{a3} \quad (4.4)$$

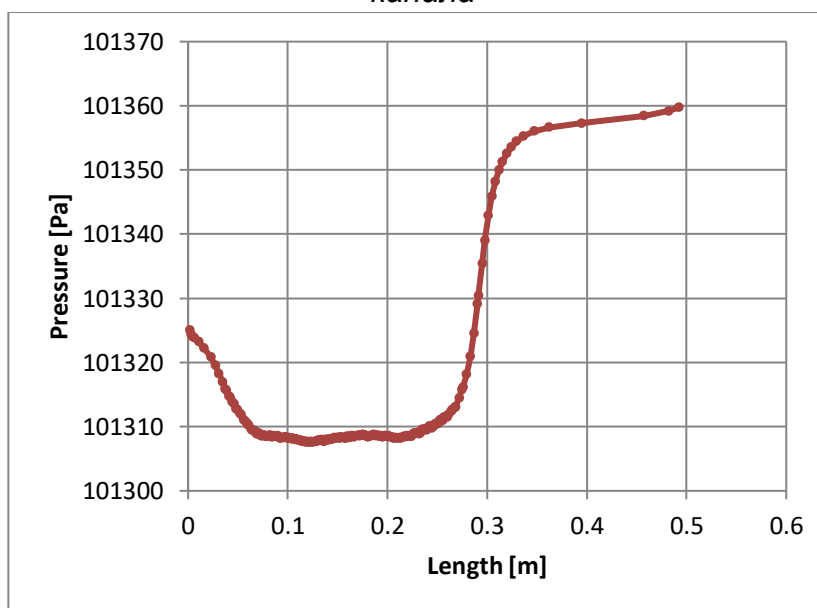
Този ефект е визуализиран и изследван чрез цифров модел и симулация направена в Solid Works.

На фиг.4.5 е показано налягането в G-образна тръба с начални условия:

- флуид – въздух;
- течение смесено (ламинарно + турбулентно);
- скорост на входа 10 m/s;
- изход атмосферно налягане – 101325 Pa;
- няма топлообмен между стените и флуида
- начално налягане – 101325 Pa;
- температура – 293,2 K.



Фиг. 4.5 Разпределение на налягането в средното надлъжно сечение на канала



Фиг. 4.6 Изменение на налягането по обхождаща линия на дистанция 5 mm от вътрешната стена на канала в средното надлъжно сечение

Този ефект се използва в адаптивния ветрогенератор за увеличаване на

скоростта на флуида пред турбината, понеже нейният външен диаметър се използва за вътрешна стена на канала. Входът на турбината се намира в зоната с най-висока скорост на въздуха т.е. работи при по-благоприятни условия. Това е основната причина в адативния ветрогенератор да се използва такъв вид конструкция с центростремителна турбина, поставена в корпус с такава конфигурация.

4.3 Разработване на стенд за изследване на модели на адаптивни ветрогенератори

Стендът за изпитване на модели на адаптивни ветрогенератори, работи съвместно с аеродинамична тръба УЛАК-1. Част от него е интегрирана в работния участък на тръбата. Неговото предназначение е да фиксира правилно (фронтално на потока) и стабилно модела, да снее механичните характеристики на модела и да е удобен за работа. Фиксирането към УЛАК-1 се осъществява посредством рамка поз.1 фиг.4.7. Стендът е предназначен за физическо изследване на модели на Адаптивни ветрогенератори в скоростния диапазон на потока (въздуха) 5m/s – 15 m/s. Чрез него се определя изменението на мощността на ветрогенератора във функция от скоростта на потока и на съпротивителния момент прилаган на вала на турбината (имитират се характеристиките на регулируем електрогенератор).

Основните елементи на конструкцията са показани на фиг.4.7.



Фиг.4.7 Стенд за изследване на модели на адаптивни ветрогенератори

- 1 – рамка носеща;
- 2 – изпитван модел на адаптивен ветрогенератор;
- 3 – опори лагерни;

- 4 – вал;
- 5 – диск спиращен алуминиев;
- 7 - апарат спиращен електромагматен.

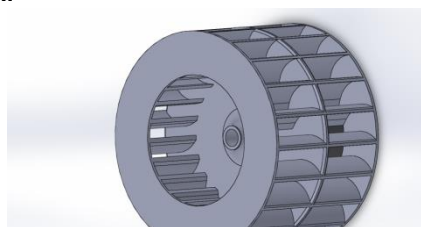
Към стенда е предвидено следното допълнително оборудване:

- електронна везна;
- аеродинамична тръба;
- уред за отчитане честотата на въртене на вала (тахометър);

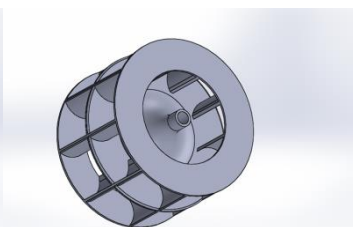
Стендът може да определя работните характеристики на различни модели адаптивни ветрогенератори.

4.4 Физическо изследване модели на адаптивни ветрогенератори

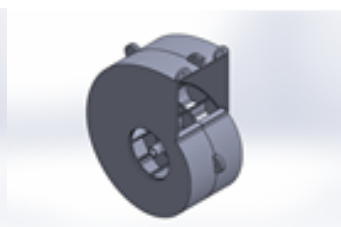
За провеждане на необходимото изследване е използван стенд за изпитвания на модели на адаптивни ветрогенератори /137/, аеродинамична тръба УЛАК-1 поз.1 от фиг.4.11 и измервателни уреди. За да не смущава въздушния поток, носещата рамка на стенда е фиксирана около работния участък на аеродинамичната тръба. На рамката поз.2, е монтиран изследвания модел поз.3, така че да бъде изцяло в участъка от тръбата, в който въздушния поток е с установени параметри, с ориентация фронтално на потока фиг.4.11. Валът на турбината се свързва със спиращата система поз.4, имитираща работата на регулируем ел. генератор. След задаване на определена скорост на въздуха в аеродинамичната тръба, част от него навлиза в корпуса на адаптивния ветрогенератор, където се подвежда към турбината. Понеже турбината е от инерциален тип, енергообменът става между движещия се въздух и стените на канала в който се движи. Вследствие на изменението на скоростта по големина и направление в самия канал се пораждат инерционни сили с обратен знак като продукт от масата и ускорението на движещия се въздух.



Фиг.4.8 Турбина1



Фиг.4.9 Турбина 2

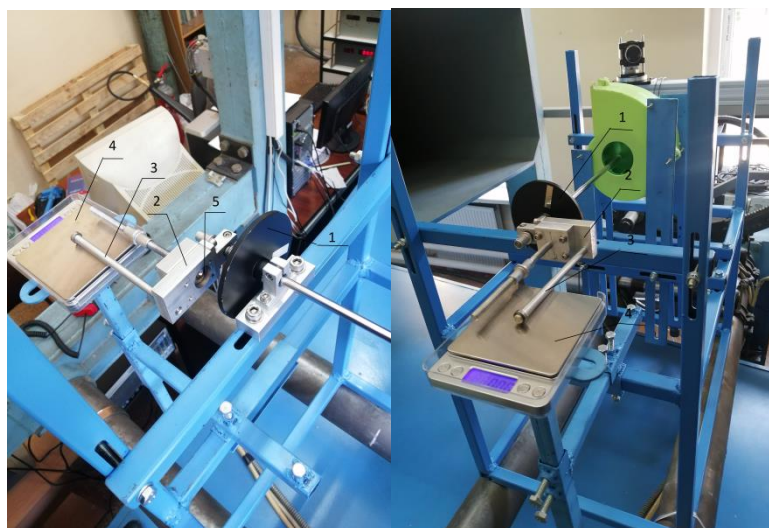


Фиг.4.10 Изпитван модел



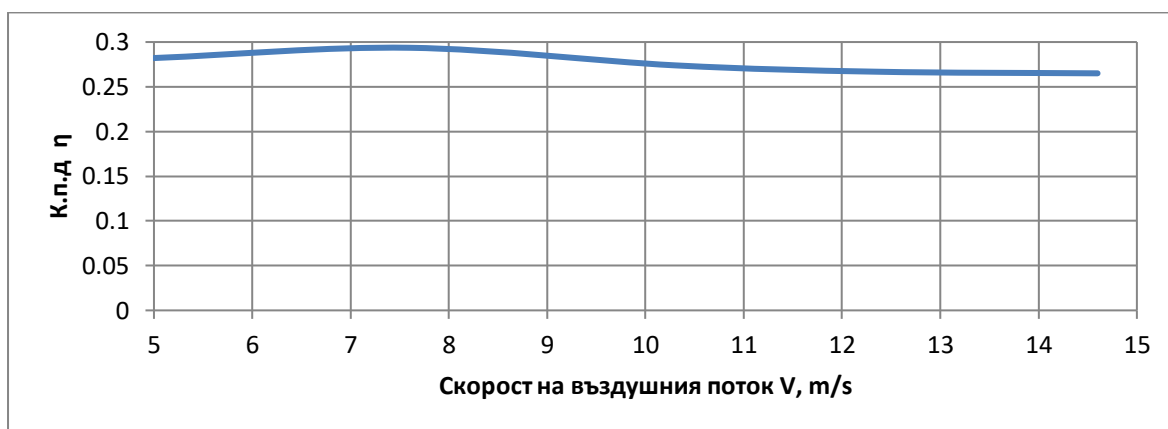
Фиг.4.11 Аеродинамична тръба УЛАК-1 с инсталиран модел на адаптивен ветрогенератор

За изпитването са използвани две турбини /138/. Първата (турбина 1) фиг.4.8 е с външен диаметър 100 mm, вътрешен диаметър 60 mm, брой на лопатките 21. Втората фиг.4.9 е с външен диаметър 100 mm, вътрешен диаметър 60 mm, брой на лопатките 9. Разликата между двете турбини е в броя на лопатките. Всяка от турбините се монтира в корпус с входящо напречно сечение квадрат със страна 72 mm, като по този начин се образува базов модел на адаптивен ветрогенератор, показан на фиг.4.10 или поз.3 от фиг.4.11. Базовият модел е захванат на рамката на стенда. На същата рамка лагерува и валът на турбината, като в единия му край е монтирана спирачната система поз.4 от фиг.4.11. Спирачката фиг.4.12 е от магнитен тип и се състои от спирачен диск поз.1, магнити поз.5, подвижен супорт поз.2. Спирачният диск е изработен от алуминиева сплав с диаметър 100 mm и ширина 5 mm. По него има нанесено черно матово покритие и радиално прикрепен светлоотразителен стикер, необходим за функционирането на оптичен тахометър, посредством който се измерва ъгловата скорост на турбината.

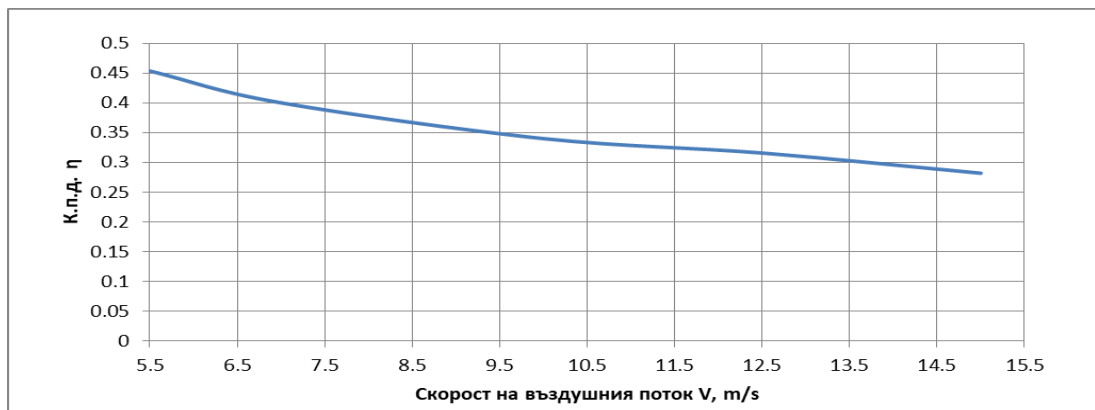


Фиг.4.12 Спирачна система

На фиг.4.13 и фиг.4.14 са изобразени графично к.п.д. на двата модела във функция от скоростта на въздушния поток, като фиг.4.13 съответства на базов модел с турбина с 11 лопатки, а фиг.4.14 на базов модел с турбина с 21 лопатки.



Фиг.4.13 Изменение на к.п.д. във функция от скоростта на въздушния поток на модел с турбина 1



Фиг.4.14 Изменение на к.п.д. във функция от скоростта на въздушния поток на модел с турбина 2

Резултатите са получени при измерено атмосферно налягане 745 mmHg и температура на въздуха 19⁰ С. Плътноста на въздуха е $\rho = 1,184 \text{ kg/m}^3$.

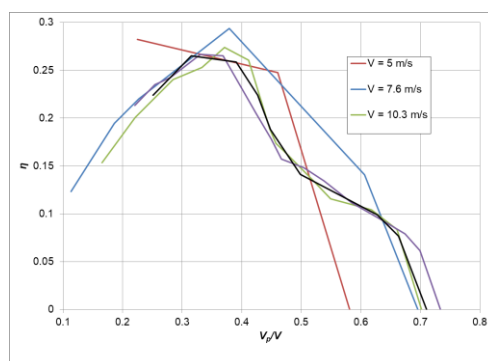
За удобство се въвежда безразмерния параметър V_p/V

$$V_p = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad (4.5)$$

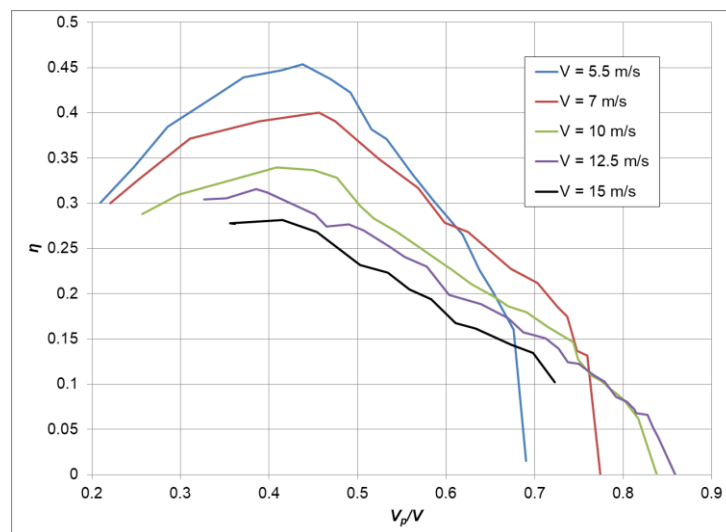
където: V_p , m/s - периферна скорост на турбината

$D = 0.1 \text{ m}$ – външен диаметър на турбината.

На фиг.4.15 и фиг.4.16 са показани измененията на к.п.д във функция от параметъра V_p/V на модел с турбина 1 и модел с турбина 2.



Фиг.4.15 к.п.д във функция от параметъра V_p/V на модел с турбина 1



Фиг.4.16 к.п.д във функция от параметъра V_p/V на модел с турбина 2

При сравняването на получените резултати с к.п.д. във функция от скоростта на вятъра на хоризонталноосев ветрогенератор фиг.3.2, се вижда, че последния чувствително отстъпва по този критерии на изпитаните модели на адаптивен ветрогенератор. От направените до сега ветроенергийни анализи по света на различни терени при един обичаен дистрибуционен фактор 2,3, при който процентното разпределение на ветроскорост 4,5 m/s е максимално и има статистическа стойност 19%, се забелязва от графиката на фиг.3.2, че разликата в ефективността между модел на адаптивен ветрогенератор и хоризонталноосев ветрогенератор е повече от три пъти. При това тази разлика се получава при най-обичайната скорост на вятъра на местата по земната повърхност подходящи за ветроенергетика.

Забелязва се, че промяната на броя на лопатките на турбината на адаптивен ветрогенератор влияе както на к.п.д., така и на неговия максимум във функция от скоростта на вятъра, което е много удобно от практическа гледна точка, защото спрямо дистрибуционния фактор на терена може да се оптимизира ефективността на системата с използване на турбина с подходящ брой лопатки. Отпада необходимостта от регулиране на стъпката на лопатките, което е технологично и конструктивно по-сложно, но е масово наложил се метод за управление на хоризонталноосевите ветрогенератори.

Вижда се тенденцията към конкретна стойност на V_p/V , при която има

максимален к.п.д. По този начин методиката на изследването може да се промени в посока намаляване броя на измерванията, като за произволна скорост на въздуха се направят прецизни измервания, за да се установи точното отношение V_p/V при което к.п.д. има максимална стойност. След това при всяка друга зададена скорост на въздуха може да се правят измервания само в областта на същото отношение V_p/V , защото там к.п.д. има максимум. V_p/V може да се използва и като критерии за подобие. Тази методика е удобно да се използва за провеждане на бъдещи експерименти с адаптивни ветрогенератори с цел намаляване времето и разходите за експериментите.

4.5 Изследване на числени модели на адаптивни ветрогенератори

Цифров модел на изследваният физически адаптивен ветрогенератор с турбина 2 е анализиран ,чрез програмния продукт Solid Works. Направена е симулация на процеса на работа на енергийната машина, като са използвани данни от резултатите на изследването. Разглежда се работата на модела при скорост на въздуха 10 m/s. От експерименталното изследване се намира честотата на въртене на турбината, при която к.п.д. има максимална стойност $\eta=0.339951$, $n=780 \text{ min}^{-1}$. Трябва да се отбележи, че при реалната работа на адаптивния ветрогенератор, честотата на въртене на турбината в установен режим е равновесното състояние, получено от въртящия момент предизвикан от въздействието на въздушния поток на турбината и съпротивителния въртящ момент на спирачката на вала на турбината. Когато двата момента се изравнят, честотата на въртене приема определена постоянна стойност. Понеже от физическото изследване е известна установената честота на въртене, при която к.п.д. има максимална стойност при зададената скорост на въздуха, задачата придобива следния вид:

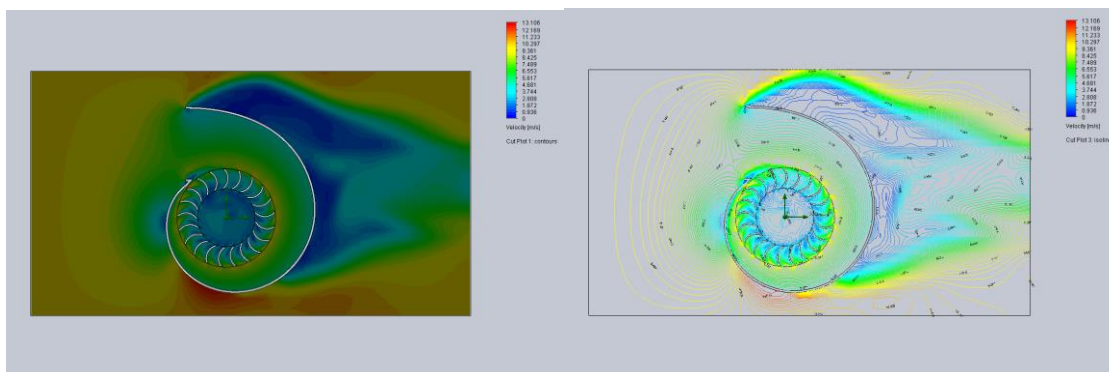
- задава се скорост на въздушния поток - V ;
- задава се ъгловата скорост на турбината - n ;
- получава се изчисленият въртящ момент при установен режим – M ;
- изчислява се мощността на турбината - P ;
- изчислява се мощността на въздушния поток - P ;
- изчислява се к.п.д. на модела – η ;

- сравнява се к.п.д. на модела, изчислен от данните получени от симулацията с к.п.д. изчислен от физическото изследване.

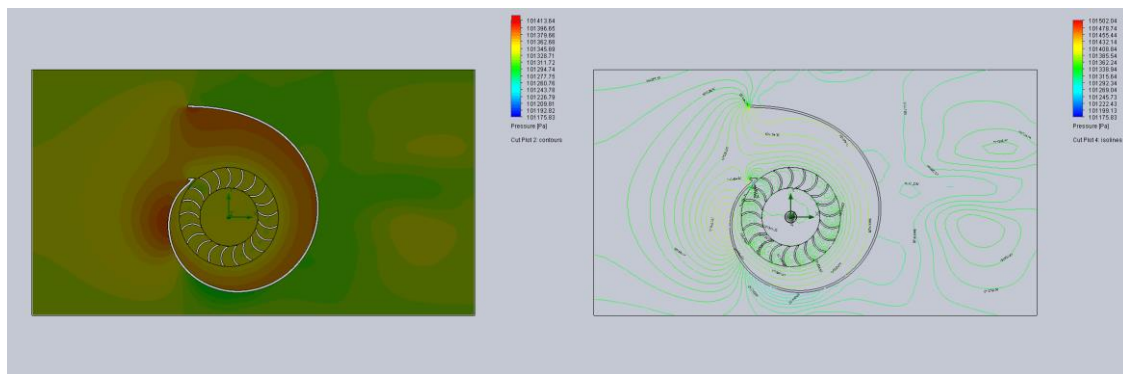
Изследваният модел е с турбина с 21 лопатки, външен диаметър $D = 100$ mm, вътрешен диаметър $d = 60$ mm и ширина $L = 68$ mm.

Thermodynamic parameters	Static Pressure: 101325.00 Pa Temperature: 293.20 K
Velocity parameters	Velocity vector Velocity in X direction: 10.000 m/s Velocity in Y direction: 0 m/s Velocity in Z direction: 0 m/s

Type	Surface Goal
Goal type	Torque (Z)
Faces	Turbina
Coordinate system	Global coordinate system
Use in convergence	On

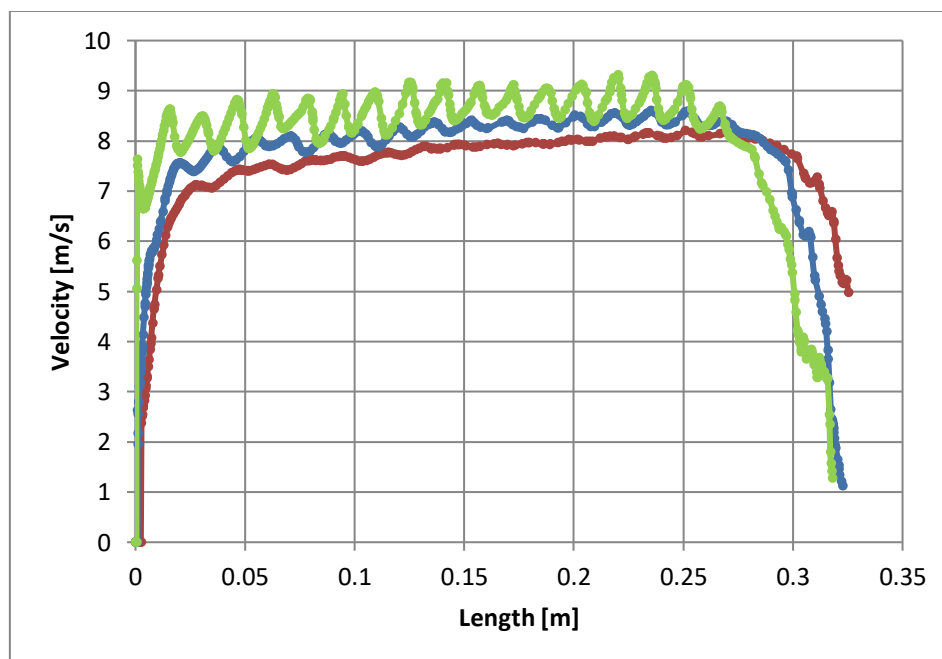


Фиг. 4.17 Изменение на скоростта в равнина успоредна на x у, $z=0.015m$



Фиг. 4.18 Изменение на пълното налягане в равнина успоредна на $x, y, z = 0.015 \text{ m}$

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
SG Torque (Z) 1	[N*m]	-0,0063386	-0,0062888	-0,00638719	-0,00617884



Фиг.4.19 Изменение на скоростта на въздуха в корпуса по 3 концентрични окръжности на външната окръжност на турбината в равнина успоредна на равнина $x, y, z = 0,015 \text{ m}$ и радиуси през $0,0025 \text{ m}$

От графиката на фиг.4.19 се виждат пулсациите на скоростта на въздуха в близост до турбината, в резултат на влиянието на лопатките. Наблюдава се също слабо изменение на скоростта пред турбината в целия и работен участък. С отдалечаване от турбината, пулсациите намаляват, както и абсолютната скорост на въздуха.

Като се вземе предвид условието за симетричност, за мощността на турбината се получава :

$$P = 2\pi 0,0062888.780/30 = 1,0274 \text{ W} \quad (4.6)$$

От за мощността на потока се получава:

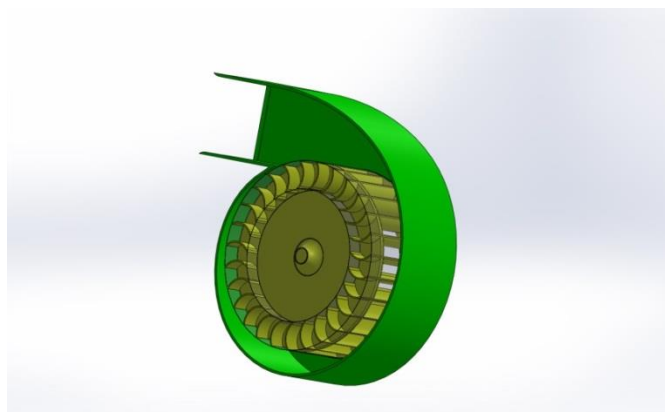
$$P_0 = 0,5.1,225.10^3.0,072^2 = 3,1752 \text{ W} \quad (4.7)$$

От за к.п.д. на ветрогенератора се получава:

$$\eta = 1,0274/3,1752 = 0,32357 \quad (4.8)$$

От получените резултати става ясно, че численото изследване дава разлика от 1.6% от физическото изследване. Това показва точността на изследването при така зададените условия и параметри. Резултатите са достатъчно точни, следователно изчислителната мрежа е достатъчно прецизна за този модел. Следователно, ако геометрично се промени модела и се използва същата методика за построяване на изчислителна мрежа и същите условия и параметри, се очаква получените резултати да бъдат с близко до горното отклонение стойност в сравнение с физически модел, изпитан в реални условия.

Следвайки горната логика, е изследван числен модел на адаптивен ветрогенератор фиг.4.20, на който са променени размерите на турбината и корпуса, със запазена геометрия на лопатките на турбината. Използвани са същите критерии за построяване на изчислителната мрежа, като на горния модел и същите условия и параметри.

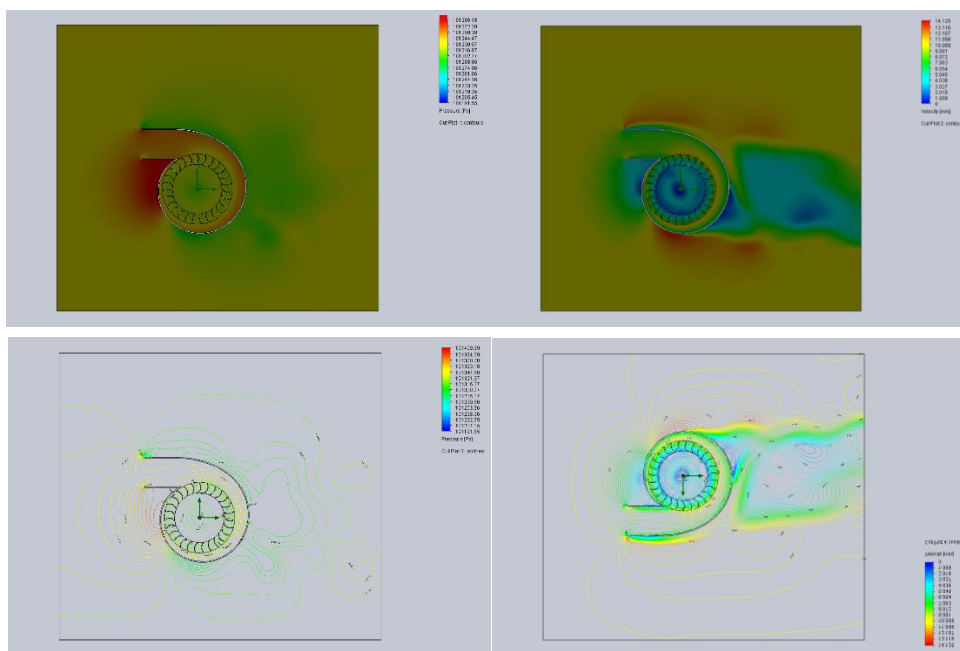


Фиг.4.20 Надлъжен разрез на изследвания модел адаптивен ветрогенератор с турбина с 27 лопатки

Турбината има следните параметри:

- външен диаметър – Φ 170 mm;
- широчина – 87,6 mm;
- брой лопатки – 27;
- геометрията на лопатките е същата като на турбина 1 и турбина 2

ВУ има правоъгълна форма с широчина 91,6 mm и височина 56,6 mm.



Фиг. 4.21 Изменение на налягането и скоростта в равнина успоредна на x , $z = 0.015$ m

Goal Name	Unit	Value	Average Value	Minimum Value	Maximum Value
SG Torque (Z) 1	N*m]	0,013745878	0,013938545	0,014216481	0,013664734

Табл. 4.1 Стойности на въртящия момент

Като се вземе предвид условието за симетричност, за мощността на турбината се получава :

$$P = 2.80 \cdot 0,013938545 = 2,23 \text{ W} \quad (4.9)$$

От (5.29) за мощността на потока се получава:

$$P_0 = 0,5 \cdot 1,225 \cdot 10^3 \cdot 0,0916 \cdot 0,0566 = 3,175543 \text{ W} \quad (4.10)$$

За к.п.д. на ветрогенератора се получава:

$$\eta = 2,23 / 3,175543 = 0,7 \quad (4.11)$$

Резултатите от изследването показват, увеличаване на ефективността. Това се обяснява с увеличените сечения през които въздуха преминава и изтича през турбината. Това е причина за намаляване на съпротивлението на ветрогенератора, а от там за увеличаване на дебита на въздуха преминал през турбината.

4.6 Мащабиране на адаптивните ветрогенератори

Разглеждат се базов модел на адаптивен ветрогенератор и друг геометрично мащабно подобен модел без да се отича критерия на Рейнолдс. Нека с k се означава мащабният коефициент. Геометричните параметри фиг.2.2 са:

r_1 – външен радиус на турбината на базовия модел;

r_2 – вътрешен радиус на турбината на базовия модел;

R_1 – външен радиус на турбината на мащабния модел;

R_2 – вътрешен радиус на турбината на мащабния модел

За да бъдат еднакви и скоростните триъгълници на изходящия ръб на лопатките е необходимо да бъде изпълнено условието:

$$R_2 = (k-1)r_1 - r_2 \quad (4.12)$$

Освен геометричната еднаквост на лопатките е необходимо и стъпката им да бъде равна (Произлиза от условието профилираните канали на турбината през които преминава въздуха да са еднакви).

При мащабиране на адаптивен ветрогенератор, масовите дебити са:

$$Q_m = \rho VS \quad (4.13)$$

$$Q_{m1} = \rho VS_1 = \rho VSk^2 \quad (4.14)$$

където:

Q_m – масов дебит на базовия модел, kg/s;

Q_{m1} – масов дебит на мащабно подобния модел, kg/s;

ρ – плътност на въздуха, kg/m³;

S_1 – напречно сечение на входа на ВУ на мащабно подобния модел, m²;

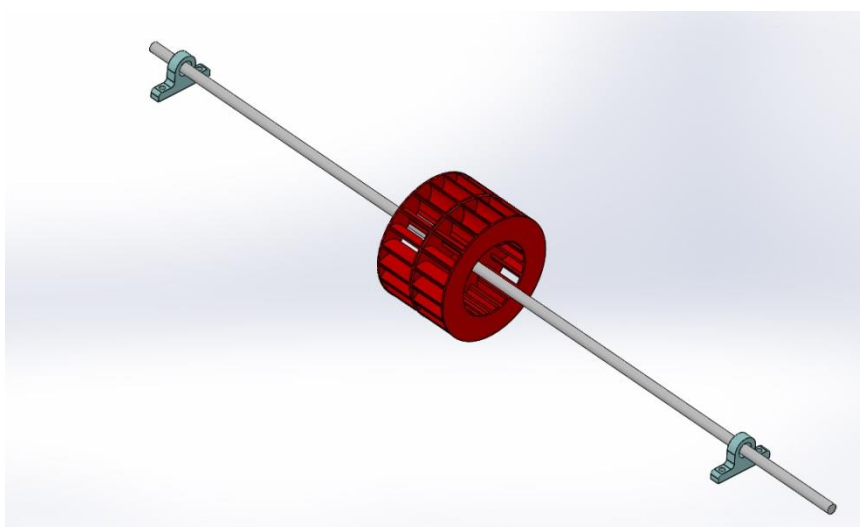
S – напречно сечение на входа на ВУ на базовия модел, m²;

V – скорост на въздуха на входа на ВУ, m/s.

Понеже масовият дебит на мащабно подобния модел е k^2 пъти по-голям от базовия модел, то и мощността му ще бъде k^2 пъти по-голяма.

4.7. Изследване на резонансните честоти на турбина с вал на цифров модел на адаптивен ветрогенератор

Целта на изследването е да се определят резонансните честоти на валът с турбината, използвайки модула за симулация в SolidWorks. Валът е изработен от калибрована стомана 45, а турбината - от PLA. Лагерите са монтирани в лагерни конзоли с неподвижни базови повърхнини. Описани са необходимите стъпки и гранични условия за провеждане на симулацията.



Фиг. 4.22 Турбина с вал и опори на модел 1 на адаптивен ветрогенератор

Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency(Hertz)	Period(Seconds)			
1	1196.1	190.37	0.0052529			
2	1202.3	191.36	0.0052259			
3	1608.7	256.03	0.0039058			
4	2708.1	431	0.0023202			
5	3749.1	596.69	0.0016759			

Табл. 4.2 Резонансни честоти и периоди на вал с турбина на модел 1 на адаптивен ветрогенератор

Най-опасната резонансна честота е първата, защото при нея се получава максимална амплитуда. Тя се получава при ъглова скорост 1202,3 Rad/sec. Максималната ъглова скорост, получена с изключена спирачна система на модел 1 има стойност 216,77 Rad/sec, а работната ъглова скорост при максимален к.п.д. е 124,62 Rad/sec.

Извод:

От направеното изследване на резонансните честоти на ситемата турбина-вал на модел 1 на адаптивен ветрогенератор, следва че най-опасната резонансна честота се постига при 5,5 пъти по-висока ъглова скорост от максимално възможната за модела (при скорост на въздуха 15 m/s, без съпротивителен спирачен момент), което означава, че моделът не е застрашен от ефектите на резонансните явления.

Заклучение

Предмет на дисертационния труд е създаване на средства и методи за физическо и числено изследване на модели на адаптивни ветрогенератори.

Основните резултати получени е дисертацията могат да бъдат обобщени както следва:

Изложена е теоретичната ефективност на хоризонталноосевия ветрогенератор

Създаден е теоретичен модел, изразяващ границата на влияние на конфузурен канал върху ефективността на хоризонталноосев ветрогенератор

Представена е теорията на инерционен тип турбина

Създаден е теоретичен модел изразяващ ефективността на адаптивния ветрогенератор

Обоснован е видът на корпуса и турбината на адаптивния ветрогенератор, чрез теоретично и симулационно представяне на параметри на въздух протичащ през извит канал, като е показано увеличаването на скоростта в зоната в която е входът на центростремителната турбина

Разработен е стенд за експериментално изследване на модели на адаптивни ветрогенератори с възможност за плавно изменение на спирачната

сила и увеличаване на диапазона на последната

Изработен е стенд за експериментално изследване на модели на адаптивни ветрогенератори. Описани са особеностите на стенда за изпитания, показани са отделните му компоненти, направена е теоретична обосновка на задачата, направен е анализ и резултатите са визуализирани графично.

Изработен е модел на адаптивен ветрогенератор с две турбини

Изследвани са физически два модела адаптивни ветрогенератори в скоростния диапазон 5 – 15 m/s. При физическото изследване се потвърди теорията, свързана с ефективността на адаптивния ветрогенератор, като се получиха високи стойности на к.п.д., стигащи до 45%. Ефективността се запазва с висок показател в целия скоростен работен диапазон на ветрогенератора.

Направено е виртуално изследване на модел на адаптивен ветрогенератор при скорост 10 m/s, като стойността на ефективността е с 1,6% разлика от физическото изследване, което показва много добро валидиране на модела.

Предложен е метод за съкращаване на броя на изпитанията

Направено е виртуално изследване на модифициран модел на адаптивен ветрогенератор, като по този начин е постигната два пъти по-висока ефективност, с което се доказва реално теоретичното предимство на адаптивния ветрогенератор пред хоризонталноосевия.

Изложен е метод за мащабиране на адаптивни ветрогенератори

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Създаден е ветрогенератор с висока ефективност в целия работен скоростен диапазон, наречен адаптивен

Създаден е теоретичен модел, изразяващ границата на влияние на конфузурен канал върху ефективността на хоризонталноосев ветрогенератор

Създаден е теоретичен модел изразяващ ефективността на адаптивния ветрогенератор

Изследвани са числени модели на входни устройства, с което се показва геометрична зависимост (диапазон), която влияе в малка степен на скоростта на въздуха

Изработен е стенд за изпитания на адаптивни ветрогенератори, като е предвидена възможност за увеличаване на диапазона на спирачната сила, за

да може да се използва за различни модели адаптивни ветрогенератори

Предложен е метод за намаляване на броя на изпитанията на адаптивни ветрогенератори с цел по-бързо и по-евтино изследване на характеристиките им.

Показан е начин с висока точност на резултатите, за изследване на числен модел на адаптивен ветрогенератор в среда на SOLID WORKS.

Публикации по дисертацията

1. Недев Хр., Адаптивен ветрогенератор, патент BG1517U1, 2012.
2. Недев Хр., Анализ и виртуално изследване входни устройства за адаптивен ветрогенератор, Национален комитет по теория на механизмите и машините, Механика на машините, година XXVI, КНИГА 3, 2018, стр. 54 - 58
3. 137 Недев Хр., (2019). Конструктивно – технологични особености на стенд за изпитания на модели на адаптивни ветрогенератори. Сборник (доклади): Национална научна конференция за студенти, докторанти и млади учени, 8, 115 — 121
4. 139 Недев Хр., (2019). Сравнителен анализ на ефективността на адаптивните спрямо хоризонталноосевите ветрогенератори. Сборник (доклади): Национална научна конференция за студенти, докторанти и млади учени, 8, 103 - 109
5. H. Nedev, S. Penchev, Experimental study of models of an adaptive wind turbine, AIP Conf. Proc. 2449, 060017 (2022), <https://doi.org/10.1063/5.0091174>

ANNOTATION

Modeling and Investigation of an Adaptive Wind Turbine

The subject of this dissertation is the creation and investigation of adaptive wind turbine models, comparing their parameters, and evaluating their efficiency.

The objective of this dissertation is to determine the physical characteristics of adaptive wind turbine models, expressed in terms of power and efficiency (η) within the typical wind speed range for each turbine, and to compare these models with each other as well as with the performance metrics of horizontal-axis wind turbines.

This work presents the theoretical efficiency of a horizontal-axis wind turbine and proposes a theoretical model for the efficiency of an adaptive wind turbine. Additionally, a model is proposed to account for the influence of a diffuser on the efficiency of a horizontal-axis wind turbine. The influence of the length of inlet devices on their effective functioning is also examined. Two adaptive wind turbine models have been developed and constructed, with their physical characteristics investigated. A test stand has been developed and built for integration with the ULAC-1 wind tunnel. Numerical models of adaptive wind turbines have been created, with necessary simulations conducted to verify and optimize their parameters. The proposed theory for controlling an adaptive wind turbine to maintain high efficiency across its entire operational speed range has been practically validated. Resonant frequencies of the turbine with a shaft on a digital model of the adaptive wind turbine have been studied. A method for scaling and reducing the number of tests for adaptive wind turbines is proposed.