

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ОЛЕСЯ
ГОНЧАРА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ОЛЕСЯ
ГОНЧАРА

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Рожкевич Антон Олександрович

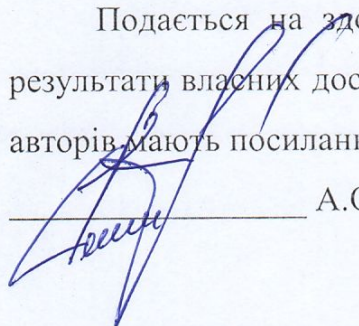
УДК 621.548.5

ДИСЕРТАЦІЯ

Розробка удосконаленого методу розрахунку вітроенергетичних агрегатів з
вертикальною віссю обертання

113 – Прикладна математика

Подається на здобуття ступеня доктора філософії. Дисертація містить
результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших
авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ А.О. Рожкевич

Науковий керівник: Гоман Олег Гаврилович, д-р. фіз.-мат. наук, професор.

Дніпро – 2023

АНОТАЦІЯ

Рожкевич А.О. Розробка удосконаленого методу розрахунку вітроенергетичних агрегатів з вертикальною віссю обертання. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика, Дніпровський національний університет ім. Олеса Гончара, Дніпро, 2023.

Дисертацію присвячено теоретичним дослідженням нового удосконаленого методу розрахунку вітроенергетичних агрегатів з вертикальною віссю обертання, а саме, роторів Дар'є, котрий ґрунтується на урахуванні змінності локального числа Рейнольдса набігаючого вітрового потоку при обтіканні елементів лопатей вітроустановки.

Сучасний світ стикається з низкою глобальних проблем, які роблять вітроенергетику невід'ємною частиною стратегії забезпечення енергетичної безпеки та стійкості.

Одна з самих великих проблем 21-го століття – це глобальна зміна клімату. Збільшення викидів парникових газів, спричинених спалюванням викопних палив, є основною причиною цієї проблеми. Енергія вітру надає можливість перейти до використання екологічно чистих джерел енергії та знизити залежність людства від викопних палив. Це зменшує викиди вуглекислого газу та інших шкідливих речовин, котрі супроводжують викопні палива сприяючи, таким чином, успіху у боротьбі зі зміною клімату.

Природні копалини палива, такі як нафта і природний газ, є обмеженими ресурсами, і їх запаси зменшуються з кожним днем. Енергія вітру, навпаки, забезпечує ресурсну стійкість і дозволяє гарантувати стабільне енергопостачання у майбутньому, попри обмеженість викопних ресурсів.

Залежність від імпорту нафти і газу створює вразливість економік багатьох країн, оскільки ціни та доступність цих ресурсів піддаються коливанням та зовнішнім факторам. Дуже гостро ця проблема відчувається в Україні. Ця залежність пов'язана переважно з імпортом природного газу, нафти та вугілля, а також електроенергії. Створення на півдні України вітроелектростанцій могло б

значно знизити залежність енергоресурсів від інших країн. У минулому Україна була сильно залежна від постачання газу з росії, проте після подій анексії Кримського півостріву та повномасштабного вторгнення росії, Україна укладає угоди про постачання газу з різними постачальниками, включаючи Європейський Союз та США.

Вітроенергетика також сприяє створенню нових робочих місць у сільських та міських районах, де будуються вітряні ферми та виробничі центри. Це сприяє економічному зростанню та зменшенню безробіття, а також створює можливості для навчання та розвитку навичок у сфері використання відновлюваної енергії.

Розвиток вітроенергетики супроводжується постійним технологічним прогресом. Завдяки інноваціям та новим технологічним дослідженням вдається підвищувати ефективність та надійність вітряних турбін, а також знижувати вартість виробництва вітрової енергії. Це робить вітроенергію більш доступною та конкурентноспроможною.

Багато урядів країн світу визнають важливість розвитку вітроенергетики та надають різні види підтримки, включаючи фінансові стимули та податкові пільги. Це допомагає прискорити зростання цієї галузі та зробити її більш привабливою для інвесторів та підприємств.

З урахуванням усіх вищезгаданих аспектів, вітроенергетика стає більш невід'ємною та актуальною частиною сучасної енергетичної системи багатьох країн. Вона не тільки сприяє екологічній стійкості, але також і сприяє зміцненню енергетичної безпеки та економічному розвитку, що робить її необхідною для майбутнього планети та людства.

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційної роботи полягає в наступному: в дводисковій одноструменевій аеродинамічній моделі течії повітря навколо вітроагрегата вперше враховано наявність траверс як елементів вітроустановки у вигляді різних класичних симетричних профілів, таких, як, наприклад, профілі NASA 0012, 0015, 0018, 0021, також враховано вплив змінності локального числа Рейнольдса обтікання елементів лопаті, котре змінюється як від положення лопаті у вітроколесі, так і від відносної швидкості

набігання вітрового потоку безпосередньо на кожний елемент лопаті в зоні окресленого об'єму у вітроколесі. Створено програмний модуль для розрахунку вітрогенератора типу Дар'є, котрий дозволяє задавати тільки глобальні геометричні параметри вітроустановки та обирати профіль із вже опрацьованих, а саме: NASA 0012, 0015, 0018, 0021, а також додати нові профілі – шляхом вносу їх аеродинамічних коефіцієнтів до вже створеної бази аеродинамічних характеристик аеродинамічних профілів NASA. Проаналізовано вплив на енергетичні характеристики ВЕУ кута установки лопатей, їх кількості, довжини хорди, тощо.

У даній дисертаційній роботі розроблено нову, удосконалену, порівняно з відомими раніше методиками розрахунку енергетичних характеристик ротору Дар'є з урахуванням залежності локальних аеродинамічних характеристик елементів лопаті від локального числа Рейнольдса, тоді як у попередній «класичній» дводисковій схемі розрахунку ВОВД не враховується той факт, що окремі елементи лопаті обтікаються кожен зі своєю відносною швидкістю набіжного потоку і тому кожен елемент лопаті має своє особисте локальне місцеве число Рейнольдса. Вітровий потік в окресленому об'ємі вже є дещо “пом'ятим”, він втрачає деяку частку своєї незбуреної швидкості за рахунок роботи по переміщенню лопатей ВЕУ і передачі їм частини своєї кінетичної енергії.

Отримані аналітичні вирази та програмні коди допомогли дослідити вплив різних геометричних параметрів на роботу моделі вітроустановки. Отримані теоретичні та аналітичні дані можуть бути взяті за основу при проведенні подальших експериментальних досліджень у галузі вітроенергетики.

Було встановлено, що варіювання кута установки лопаті можуть бути рекомендовані для підвищення ефективності роботи вітротурбіни. Запропонована методологія може бути використана для подальших досліджень, пов'язаних з проектуванням та функціонуванням вертикально-осьових вітрогенераторів.

За період навчання в аспірантурі було критично вивчено існуючі раніше підходи до розрахунку ВОВД і створено програмний модуль для розрахунку вітроустановки, який дозволяє отримати основні енергетичні параметри вітроустановки в залежності від основних глобальних геометричних параметрів вітродвигуна, швидкості незбудженого набігаючого потоку повітря для різних класичних симетричних профілів серії NASA: 0012, 0015, 0018 та 0021.

Ключові слова: вертикально-осьова вітроустановка, ротор Дар'є, дводискова імпульсна модель, лопать, число Рейнольдса, математичне моделювання, коефіцієнт швидкохідності, вітровий потік, коефіцієнт моменту, коефіцієнт потужності, аеродинамічний профіль.

ANNOTATION

Anton Rozhkevych. Development of an improved method of calculating wind energy units with a vertical axis of rotation. Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 113 Applied Mathematics, Oles Honchar Dnipro National University, 2023.

The dissertation is devoted to theoretical studies of a new and improved method of calculating wind power units with a vertical axis of rotation, namely, Darrieus rotors, which is based on taking into account the variability of the Reynolds number of the oncoming wind stream when flowing around the blade of a wind turbine.

The modern world is faced with a number of global problems that make wind energy an integral part of the strategy of ensuring energy security and sustainability.

One of the biggest problems of the 21st. century is climate change. The increase in greenhouse gas emissions caused by the burning of fossil fuels is the main cause of this problem. Wind energy provides an opportunity to transition to clean energy sources and reduce dependence on fossil fuels. This reduces emissions of carbon dioxide and other harmful substances, contributing to the fight against climate change.

Natural fossil fuels, such as oil and natural gas, are finite resources, and their reserves are dwindling every day. Wind energy, on the contrary, provides resource sustainability and allows to guarantee a stable energy supply in the future, despite the limitation of fossil resources.

Dependence on oil and gas imports creates vulnerability for many countries, as prices and availability of these resources are subject to fluctuations and external factors. This problem is most acutely felt in Ukraine. This dependence is mainly related to the import of natural gas, oil and coal, as well as electricity. The creation of wind power plants in the south of Ukraine could reduce the dependence of energy resources on other countries. In the past, Ukraine was heavily dependent on gas supplies from Russia, however, following the events of the annexation of the Crimean Peninsula and the full-scale invasion of Russia, Ukraine is entering into gas supply agreements with various suppliers, including the European Union and the United States.

Wind energy is also helping to create new jobs in rural and urban areas where wind farms and manufacturing centers are being built. This contributes to economic growth and reduced unemployment, and creates opportunities for training and skills development in the field of renewable energy.

The development of wind energy is accompanied by constant technological progress. Thanks to innovation and research, it is possible to increase the efficiency and reliability of wind turbines, as well as reduce the cost of production. This makes wind energy more affordable and competitive.

Many governments around the world recognize the importance of wind energy development and provide various types of support, including financial incentives and tax breaks. This helps to accelerate the growth of this industry and make it more attractive to investors and businesses.

Taking into account all the above-mentioned aspects, wind energy becomes a more integral and relevant part of the modern energy system. It not only contributes to environmental sustainability, but also contributes to strengthening energy security and economic development, making it necessary for the future of the planet and humanity.

The scientific novelty of the obtained results of the dissertation work: in the two-disk aerodynamic model, for the first time, the presence of a traverse as elements of a wind turbine in the form of various classic symmetrical profiles NACA 0012, 0015, 0018, 0021 is taken into account, the influence of the variability of the local Reynolds number of the flow around the blade elements is also taken into account, which changes from the position of the blade in wind wheel and the relative velocity of the wind flow directly on each element of the blade in the zone of the outlined volume in the wind wheel. A software module was created for the calculation of a Darrieus type wind generator, which allows you to set only the global geometric parameters of the wind turbine and choose a profile from the ones that have already been worked out, namely: NACA 0012, 0015, 0018, 0021, as well as add new profiles - by entering aerodynamic coefficients into already created database of aerodynamic characteristics of aerodynamic profiles. The influence of the blade installation angle, the number of

blades, their length, etc., on the energy characteristics of wind turbines has been analyzed.

In this dissertation work, a new and improved method of calculating the energy characteristics of the Darrieus rotor depending on the local Reynolds number was obtained. In the classical two-disc scheme for calculating the air flow, the fact that individual elements of the blade flow around each one with its relative velocity of the oncoming flow is not taken into account, so each element of the blade has its own local Reynolds number. The wind flow in the defined volume is already somewhat "crumpled", it loses some part of its undisturbed speed due to the work of moving the wind turbine blades and transferring part of its kinetic energy to them.

The obtained analytical expressions and program codes helped to investigate the influence of various geometric parameters on the operation of the wind turbine model. The obtained theoretical and analytical data can be taken as a basis for further experimental research in the field of wind energy.

It has been also established that a variation of the installation angle of the blades can be recommended to increase the efficiency of the turbines. The proposed methodology can be used for further research related to the design and operation of a vertical-axial wind turbine.

Key words: *vertical-axis wind turbine, Darrieus rotor, two-disk impulse model, blade, Reynolds number, mathematical simulation, speed coefficient, wind flow, torque coefficient, power coefficient, aerodynamic profile.*

Основні наукові результати дисертації опубліковано у роботах

1. Oleg Goman, Andrii Dreus, Anton Rozhkevych, Krystyna Heti. Aerodynamic improvement of Darrieus wind turbine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Sci. 897. 012001.

Scopus

DOI: 10.1088/1755-1315/897/1/012001.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/897/1/012001>

2. Oleg Goman, Andrii Dreus, Anton Rozhkevych, Krystyna Heti, Volodymyr Karpolyuk. Improving the efficiency of Darrieus rotor by controlling the aerodynamic design of blades. *Energy Reports*. 2022. Volume 8. P. 788 – 794.

Scopus, видання, віднесене до другого квартиля Q2 відповідно до класифікації SCImago Journal

<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.162>

3. Гоман О.Г., Рожкевич А.О. Аеродинамічний розрахунок вітрової турбіни Дар'є в залежності від різних типів профілів та місцевого числа Рейнольдса. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій*. 2023. В.36. С.40 – 48.

Видання категорії Б.

<https://doi.org/10.15421/4223104>

Тези наукових доповідей

1. Рожкевич А.О., Л.И. Кныш. Использование двухдисковой импульсной теории для расчёта вертикально-осевого ветрогенератора. *Матеріали XIX Міжнародної молодіжної конференції «Людина і космос»*. м. Дніпро. 2017. С.123.

2. Rozhkevych A.O., Goman O.G., Tsvetaeva O.V. The use of a double-disk impulse theory to calculate the vertical – axis wind turbine. *МАТЕРІАЛИ IX Регіональної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Сучасні науково – технічні дослідження у контексті мовного простору» (іноземними*

мовами). Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара. м.Дніпро. 23-24 квітня 2020 року. С.55–57.

3. Oleg Goman, Andrii Dreus, Anton Rozhkevych, Krystyna Heti. Aerodynamic improvement of Darrieus wind turbine. *4th International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering 27-30 August 2021, Florence, Italy (Virtual). Aerodynamic improvement of Darrieus wind turbine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Sci. 897. 012001.

4. Рожкевич А.О. Моделювання аеродинаміки ротора Дар'є. *VIII Міжнар. конф. «Комп'ютерна гідромеханіка»*. Інститут гідромеханіки Національної академії наук. м. Київ, 27-28 вересня 2022. С.66–68.

Статті у наукових виданнях України, що додатково відображають результати дисертації

1. Рожкевич А. О., О.Г. Гоман, Л.І. Книш. Оцінка впливу кількості лопатей на енергетичні показники вітроагрегату з вертикальною віссю обертут. *Вісн. Дніпр. ун-ту. Сер.: Механіка. Вип. 26. т.5*. 2018. С. 16 – 24.

2. Гоман О.Г., Рожкевич А.О., К.В. Геті. Розрахунок ротору Дар'є в залежності від змінного числа Рейнольдса. *Вісн. Дніпр. ун-ту. Сер.: Механіка.2020. Вип. 24.С. 69–79*.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ.....	13
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНОЇ ІНФОРМАЦІЇ	21
1.1. Короткий нарис історії розвитку вітроенергетики	21
1.2. Актуальність використання вітроенергетики в Україні	23
1.3. Переваги та недоліки вітроустановок	24
1.4. Головні параметри вітряного двигуна	26
1.5. Аналіз існуючих математичних моделей для розрахунку ВЕУ	30
1.6. Висновки до розділу 1	33
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ВЕУ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ	34
2.1. Загальна характеристика математичної моделі	34
2.2. Геометричні та кінематичні параметри елементів лопаті	35
2.3. Геометричні та кінематичні параметри елементів траверс	43
2.4. Вирази для аеродинамічних сил, що діють на елементи лопатей	47
2.5. Вирази для аеродинамічних сил, що діють на елементи траверс	51
2.6. Система рівнянь зв'язку швидкостей у навітряній та підвітряній частинах окресленого об'єму вітроустановки.....	53
2.7. Знаходження коефіцієнта моменту та коефіцієнта потужності	59
2.8. Методика розрахунку енергетичних характеристик вітроустановки з урахуванням залежності аеродинамічних характеристик елементів профілів лопатів від місцевого числа Рейнольдса.....	61
2.9. Методика розрахунку енергетичних характеристик ВЕУ за однодисковою теорією.....	64
2.10. Висновки до розділу 2	66
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІТРОУСТАНОВКИ З УРАХУВАННЯМ ЗАЛЕЖНОСТІ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФІЛІВ ЛОПАТЕЙ ВІД ЛОКАЛЬНОГО ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА	68
3.1. Аналіз обраних профілів для розрахунку.....	68

3.2. Розрахунок енергетичних характеристик вітроустановки в залежності від основних геометричних параметрів вітродвигуна	69
3.3. Висновки до розділу 3	106
ВИСНОВКИ.....	108
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	111
ДОДАТОК 1.....	120
ДОДАТОК 2.....	131
ДОДАТОК 4.....	137

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

ВЕУ – вітроенергетична установка;

ВД – вітряний двигун;

ГОВД – горизонтально - осьовий вітряний двигун;

ВОВД – вертикально - осьовий вітряний двигун;

P – величина потужності, що відбирається з вітрового потоку ідеальним вітроколесом;

c_p – коефіцієнт потужності ВЕУ;

c_m – коефіцієнт моменту на валу ВЕУ;

λ – коефіцієнт швидкості;

M – момент на валу;

ρ – густина повітря вітрового потоку;

V_0 – швидкість вітру набігаючого потоку;

V_1 – швидкість вітру у навітряній частині вітроколеса;

V_2 – швидкість вітру у підвітряній частині вітроколеса;

W – відносна швидкість набіжного потоку повітря на елемент лопаті в положенні, що характеризується азимутальним кутом β ;

U – відносна швидкість набіжного потоку повітря на траверсу в положенні, що характеризується азимутальним кутом β ;

α – місцевий кут атаки елемента лопаті;

α_0 – кут установки лопаті;

α' – місцевий кут атаки елемента траверси;

β – азимутальний кут, який характеризує положення лопаті у вітроколесі;

δ – кут установки траверси до горизонтальної площини;

F – характерна площа поперечного перерізу потоку струменю повітря;

R – радіус кола обертання лопаті середньої точки профілю;

H – висота ВЕУ;

ω – кутова швидкість обертання установки;

l – довжина хорди лопаті;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря;

b – довжина хорди профілю траверс;

Re – число Рейнольдса;

dD – сила опору, що діє на елемент лопаті (чи траверси) і спрямована уздовж напрямку відносної швидкості набігаючого потоку вітру на елемент лопаті (чи траверси);

dL – підйомна сила, яка спрямована перпендикулярно до вектора відносної швидкості набігаючого потоку вітру і діє на елемент лопаті (чи траверси).

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Ротор Дар'є є інноваційним рішенням в галузі вітроенергетики, яке стає все більш актуальним і привабливим для застосування. Установка такого типу не залежить від напрямку вітру, що робить її особливо придатною для місць з можливими різними напрямками вітру. Крім того, ротор Дар'є може працювати при порівняно низькій швидкості вітру, що розширює сферу його застосування. Використання ротору такого типу є важливим напрямком у сфері вітроенергетики, який стає все більш актуальним у сучасному світі, де скорочення викидів парникових газів та збільшення частки відновлюваних джерел енергії у загальному балансі енергії стають невід'ємними компонентами сталого розвитку. Здатність цього типу ВЕУ працювати в різних умовах і компактний дизайн роблять його привабливим варіантом для вітряних електростанцій.

Темою дослідження даної роботи є урахування впливу змінності локального числа Рейнольдса у розрахунках вітродвигунів даного типу за допомогою дводискової імпульсної теорії. Найбільш точним і в той же час найскладнішим варіантом розрахунку характеристик такого ВОВД є чисельний розв'язок нестационарних рівнянь Нав'є – Стокса. Метод, запропонований автором у даній роботі, дозволяє для розрахунку не задавати конкретні числа Рейнольдса, а отримувати їх значення в залежності від швидкості набіжного потоку вітру, кутової швидкості обертання ВЕУ та азимутального кута β положення елемента лопаті, а разом з тим використовувати для розрахунку відповідні значення аеродинамічних коефіцієнтів в залежності від місцевого кута атаки та місцевого числа Рейнольдса. Для більш детального ознайомлення з методиками розрахунку характеристик такого ротору можна звернутися до відповідних джерел [10, 11, 51, 52, 68].

Актуальність проблеми полягає у тому, що даний тип ротору зручно використовувати в автономних системах енергозабезпечення, що на даний час, в умовах дефіциту електроенергії в Україні та її залежності від імпорту енергоносіїв, є дуже важливим.

Мета дисертаційного дослідження є вдосконалення вже існуючого методу розрахунку – дводискової імпульсної теорії за допомогою урахування змінності числа Рейнольдса.

Завдання дисертаційного дослідження:

1. Виконати короткий огляд аналітичної інформації щодо історії походження та подальшого розвитку галузі вітроенергетики, сформулювати переваги ротора Дар'є перед іншими типами вітрових турбін, надати основні параметри вітряного двигуна, проаналізувати ряд існуючих математичних моделей для розрахунку вертикально – осьового вітродвигуна.
2. Сформулювати геометричні та кінематичні параметри елементів вітронергетичної установки – лопатей та траверс, отримати систему рівнянь зв'язку швидкостей у навітряній та підвітряній частинах окресленого об'єму вітроколеса за дводисковою імпульсною теорією з урахуванням змінності числа Рейнольдса.
3. Провести розрахунок енергетичних характеристик вітродвигуна з урахуванням змінності локального числа Рейнольдса в діапазоні $Re = 10^4 \div 5 \cdot 10^6$ в залежності від використання різних класичних профілів НАСА : 0012, 0015, 0018 та 0021.
4. Провести розрахунок вітродвигуна при різних геометричних параметрах вітроустановки, при цьому врахувати можливий кут установки лопаті.

Об'єкт дослідження: енергетичні характеристики вертикально – осьової вітроустановки типу Дар'є.

Предмет дослідження: вплив змінності локального числа Рейнольдса при обтіканні елементів лопаті в розрахунках основних енергетичних характеристик ротору типу Дар'є.

Методи дослідження: удосконалена дводискова імпульсна теорія з урахуванням змінності локального числа Рейнольдса обтікання лопатів.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. В дводисковій аеродинамічній моделі вперше врахована наявність траверси як елемент вітроустановки у вигляді різних класичних симетричних профілів.
2. Враховано вплив змінності локального числа Рейнольдса обтікання елементів лопаті, котре змінюється від положення лопаті у вітроколесі та відносної швидкості набігання вітрового потоку безпосередньо на кожний елемент лопаті в зоні окресленого об'єму у вітроколесі.
3. Створено програмний модуль для розрахунку вітрогенератора типу Дар'є, котрий дозволяє задавати тільки глобальні геометричні параметри вітроустановки та обирати профіль із вже опрацьованих, а саме: NASA 0012, 0015, 0018, 0021, а також дозволяє додавати нові профілі – шляхом вносу аеродинамічних коефіцієнтів у вже створену базу аеродинамічних характеристик аеродинамічних профілів.
4. Проаналізовано вплив на енергетичні характеристики ВЕУ кута установки лопаті, кількості лопатей, довжини хорди профілю лопаті, тощо.

Практичне значення отриманих результатів. У даній дисертаційній роботі отримано удосконалену методику розрахунку енергетичних характеристик ротору Дар'є з врахуванням залежності аеродинамічних характеристик елементів лопатей від локального числа Рейнольдса. Отримані аналітичні вирази та програмні коди допомогли дослідити вплив різних геометричних параметрів на роботу вітроустановки. Отримані теоретичні та аналітичні дані можуть бути взяті за основу при проведенні подальших експериментальних досліджень у галузі вітроенергетики.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертації отримані автором самостійно. В спільних публікаціях дисертаційної роботи включені наступні теоретичні, аналітичні та графічні результати, отримані

автором: постановки задач, чисельні методи їх розв'язання, результати їх реалізації на комп'ютері.

Результати дисертаційного дослідження представлено та обговорено в різний час на таких наукових конференціях і семінарах: Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос» м. Дніпро, 2017 р.; «Сучасні науково-технічні дослідження у контексті мовного простору» (іноземними мовами). м.Дніпро. 23-24 квітня 2020 р.; 4th International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering 27-30 August 2021, Florence, Italy (Virtual); VIII Міжнар. конф. «Комп'ютерна гідромеханіка» м. Київ, 27-28 вересня 2022.; The 5th International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering (REEE 2022), 24–26 August, 2022, Brest, France; VIII Міжнар. конф. «Комп'ютерна гідромеханіка» м. Київ, 27-28 вересня 2022.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 9 друкованих працях, із яких 1 стаття в наукових фахових виданнях України категорії «Б» з фізико-математичних наук [51], 2 статті у фахових виданнях України [52, 68], 2 статті в іноземних журналах, які індексуються в базі даних Scopus [10, 11], (1 з них в журналі, віднесеному до другого квартилю відповідно до класифікації SCImago Journal на момент опублікування). Додаткові результати опубліковано в 4 збірках матеріалів конференцій у формі тез доповідей [13, 19, 69, 70].

Структура роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, трьох розділів, висновку й списку літератури, який містить 81 найменування. Також робота містить 4 додатки. Загальний обсяг дисертації – 158 сторінок, 77 рисунків.

Основний зміст роботи:

У **першому розділі** дисертаційної роботи виконано короткий огляд аналітичної інформації щодо історії походження та подальшого розвитку галузі вітроенергетики, сформовано переваги ротора Дар'є перед іншими типами вітрових турбін, надані основні параметри вітряного двигуна, проаналізовано ряд існуючих математичних моделей для розрахунку вертикально – осьового

вітродвигуна та отримано, що основною перевагою імпульсних методів над методами чисельного інтегрування є відносна простота порівняно з використанням чисельних методів розв'язку диференціальних рівнянь Нав'є – Стокса.

У другому розділі дисертаційної роботи подано геометричні та кінематичні параметри елементів вітронергетичної установки, а саме: лопаті та траверси, отримано систему рівнянь зв'язку швидкостей у навітряній та підвітряній частинах окресленого об'єму вітроколеса за дводисковою імпульсною теорією з урахуванням змінності числа Рейнольдса в залежності від положення лопаті та швидкості набігаючого потоку вітру. В математичному плані реалізація дводислової імпульсної теорії зводиться до наступного алгоритму: сили, що діють на лопаті та траверси з урахуванням змінності локального числа Рейнольдса, з одного боку, виражаються через аеродинамічні коефіцієнти профілів лопаті та траверс; з іншого боку – ці ж самі сили виражаються за допомогою загальної теореми імпульсів. При цьому рівняння для навітряної частини вдається розв'язати незалежно від рівняння для підвітряної частини, а це останнє рівняння залежить від розв'язку рівняння для навітряної частини.

У третьому розділі представлено розрахунок енергетичних характеристик вітродвигуна з урахуванням змінності локального числа Рейнольдса в діапазоні $Re = 10^4 \div 5 \cdot 10^6$ в залежності від використання різних класичних профілів NASA : 0012, 0015, 0018 та 0021. Надано розрахунки вітродвигуна при різних геометричних параметрах вітроустановки, при цьому враховано можливий кут установки лопаті. Результати розрахунків показали, що передня кромка профілю має бути відхилена всередину вітроколеса, так, наприклад, при швидкості набігаючого потоку вітру $V_0 = 7$ м/с, оптимальний діапазон зміни кута установки лопаті повинен знаходитися в межах, $3^\circ \leq \alpha_0 \leq 5^\circ$, при інших кутах установки коефіцієнт потужності зменшується. При цьому коефіцієнт потужності вітроустановки при деяких геометричних параметрах

вітрогенератора може збільшуватися в залежності від кута установки лопаті. Таким чином отримано, що кут установки лопаті є перспективним інструментом для управління продуктивністю вітроустановки з вертикальною віссю обертів.

У **висновках** сформульовано основні теоретичні результати дослідження проблеми врахування змінного числа Рейнольдса для розрахунків енергетичних характеристик вертикально-осьових вітрогенераторів вказаного типу, проаналізовано вплив кута установки лопаті, геометрії вітрогенератора, визначено діапазони їх зміни, що можуть мати практичний інтерес. У подальшому, результати роботи можна порівнювати з експериментальними даними різних лабораторій світу, вдосконалювати їх, тощо.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

1.1. Короткий нарис історії розвитку вітроенергетики

Люди використовують енергію вітру протягом багатьох тисяч років. Перш за все людина навчилася робити вітрильні човни, що рухалися за рахунок енергії вітру в Стародавньому Єгипті. У стародавній Персії вітряки широко застосовувалися для переробки зерна. Після арабських завойовницьких походів ця технологія поширилася по всьому ісламському світу і навіть дійшла до Китаю [1].

У Середньовічній Європі вітряки почали будуватися після завершення хрестоносцями Хрестових походів та їх повернення із Середньої Азії. В X ст. в багатьох містах Європи було побудовано вітряки з використанням гідродвигунів. Особливо це було розповсюджено в Нідерландах. Так, наприклад, в середині XIX ст. в Нідерландах були розповсюджені вітряки по всій країні і використовувались для різних цілей(близько 9 тис. вітродвигунів).

Безпосередньо, вперше вітряну турбіну почали використовувати для виробництва електрики у 1887 р. Сталося це у Шотландії. Висота турбіни була 10 метрів, і створив її професор Джеймс Бліт. Турбіна використовувалася для забезпечення будинку професора світлом. Це був перший у світі будинок, який використав електрику від енергії вітру.

На початку XX ст. першість у побудові вітроустановок перехопила Данія. В 1890 р. була побудована перша вітрова електростанція, а до 1908 р. таких електростанцій налічувалось 72, кожна з яких мала потужність від 5 до 25 кВт.

У 1927 р. Джо Джейкобс та Марселлус Джейкобс відкрили фабрику «Jacobs Wind» у штаті Міннесота, США. Фабрика виробляла вітрогенератори для використання на фермерських господарствах. У той час ферми в США часто не мали доступу до електромереж, особливо віддалених від великих та середніх міст. Найчастіше турбіни використовувалися для заряджання акумуляторів та освітлення.

Один із з перших у Радянському Союзі горизонтально – осьових вітрогенераторів було побудовано в Ялті у 1931 р. Ця установка мала потужність

100 кВт та висоту башні 32 метри. Надалі у Радянському Союзі було кілька спроб використання енергії вітру, проте це було економічно недоцільно. На той час нафта була відносно дешевою, так що більше уваги приділялось будівництву ТЕЦ, ГЕС, АЕС, тощо.

Після Другої світової війни найбільший розвиток галузі спостерігався у США, адже на 1957 р. компанія Jacobs Wind виробила і продала близько 30 000 турбін, включаючи покупців з Африки та Антарктики. У 1975 р. Американське космічне агентство NASA запускає програму по вітроенергетиці. Ця дослідницька програма стала першовідкривачем вітроенергетичних технологій. В першу чергу було досліджено такі аспекти: найбільш прийнятний матеріал для башт вітроустановки, лопаті з композитних матеріалів, інженерні рішення щодо виду лопатей вітрогенератору, тощо. Також у цьому ж році у США було запущено перший вітропарк, який забезпечував електроенергію для 4 000 домів. А вже в 1990 р. таких вітропарків налічувалось 46 шт., які виробляли електроенергію, якої було б достатньо для 300 000 осель, в 2010 р. – 581 вітропарк, який був розрахований на 10 000 000 осель.

У 80-х – 90-х роках у розвитку вітроенергетики не відставали від США і Європейські держави. Так, у 1991 р. Данія та Велика Британія вводять в експлуатацію прибережні вітропарки. У цих роках також відбувається будівництво вітроелектростанцій у низці держав: Німеччині, Іспанії, Бельгії, Швеції, Нідерландах, Індії, Японії, Канаді, Китаї, тощо.

Темпи розвитку галузі були бурхливими; так, наприклад, у 1990 р. загальна встановлена потужність вітрогенераторів була близько 2 тис. МВт., у 2000р. – 18,5 тис. МВт., в 2010р. – 80 тис. МВт.

У 2010-х рр. потужності вітроенергетики забезпечували майже 10% від всього виробництва електроенергії у Європейському Союзі. Найбільше вітрогенерація забезпечила 43% споживання електроенергії у Данії, у Португалії – 26%, Ірландії – 23%, тощо.

Україна поки що суттєво відстає щодо розвитку вітроенергетики від країн Європейського Союзу. Якщо судити по піковим потужностям

вітроелектростанцій України, то розвиток вражає: якщо у 2010 р. вона становила 87 МВт, то у 2020р. – 1314 МВт. Для порівняння, у Великій Британії загальна потужність вітроенергетики перевищує 13 ГВт, тобто приблизно у 13 раз більше. У 2020-х рр. темпи розвитку дещо знизились, зокрема, це пов'язано з повномасштабним вторгненням Росії з лютого 2022 р. на територію України, так наприклад, у лютому 2022 р. норвезька компанія «Emergy» оголосила про відтермінування будівництва ВЕС "Зофія" у Запорізькій області, яка мала стати однією з найбільших наземних вітрових електростанцій в Європі. Близько 225,8 МВт потужностей вітрової енергетики, станом на січень 2023р., перебувають на окупованих Росією територіях.

1.2. Актуальність використання вітроенергетики в Україні

Вітроенергетика є на сьогоднішній день однією із найважливіших галузей добування енергії у світі. Найбільш розвинені країни світу намагаються використовувати ресурси раціонально, що є пріоритетним напрямом у галузі енергетики. Про це свідчить той факт, що щорічний приріст встановлених у всьому світі ВЕУ досягає близько 20%.

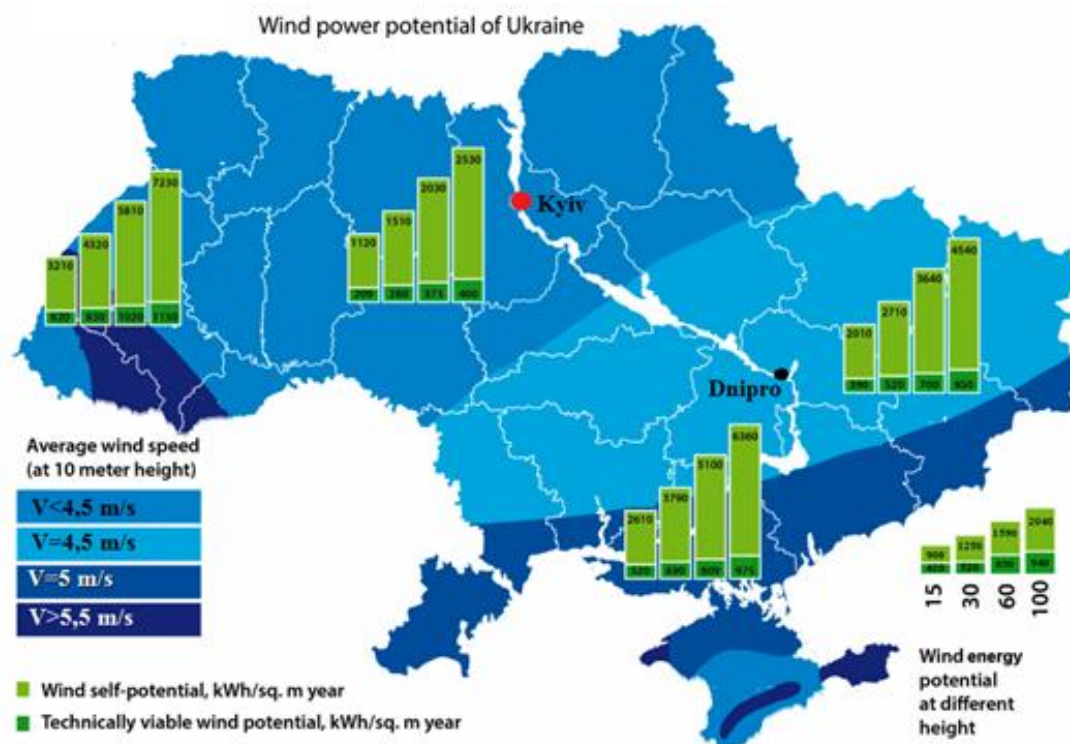


Рис. 1-1 – Вітровий потенціал України [37]

Середньорічна швидкість вітру у приземному шарі на території України досить низька – 4.3 м/с. Багато типів агрегатів починають виробляти промисловий струм, починаючи зі швидкості вітру від 5 м/с. Якщо враховувати, що вітроагрегати можуть використовувати енергію вітру до висоти 50 м, (як відомо, з ростом висоти від поверхні землі швидкість вітру зростає), то енергетичний потенціал на території України становить 330 млрд. кВт і перевищує встановлену потужність електростанцій України в 6 тисяч разів.

Енергія вітру розподілена територією України вкрай нерівномірно, причому вітропотенціал на півдні країни значно вищий, ніж на півночі. Найбільш придатними областями для вітроенергетики в Україні є Прикарпаття (Закарпатська, Івано – Франківська, Львівська області), південні області України (Херсонська, Запорізька, Миколаївська, Донецька та Одеська області) та АР Крим [29, 30, 34, 37, 38].

1.3. Переваги та недоліки вітроустановок

Енергія вітру в останні роки стає все більш популярним джерелом відновлюваної енергії, і ця технологія має ряд переваг і недоліків. Переваги вітроенергетики:

- чиста та відновлювана: енергія вітру є чистим та відновлюваним джерелом енергії. На відміну від викопного палива, енергія вітру не створює викидів парникових газів, які сприяють зміні клімату;
- низькі експлуатаційні витрати: після встановлення вітрові турбіни мають низькі експлуатаційні витрати, що робить їх економічно ефективним варіантом для виробництва електроенергії;
- зменшує залежність від викопного палива. Енергія вітру може допомогти зменшити залежність від викопного палива, яке є обмеженим і невідновлюваним джерелом енергії;
- створює робочі місця: галузь вітроенергетики створює робочі місця у виробництві, монтажі та обслуговуванні вітрових турбін.

Хоча загалом вітрова енергія має ряд переваг як чисте, відновлюване та економічно ефективне джерело енергії, однак, ця галузь також має деякі недоліки, такі як переривчастість вітру, шумове забруднення та потенційний вплив на дику природу.

Недоліки вітроенергетики є такими:

- поривчастість: у деяких регіонах енергія вітру є періодичним джерелом енергії, оскільки до формування вітрів призводять короточасні процеси, що, на відміну від переважаючих вітрів, не є регулярними, а відбуваються хаотично, часто протягом певного сезону;
- шумове забруднення: вітрові турбіни можуть створювати шум, який може викликати занепокоєння у людей, які живуть поблизу вітряних електростанцій;
- негативний вплив на дику природу: вітрові турбіни можуть становити загрозу для дикої природи, зокрема для птахів і кажанів, які можуть стикатися з лопатями турбін.

Ротор Дар'є, який досліджується у цій роботі при урахуванні змінності локального числа Рейнольдса обтікання елементів лопаті, – це тип вітрової турбіни з вертикальною віссю, що має унікальну конструкцію порівняно з іншими типу ВЕУ та має ряд переваг при виробництві енергії вітру. Ось деякі з переваг власне ротора Дар'є:

- висока ефективність: ротор Дар'є має високу ефективність порівняно з іншими типами вітрових турбін. Конструкція лопаті дозволяє йому виробляти електроенергію при низькій швидкості вітру, що робить його придатним для використання в районах із низькою швидкістю вітру.
- низький рівень шуму: ротор Дар'є створює значно менше шуму, ніж вітрові турбіни з горизонтальною віссю, що робить його придатним для використання у міських районах, де шумове забруднення є проблемою.
- самозапуск: ротор Дар'є запускається самостійно, тобто для його запуску не потрібне додаткове (зовнішнє) джерело живлення. Це робить його більш надійним і більш економічно ефективним варіантом для виробництва енергії

вітру. Проте, при недостатній швидкості вітрового потоку для самозапуску, вищевказаний ротор доводиться комбінувати з ротором Савоніуса.

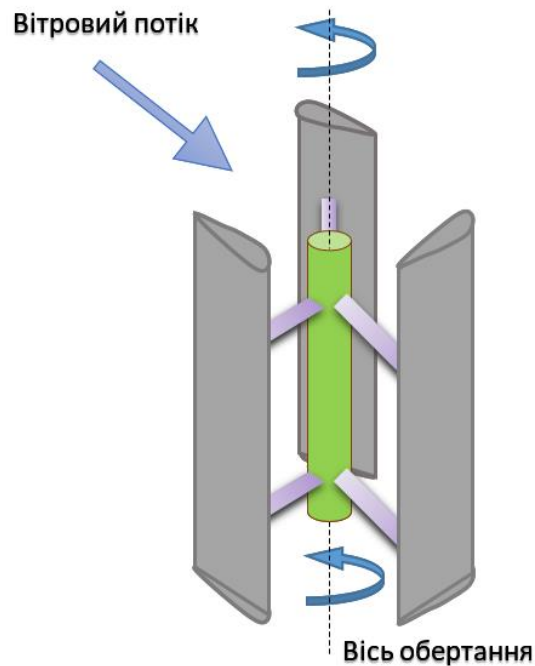


Рис. 1-2 – Схема ротору Дар'є [3]

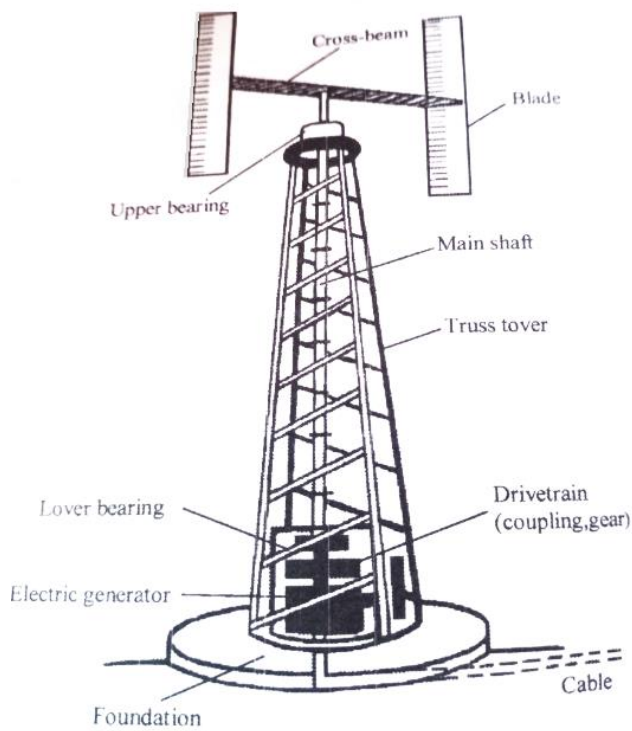
- низький рівень обслуговування: ротор Дар'є має менше рухомих частин, ніж вітряні турбіни з горизонтальною віссю, що робить його менш схильним до зносу. Це призводить до зниження витрат на технічне обслуговування та збільшення терміну служби.

Отже, ротор Дар'є має ряд переваг перед іншими типами вітрових турбін, включаючи високу ефективність, низький рівень шуму, самозапуск, низькі витрати на обслуговування та, на думку автора, естетично привабливий дизайн.

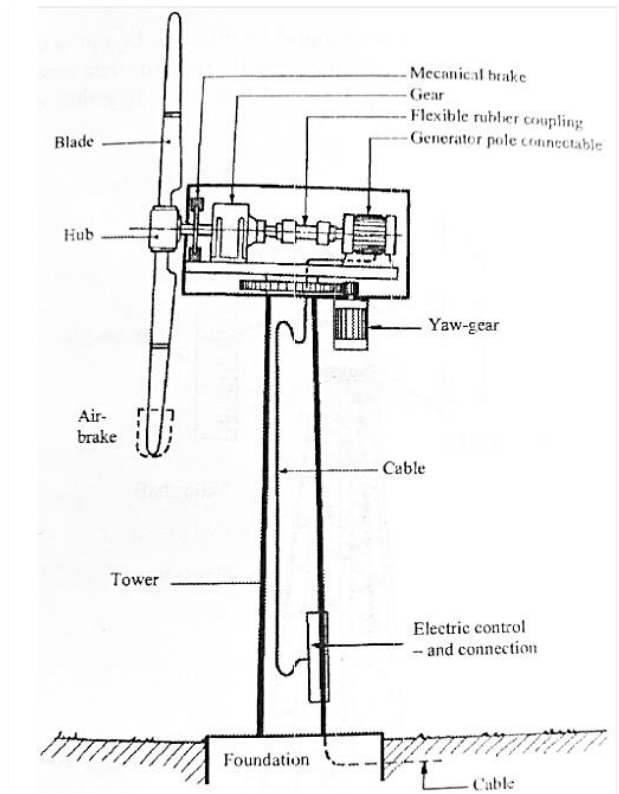
1.4. Головні параметри вітряного двигуна

Вітряний двигун - це пристрій, що призначений для перетворення частки природної кінетичної енергії вітру в корисну механічну, теплову або електричну енергію. Вітроенергетичні установки діляться загалом на дві основні категорії: вітродвигуни з горизонтальною віссю обертання (ГОВД) та вітродвигуни з вертикальною віссю обертання (ВОВД).

Основними елементами ВОВД є: ротор, що має декілька лопатей, закріплених на траверсах, головний вертикальний вал, що опирається на підшипник, механічна система (мультиплікатор, муфта, елементи механічного гальмування), електрогенератор, опорна вежа, електрокабелі та інші конструктивні елементи.



a)



б)

Рис. 1-3 – Схематичне зображення ВЕУ: а) ВОВД, б) ГОВД [1]

Основними елементами ГОВД є: ротор, що має декілька лопатей, механічна система (мультиплікатор, муфта, елементи механічного гальмування, вал), електрогенератор, гондола, механізм повороту головки вітряного двигуна проти вітру, опорна вежа, система управління ВД, електрокабелі та інші конструктивні елементи [1].

Головним вихідним параметром ВД є потужність P , яка зазвичай вимірюється у ватах і залежить безпосередньо від потужності P_0 самого набігаючого потоку.

ВД сприймає лише певну частину P_0 :

$$P = P_0 \cdot c_p, \quad (1.1)$$

де c_p – коефіцієнт потужності вітроагрегата.

Аеродинамічний розрахунок вітроенергетичної установки насамперед призначається для визначення двох її найважливіших енергетичних характеристик:

- коефіцієнта потужності (коефіцієнта використання енергії) :

$$c_p = \frac{2P}{\rho V_0^3 F}, \quad (1.2)$$

- коефіцієнта обертального моменту на валу:

$$c_m = \frac{2M}{\rho V_0^2 F R}. \quad (1.3)$$

Величина $P_0 = \frac{1}{2} \rho V_0^3 F$ виражає собою повний запас потужності, яку несе вільний струмінь у розрахунку на площу F , також це величина кінетичної енергії вітрового потоку, що переноситься через живий переріз F за 1 с.

Безрозмірні коефіцієнти потужності c_p та c_m при вибраному певному профілю лопаті і заданому куту установки лопаті є функціями ще одного не менш важливого безрозмірного параметра – так званого коефіцієнта швидкохідності:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_0}. \quad (1.4)$$

Параметр λ також називають числом модулів. Для ГОВД величина ωR являє собою окружну лінійну швидкість на кінці лопаті, а для ВОВД це буде окружна швидкість на лопаті в точці, яка віддалена від осі обертання на відстані R . Номінальний параметр λ реалізується при максимальних значеннях c_p та c_m . Для ГОВД діапазон значень λ знаходиться в межах $\lambda \approx 6 \dots 7$, для ВОВД – у межах $\lambda \approx 2.5 \dots 4$.

Коефіцієнти потужності та момента залежать не тільки від характерного числа λ , але ще й від масштабного ефекту, що проявляється в їх залежності від числа Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{V_0 l}{\nu}, \quad (1.5)$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості вітрового потоку, котрий залежить від температури повітря.

Потужність, що розвивається вітроколесом і момент на валу, пов'язані між собою залежністю:

$$P = M\omega. \quad (1.6)$$

Використовуючи формули (1.2) і (1.3), отримуємо наступний зв'язок між коефіцієнтами c_p та c_m :

$$c_p = c_m \cdot \lambda. \quad (1.7)$$

Крім коефіцієнта потужності c_p і коефіцієнта момента c_m , аеродинамічний розрахунок має за мету знаходження сили опору X (тобто, сили, спрямованої уздовж напрямку швидкості вітру) та бокової сили Y (сили, спрямованої перпендикулярно до швидкості вітру), що діють на систему ВЕУ, що обертається. Ці сили передаються на конструкцію і знання їх величин необхідно для правильного розрахунку опорної вежі на міцність. Аеродинамічні сили X та Y зазвичай представляються у вигляді:

$$X = c_x \cdot \rho \frac{V_0^2}{2} \cdot F, \quad Y = c_y \cdot \rho \frac{V_0^2}{2} \cdot F, \quad (1.8)$$

і знаходяться залежності коефіцієнта сили опору C_x та коефіцієнта бокової сили C_y від параметра λ (а також від інших геометричних параметрів, таких як: кут установки лопаті, число Рейнольдса обтікання лопаті, тощо). Аеродинамічний розрахунок ВЕУ є основою для установлення залежності її паспортної потужності P від швидкості вітру та числа обертів. Слід зазначити, що в даний час не існує єдиної універсальної методики аеродинамічного розрахунку енергетичних характеристик ВЕУ. Усі відомі методики в тій чи іншій мірі є

наближеними, і розраховані з їх допомогою залежності c_p та c_m є також наближеними. Вони допускають уточнення за рахунок застосування більш точних і більш досконалих способів розрахунку [1].

1.5. Аналіз існуючих математичних моделей для розрахунку ВЕУ

Перша загальна теорія вітряної турбіни ГОВД була створена А. Бетцом у 1926 р. Відповідно до закону Бетца, незалежно від конструкції вітряної турбіни лише 16/27 (або 59%) кінетичної енергії вітру можна перетворити на механічну енергію. Книга Бетца «Енергія вітру та її використання вітряками» [33], опублікована у 1926 році, дає добре уявлення про вітроенергетику та вітрові турбіни того часу. Проте, основи імпульсної теорії, а саме, підхід з використанням понять «активного» диску сягає праць М. Є. Жуковського та Г. Глауерта [45, 46].

Пізніше ці теорії та ідеї були використані Г. Х. Сабініним [71, 72, 73]. Теорія Г. Х. Сабініна базується на застосуванні вихрової теорії обтікання круглої пластинки, яка розташована перпендикулярно до потоку – явища, що відбувається при роботі ідеального вітродвигуна. Відповідно до вихрової теорії М. Є. Жуковського, границю струменя за вітроколесом при його обертанні можна представити у вигляді нескінченно тонкого вихорового шару, утвореного вихровими шнурами, що безперервно збігають з кінців лопатей. У цьому випадку деформація потоку буде зводиться до накладання швидкостей на рівномірний потік. Осьова сила, що діє на вітроколесо, дорівнює величині зміни імпульсу, викликаного циліндричною частиною соленоїда, який, у свою чергу, сформувався за одиницю часу. Огляд цих підходів у застосуванні до вітроенергетики було дано у роботах [1, 22 – 28, 65, 66] та інших [2, 3, 5–9].

Повні процедури аеродинамічного розрахунку ГОВД були розроблені у роботах [20, 22, 55, 71, 77]. Оригінальний інженерний підхід безпосередньо до проектування ГОВД було дано в роботі [31].

Найпростіший підхід до розрахунку ВОВД вперше було застосовано Темплінім [32] у 1974 р. Підхід базувався на використанні однієї трубки

струменю зі сталою індукованою швидкістю, що, в свою чергу, дозволяло отримати замкнену систему рівнянь.

Модель активного диску в застосуванні до ВОВД є узагальненням та розвитком моделі, яка раніше застосовувалась до розрахунку моделі ГОВД. Подальший розвиток імпульсних моделей для ВОВД полягав у використанні дводискової моделі та багатотрубчатої струменевої моделі. Проектні підходи до розробки методу розрахунку ВОВД були здійснені в багатьох роботах; для більш детального ознайомлення з методами розрахунку енергетичних характеристик ВОВД можна звернутися до наступних публікацій [21, 35, 36, 39 – 44, 47 – 49, 52 – 54, 56 – 58, 61 – 63, 70, 74–76, 78, 80, 81].

В даний час відомо ряд методів аеродинамічного розрахунку ВОВД, котрі в порядку зростання складності та точності можна розділити на дві групи. До першої групи належать різні варіанти імпульсних дискових теорій, успадковані від теорії вітроколеса пропелерного типу.

До другої групи методів належать методи чисельного інтегрування рівнянь руху газу у різних постановках. Зокрема, одним із найвідоміших методів із цієї групи є метод дискретних вихорів, а самим складним є розрахунок за допомогою рівнянь Нав'є - Стокса. Спроби отримати прийнятні чисельні розв'язки рівнянь Ейлера та Нав'є – Стокса показано у працях [1, 4, 17, 41, 64, 65, 66].

В імпульсних теоріях розрахунок базується на співвідношеннях, що зв'язують втрату імпульсу потоку, що пройшов через окреслену площу вітроколеса з середньою за часом сумарною аеродинамічною силою, що діє на лопаті і визначається через аеродинамічні коефіцієнти. При цьому імпульсні теорії, у свою чергу поділяються на одно- та дводискові, причому, і ті й інші можуть використовувати однотрубчатую або багатотрубчатую модель потоку.

Перевагою імпульсного методу є їхня відносна простота, достатньо добра швидкість розрахунку на комп'ютері, порівняно с другою групою методів розрахунку, та прийнятна точність визначення енергетичних характеристик вітроустановки. До недоліків цих методів слід віднести неможливість урахування прямого взаємного впливу лопатей на їхні власні аеродинамічні

характеристики (хоча опосередкований вплив на енергетичні характеристики враховується).

До переваг другої групи методів можна віднести реальніше моделювання з їх допомогою газодинамічних процесів, що дозволяє враховувати взаємний вплив лопатей і визначати миттєві розподілені та сумарні навантаження на лопаті, а також середні енергетичні характеристики вітроустановки у цілому. Однак складність програмного забезпечення чисельних методів – це надзвичайно великі витрати машинного часу, а саме: проектування, внесення початкових параметрів розрахунку, вибір моделі турбулентності, тощо, а також велика вартість ліцензійних комп'ютерних пакетів, вже готових для використання, досі не дозволяють користуватися цими методами як повсякденним інструментом при проектних розробках.

Удосконалений підхід до розрахунку моделі типу Дар'є, представлений у цій дисертаційній роботі, є логічним продовженням наукових праць І. Парашив'ю (Ion Paraschivoiu) [13–16].

Удосконалений метод розрахунку, заснований на дводисковій імпульсній теорії з урахуванням змінності локального для кожного елементу лопаті числа Рейнольдса в залежності від коефіцієнта кінематичної в'язкості набіжного потоку, місцевої відносної набіжної швидкості потоку та обертальної швидкості ВЕУ. Число Рейнольдса, в свою чергу, розраховується в залежності від положення азимутального кута та величини локальної відносної швидкості, тоді як у вже ставших «класичних розрахунках» число Рейнольдса мало стало значення. В цій роботі також враховувалось виникнення бічної складової швидкості вітрового потоку після проходження ним окресленої площини і враховано наявність траверс.

1.6. Висновки до розділу 1

Основні результати до першого розділу можна сформулювати таким чином:

- 1) викладено переваги і недоліки використання галузі вітроенергетики в Україні, проведено аналіз найбільш прийнятних областей країни для розміщення вітроустановок, а саме це Прикарпаття, південні області України та АР Крим;
- 2) сформовано переваги ротора Дар'є перед іншими типами вітрових турбін, а саме: висока ефективність, низький рівень шуму, самозапуск, низькі витрати на обслуговування;
- 3) сформовано основні параметри вітряного двигуна, аеродинамічний розрахунок вітроенергетичної установки насамперед призначається для визначення двох її найважливіших енергетичних характеристик: коефіцієнта потужності та коефіцієнта обертального моменту на валу;
- 4) коротко проаналізовано низку існуючих математичних моделей для розрахунку ВОВД, та отримано, що основною перевагою імпульсних методів над методами чисельного інтегрування є відносна простота, порівняно хороша швидкість розрахунку на комп'ютері.

Виходячи з цього, **метою досліджень** було створення удосконаленого методу розрахунку, заснованого на дводисковій імпульсній теорії з урахуванням змінності локального числа Рейнольдса набіжного потоку на елементи лопатів, яке, в свою чергу, розраховується в залежності від положення азимутального кута та величини відносної локальної швидкості вітру перед елементом лопаті у вітроколесі.

РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ВЕУ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ

2.1. Загальна характеристика математичної моделі

Так звана імпульсна математична модель аеродинамічного розрахунку ВЕУ орієнтована на розрахунок вітроколеса з вертикальною віссю обертання з прямолінійними лопатями та траверсами. У дисертаційній роботі використовується модернізована автором модель так званої дводискової імпульсної теорії, в котрій основним елементом є використання закону про зміну кількості руху. В основі застосованої в дисертаційній роботі теорії використовуються теорема про зміну кількості руху та теорема про зміну кінетичної енергії вітрового потоку при проходженні цим потоком деякої умовної площі, котра називається “*площею активного перерізу*”. Якщо закон про зміну кількості руху застосовується тільки один раз, то модель є *однодисловою*; у цьому випадку окреслений об’єм потоку розглядається як деякий умовний переріз, на якому, в результаті взаємодії потоку з поверхнями лопатей чи траверс, відбувається зміна кількості руху газового потоку.

В розглянутій автором математичній моделі закон про зміну кількості руху застосовується окремо для *навітряної* і *підвітряної* частин вітроколеса. Таким чином, вітроколесо, як механічний об’єкт, до якого застосовується теорема про зміну кількості руху, замінюється двома умовними активними перерізами – умовними “дисками” (перший переріз – у навітряній частині вітроколеса, другий, відповідно, – у підвітряній частині), на яких, в інтегральному сенсі, враховується взаємодія потоку з лопатями.

У математичному плані реалізація дводискової імпульсної теорії зводиться до наступного алгоритму: сили, що діють на лопаті та траверси, з одного боку, виражаються інтегрально через аеродинамічні коефіцієнти елементів профілів лопаті та траверс (розраховуються за місцевими кутами атаки та місцевими відносними швидкостями, котрі заздалегідь невідомі); з іншого боку – ці ж самі сили виражаються за допомогою теореми імпульсів. Прирівнюючи вирази для

сил, отриманих вказаними двома способами, для кожного з активних перерізів, отримуємо систему двох трансцендентних рівнянь, з якої знаходяться величини так званих індукованих швидкостей потоку в навітряній та підвітряній частинах окресленого об'єму вітроенергетичної установки. При цьому рівняння для навітряної частини вдається розв'язати незалежно від рівняння для підвітряної частини, а це останнє рівняння залежить від розв'язку рівняння для навітряної частини.

В аеродинамічному розрахунку використовується метод, при якому вказані два рівняння зводяться до одного трансцендентного рівняння, котре розв'язується методом ітерацій. Цей метод дозволяє знайти залежність індукованих швидкостей в навітряній та підвітряній частинах ВЕУ від заданої швидкості вітру V_0 та кутової швидкості обертання вітроколеса при вже обраних профілях лопатей.

Після знаходження індукованих швидкостей, аеродинамічні та енергетичні характеристики ВЕУ обчислюються за певними формулами або за допомогою деяких квадратур [76].

Вихідними даними для проведення аеродинамічного розрахунку є геометричні параметри ВЕУ та залежності аеродинамічних коефіцієнтів профілів лопатей і траверс від кутів атаки та числа Рейнольдса [19].

2.2. Геометричні та кінематичні параметри елементів лопаті

Для математичного розрахунку ВЕУ будемо використовувати (рис. 2-1) декартову систему координат $Oxyz$, при цьому: вісь x направимо в напрямку руху незбуреного потоку вітру V_0 , вісь z - вертикально вгору вздовж осі обертання ВЕУ, вісь y направимо так, щоб система $Oxyz$ була правою системою координат. Початок системи координат можна обирати в будь - якій горизонтальній площині, але зручніше всього розміщувати його в центрі механізму повороту головки вітряного двигуна. На рис.2-1 показано азимутальний кут β , який характеризує розташування лопаті (точніше, середини

хорди лопаті) відносно вказаної вище системи координат. Кут β відраховується від осі x проти годинникової стрілки, ω – кутова швидкість обертання вала ВЕУ.

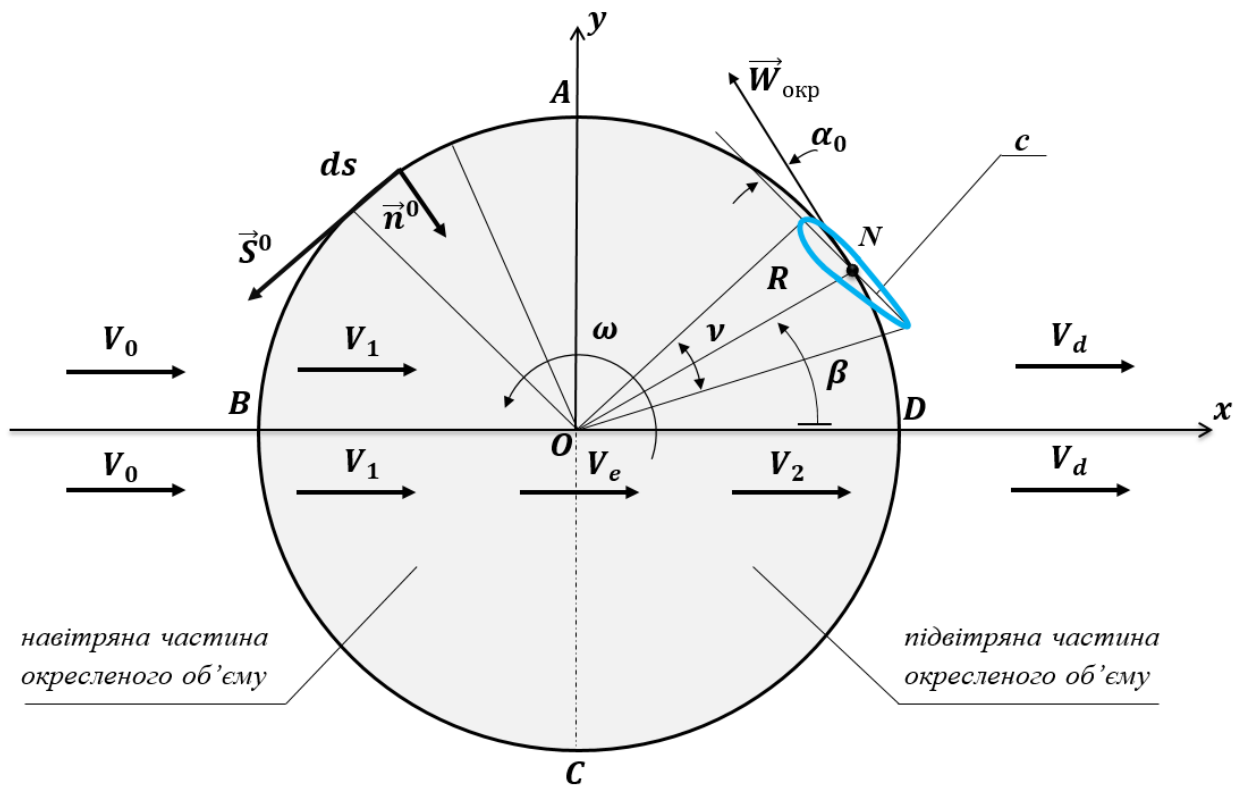


Рис. 2-1 – Система координат та схема розташування лопаті (у поперечному перерізі ВЕУ)

При роботі ВЕУ за рахунок втрати кінетичної енергії і зменшення кількості руху потоку фактична швидкість руху потоку повітря $\vec{V}(x, y, z, t)$ всередині охоплюваного об'єму не буде дорівнювати швидкості руху незбуреного потоку повітря V_0 (причому і величина, і напрямок швидкості усередині вказаного об'єму заздалегідь невідомі). Можна тільки стверджувати, що в середньому величина швидкості V менша, ніж величина швидкості V_0 . Фактичне поле $\vec{V}(x, y, z, t)$ є складною функцією від координат та часу і може бути розраховано тільки завдяки застосуванню чисельних методів моделювання руху газу на базі використання диференціальних рівнянь руху газу різного наближення. В представленій дисертаційній роботі чисельне моделювання руху газу не використовувалось.

В імпульсній моделі припускається, що величина цієї швидкості в середньому стала і різницю $\vec{V} - \vec{V}_0$ називають індукованою швидкістю і однією із основних задач аеродинамічного розрахунку є знаходження саме цієї індукованої швидкості. Якщо цю швидкість знайдено, то стають відомими умови обтікання кожного елемента лопаті та траверси. Це дає можливість розрахувати елементарні (а потім і сумарні) сили та моменти, що прикладені до цих елементів (при умові, що відомі аеродинамічні коефіцієнти профілів лопаті і траверси в залежності від кутів атаки та числа Рейнольдса).

Таким чином, основна теоретична задача постає у визначенні поля індукованої швидкості, або фактичної швидкості руху вітрового потоку $\vec{V}(x, y, z, t)$ в межах охоплюваного об'єму.

Слід зазначити, що задача визначення поля швидкостей є надзвичайно складною і на сьогоднішній день не існує аналітичного розв'язку цієї задачі, тому, зазвичай, в задачах вітроенергетики використовують різноманітні наближені чисельні методи щодо знаходження швидкості \vec{V} , але, як правило, знаходиться не інстинне поле швидкостей $\vec{V}(x, y, z, t)$, а деяке осереднене значення швидкості \vec{V} (наприклад, середнє значення по об'єму за деякий період обертання, тощо).

Взагалі кажучи, всередині окресленого об'єму вектор швидкості \vec{V} крім поздовжньої компоненти має ще і бічну складову, але бічна складова є достатньо малою, і тому у розв'язку поставленої тут задачі за даною методикою бічною компонентою нехтувалось.

Отже, згідно сказаному вище, ми фактично розглядаємо одновимірну модель, в рамках якої враховується тільки повздовжня компонента швидкості при проходженні потоку через вказаний окреслений об'єм.

Таким чином, аеродинамічна модель вітроколеса умовно розділяє весь окреслений об'єм, тобто весь циліндричний об'єм на дві частини, навітряну ABC та підвітряну ADC , які, в свою чергу, відділені одна від одної

діаметральною площиною AOC . Ця площина перпендикулярна до вектора швидкості набіжного потоку \vec{V}_0 (площина AOC на рис. 2-1).

Осереднену швидкість потоку, що проходить через навітряну частину, позначимо через \vec{V}_1 , а осереднену швидкість потоку, що проходить через підвітряну частину – через \vec{V}_2 . Осереднену швидкість потоку в діаметральній площині AOC позначимо через \vec{V}_e . Граничне асимптотичне значення швидкості, що знаходиться за підвітряною частиною вітроколеса позначимо \vec{V}_d . Що стосується всіх цих умовно введених швидкостей, то в імпульсній теорії (при застосуванні до вітроенергетики) вони вважаються сталими величинами, котрі не залежать ні від просторових координат, ні від часу (при фіксованих швидкості вітру та кутовій швидкості обертання ВЕУ). Тому \vec{V}_1 та \vec{V}_2 вважаються середніми значеннями швидкостей у навітряній і підвітряній частині окресленого об'єму відповідно. Як вже говорилося, вважаємо, що швидкості \vec{V}_1 та \vec{V}_2 направлені вздовж набігаючого потоку, тобто вздовж осі Ox .

Таким чином, в рамках вибраної моделі, попереду, вдалині від навітряної частини вітроколеса, швидкість потоку дорівнює:

$$\vec{V}_0 = V_0 \vec{x}^0.$$

Швидкість у навітряній частині вітроколеса дорівнює:

$$\vec{V}_1 = V_1 \vec{x}^0.$$

У діаметральній площині, тобто перед підвітряною частиною вітроколеса, потік має осереднену швидкість

$$\vec{V}_e = V_e \vec{x}^0,$$

підвітряна сторона наповнена потоком зі швидкістю

$$\vec{V}_2 = V_2 \vec{x}^0,$$

а у кільватерній зоні швидкість набуває граничного асимптотичного значення:

$$\vec{V}_d = V_d \vec{x}^0.$$

Величини V_1 , V_2 , V_e та V_d заздалегідь невідомі, вони залежать від геометричних форм лопатей, траверс, кутової швидкості ВЕУ і незбуреної швидкості вітру. Будемо вважати, що введені значення швидкостей, як вже

вказувалось, є сталими величинами, тобто що вони не залежать від азимутального кута β .

Спочатку ми маємо обчислити величину маси повітря, що проходить через навітряну та підвітряну частини вітроколеса за одиницю часу. Уявимо в потоці деякий шар між двома горизонтальними площинами з аплікатами z і $z + dz$ відповідно. Закон збереження маси будемо попередньо розглядати для шару між двома перерізами $z = \text{const}$ та $z + dz = \text{const}$, вважаючи, що між такими шарами обміну масами немає (тобто, ми вважаємо, що вертикальна компонента швидкості газу V_z в окресленому об'ємі відсутня).

Розглянемо коло $ABCD$, яке описує центр поперечного перерізу лопаті. Радіус цього кола позначимо через R . Візьмемо елементарну дугу цього кола $ds = R d\beta$ і знайдемо масу повітря, що проходить через елементарну площадку $d\sigma = R d\beta dz$.

Для навітряної частини елементарний потік маси є таким:

$$dm_1 = \rho \vec{V}_1 \vec{n}^0 d\sigma = -\rho R V_1 \cos \beta dz d\beta, \quad (2.1)$$

де $\vec{n}^0 = -\cos \beta \vec{x}^0 - \sin \beta \vec{y}^0$ є внутрішня одинична нормаль до вказаного кола.

Для знаходження секундної маси Δm_1 (що проходить через навітряну частину вітроколеса, а саме через дугу ABC) потрібно проінтегрувати вираз (2.1) за змінною β в границях від $\frac{\pi}{2}$ до $\frac{3\pi}{2}$, при цьому, слід зазначити, що деяка частина вказаної дуги затінена для проходу повітря наявною в цій зоні поверхнею лопаті (чи лопатей).

Наведемо результати розрахунку, коли ВЕУ має дві лопаті:

$$\Delta m_1 = -\rho \cdot R \cdot V_1 \cdot dz \cdot I, \text{ де}$$

$$I = \int_A^C \cos \beta d\beta.$$

Позначимо через β_1 азимутальний кут середини однієї із лопатей, а через ν – кут, під яким видно хорду лопаті з точки O (рис.2.1).

Для інтегралу I будемо мати наступні значення:

$$1) \frac{\pi - \nu}{2} < \beta_1 < \frac{\pi + \nu}{2} : I = -\sin\left(\beta_1 - \frac{\nu}{2}\right) - \sin\left(\beta_1 + \frac{\nu}{2}\right),$$

$$2) \frac{\pi + \nu}{2} < \beta_1 < \pi - \frac{\nu}{2} : I = -2 + \sin\left(\beta_1 - \frac{\nu}{2}\right) - \sin\left(\beta_1 + \frac{\nu}{2}\right),$$

$$3) \pi - \frac{\nu}{2} < \beta_1 < \pi + \frac{\nu}{2} : I = \sin\left(\beta_1 - \frac{\nu}{2}\right) + \sin\left(\beta_1 + \frac{\nu}{2}\right).$$

Величина Δm_1 залежить від положення лопаті на навітряній частині. Для того, щоб знайти середнє значення Δm_1 за напівоберт вітроколеса необхідно знати середнє значення величини I по параметру β_1 . Інтегруючи кожне значення I по кожному з інтервалів зміни параметра β_1 , сумуючи результати і ділячи суму на загальний інтервал зміни β_1 , тобто на величину:

$$\Delta\beta_1 = \pi + \frac{\nu}{2} - \left(\frac{\pi - \nu}{2}\right) = \nu + \frac{\pi}{2}.$$

Отримуємо:

$$I_{cp} = \frac{2}{2\nu + \pi} \left[-2 \left(\frac{\pi}{2} - \nu \right) - 1 + \cos \nu - \sin \nu \right].$$

Таким чином, середнє значення потоку маси через навітряну частину дорівнює:

$$\Delta m_1 = 2\rho R V_1 k dz, \quad (2.2)$$

де k - коефіцієнт, який враховує середнє затінення перерізу окресленого об'єму лопатями (для вітроколеса, що має дві лопаті):

$$k = \frac{\pi - 2\nu + 1 + \sin \nu - \cos \nu}{\pi + 2\nu} < 1.$$

Якщо хорда лопаті l є малою у порівнянні з довжиною дуги ABC , тобто $\nu \rightarrow 0$, тоді коефіцієнт $k \rightarrow 1$.

Аналогічним чином для підвітряної частини маємо:

$$\Delta m_2 = 2\rho R V_2 k dz, \quad (2.3)$$

Відмінність величин Δm_1 та Δm_2 ($\Delta m_1 > \Delta m_2$) пояснюється тим, що при проходженні навітряної сторони ВЕУ частина маси відкидається вбік, але цей ефект в даній моделі явно не враховується.

При обертанні лопаті по колу лінійна швидкість центра профілю направлена вздовж дотичної до кола і її величина визначається за формулою:

$$\vec{W}_{окр} = R\omega\vec{s}^0 = R\omega(-\sin\beta\vec{x}^0 + \cos\beta\vec{y}^0), \quad (2.4)$$

де $\vec{s}^0 = -\sin\beta\vec{x}^0 + \cos\beta\vec{y}^0$ є одиничний вектор дотичної до окресленого кола.

Відносна швидкість \vec{W} набіжного потоку на лопать в положенні, яке характеризується азимутальним кутом β для навітряної сторони дорівнює:

- для навітряної частини:

$$\vec{W}_1 = \vec{V}_1 - \vec{W}_{окр} = (V_1 + R\omega\sin\beta)\vec{x}^0 - R\omega\cos\beta\vec{y}^0, \quad (2.5)$$

- для підвітряної частини:

$$\vec{W}_2 = \vec{V}_2 - \vec{W}_{окр} = (V_2 + R\omega\sin\beta)\vec{x}^0 - R\omega\cos\beta\vec{y}^0, \quad (2.6)$$

В загальному випадку лопать може бути встановлена під деяким кутом α_0 відносно вказаного вектора дотичної до окресленого кола. Кут α_0 будемо вважати додатнім, якщо передня кромка профілю відхиляється всередину вказаного кола, і від'ємним, якщо – назовні (рис.2-2). Кут α_0 будемо називати кутом установки лопаті.

Місцевий кут атаки α елемента профілю дорівнює

$$\alpha = \alpha_0 + \psi \quad (2.7)$$

де ψ – кут між вектором відносної швидкості \vec{W} і напрямком дотичної \vec{s}^0 .

Кут ψ вважається додатнім, якщо до набігаючого потоку звернена зовнішня сторона поверхні профілю (навітряна частина вітроколеса) і від'ємним, якщо до потоку звернена його внутрішня сторона (підвітряна частина вітроколеса).

Проекції швидкості \vec{W} на вектори \vec{s}^0 та \vec{n}^0 позначимо через W_s та W_n :

$$W_s = \vec{W}\vec{s}^0, \quad W_n = \vec{W}\vec{n}^0.$$

Для навітряної частини (індекс “1”) маємо:

$$W_{s1} = -R\omega - V_1 \sin \beta, W_{n1} = -V_1 \cos \beta.$$

Для підвітряної частини (індекс “2”) маємо:

$$W_{s2} = -R\omega - V_2 \sin \beta, W_{n2} = -V_2 \cos \beta.$$

Для місцевого кута атаки маємо такі вирази:

- у навітряній зоні:

$$\alpha = \alpha_0 + \psi_1 = \alpha_0 + \arctg\left(\frac{W_{n1}}{-W_{s1}}\right) = \alpha_0 + \arctg\left(\frac{-V_1 \cos \beta}{R\omega + V_1 \sin \beta}\right); \quad (2.8)$$

- у підвітряній зоні:

$$\alpha = \alpha_0 + \psi_2 = \alpha_0 + \arctg\left(\frac{W_{n2}}{-W_{s2}}\right) = \alpha_0 + \arctg\left(\frac{-V_2 \cos \beta}{R\omega + V_2 \sin \beta}\right). \quad (2.9)$$

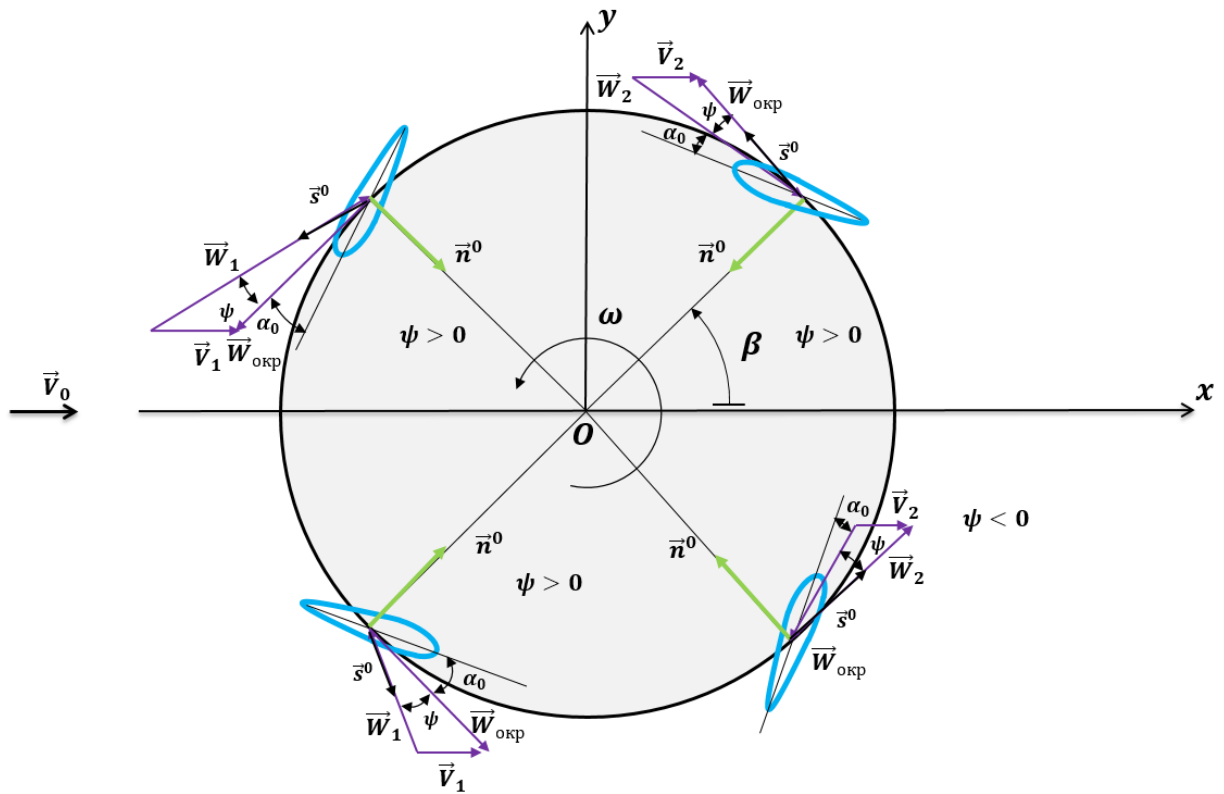


Рис. 2-2 – Схема відносних швидкостей та кутів атаки елементів лопаті в залежності від азимутального кута

Для елемента лопаті можуть реалізовуватися різні кути α , додатні – якщо $0^\circ < \alpha < 180^\circ$, від’ємні – $180^\circ < \alpha < 0^\circ$.

Правило для визначення величини кута α при використанні формул (2.8) і (2.9) є таким:

$$\begin{aligned} 0^\circ < \alpha < 90^\circ : W_n > 0 \text{ та } W_s < 0; \\ 90^\circ < \alpha < 180^\circ : W_n > 0 \text{ та } W_s > 0; \\ 180^\circ < \alpha < 270^\circ : W_n < 0 \text{ та } W_s < 0; \\ 270^\circ < \alpha < 360^\circ : W_n < 0 \text{ та } W_s > 0. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Якщо кут установки лопаті $\alpha_0 = 0$, то згідно з формулами (2.8) та (2.9) кут атаки $\alpha = \psi$, де ψ - кут між вектором \vec{W} і дотичною $(-\vec{s}^0)$ до кола радіуса R . У цьому випадку формули (2.10) визначають величину кута ψ в залежності від азимутального кута β (а також від величин R , ω та V_1 чи V_2 ; при цьому останні величини ще мають бути отримані, а поки що вони невідомі).

2.3. Геометричні та кінематичні параметри елементів траверс

Траверса дає певний внесок в загальну аеродинамічну силу опору БЕУ, тому траверсу бажано застосовувати у вигляді профільованого крила для зменшення вкладу в силу опору, причому профіль траверси бажано вибирати симетричним, щоб не виникала додаткова сила, направлена вздовж осі обертання, направлена або вгору, або вниз. Саме для таких траверс у вигляді симетричного профільованого крила розглядається дана методика врахування впливу траверс на момент та енергетичну характеристику БЕУ. Отже, в якості траверси ми розглядаємо профільоване крило, вісь якого розташована в меридіональній площині БЕУ.

У загальному випадку вся траверса, або деякі її частини (елементи) можуть бути розташовані під деяким кутом δ до горизонтальної площини. Як вже було сказано, у будь-якому поперечному перерізі траверса являє собою симетричний профіль з довжиною хорди b , яка може бути як сталою величиною, так і залежати від r . Зазвичай, для траверс використовують крило, яке звужується при переході від Комля (місця кріплення траверси до силової оболонки) до місця кріплення

траверси до лопаті. Будемо вважати, що у будь-якому поперечному перерізі траверси хорда профілю розташована у горизонтальній площині (рис.2-3,а). Для подальшого доцільно ввести певні орти, що характеризують положення елементів траверси у просторі, а саме: по-перше, \vec{e}_s – уздовж осі траверси у напрямку від осі обертання в сторону лопаті; якщо вісь траверси (чи деякий її елемент) нахилено до горизонтальної площини під кутом δ , тоді

$$\vec{e}_s = \cos \delta \vec{e}_r + \sin \delta \vec{e}_z, \quad \vec{e}_z = \vec{z}^0, \quad (2.11)$$

у свою чергу:

$$\vec{e}_r = \cos \beta \vec{x}^0 + \sin \beta \vec{y}^0, \quad (2.12)$$

отже:

$$\vec{e}_s = \cos \delta (\cos \beta \vec{x}^0 + \sin \beta \vec{y}^0) + \sin \delta \vec{e}_z. \quad (2.13)$$

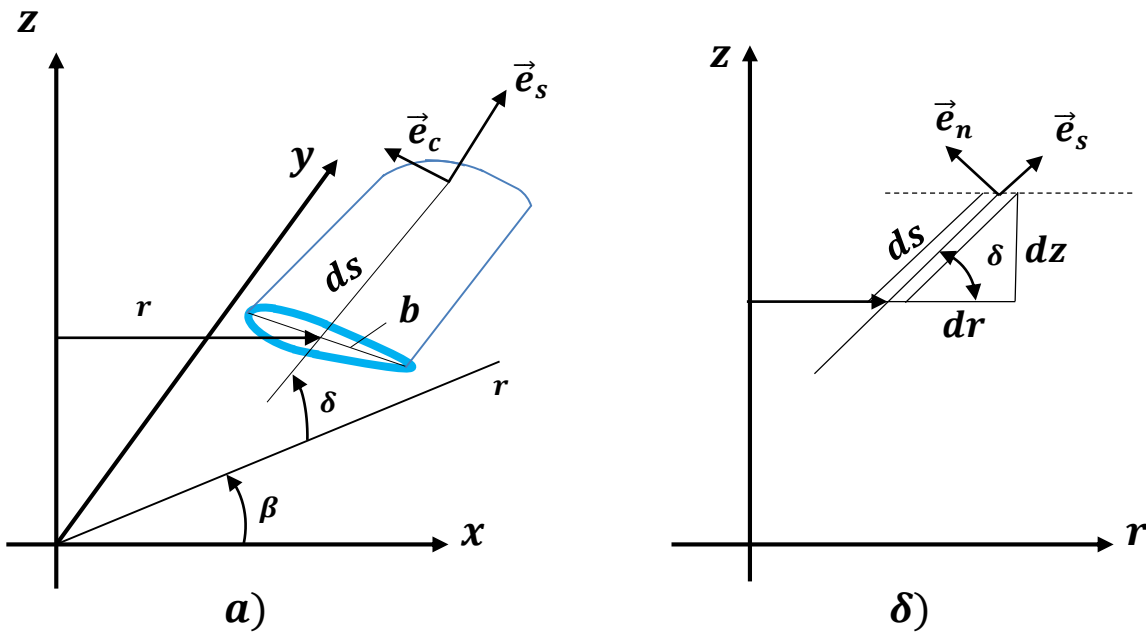


Рис. 2-3 – Схема розташування елементів траверс

Введемо також орт \vec{e}_c , направлений вздовж хорди профілю траверси в бік обертання; згідно з вказаними припущеннями, цей вектор розташований паралельно до горизонтальної площини і співпадає з вектором дотичної до окресленого кола, тобто

$$\vec{e}_c = -\sin \beta \vec{x}^0 + \cos \beta \vec{y}^0. \quad (2.14)$$

Введемо ще вектор \vec{e}_n , який будемо вважати перпендикулярним до площини крила-траверси, тобто перпендикулярним до системи векторів \vec{e}_c та \vec{e}_s . В якості вектора \vec{e}_n доцільно взяти векторний добуток $\vec{e}_s \times \vec{e}_c$, отже, тоді маємо:

$$\begin{aligned}\vec{e}_n &= \vec{e}_s \times \vec{e}_c = -\sin \delta \cos \beta \vec{i} - \sin \delta \sin \beta \vec{j} + \cos \delta \vec{k} = \\ &= -\sin \delta (\cos \beta \vec{i} + \sin \beta \vec{j}) + \cos \delta \vec{k}.\end{aligned}\quad (2.15)$$

Якщо траверса у формі профільованого крила, розташована у горизонтальній площині ($\delta = 0$), то вектор \vec{e}_n має напрямок вздовж осі z :

$$\vec{e}_n = \vec{k}.\quad (2.16)$$

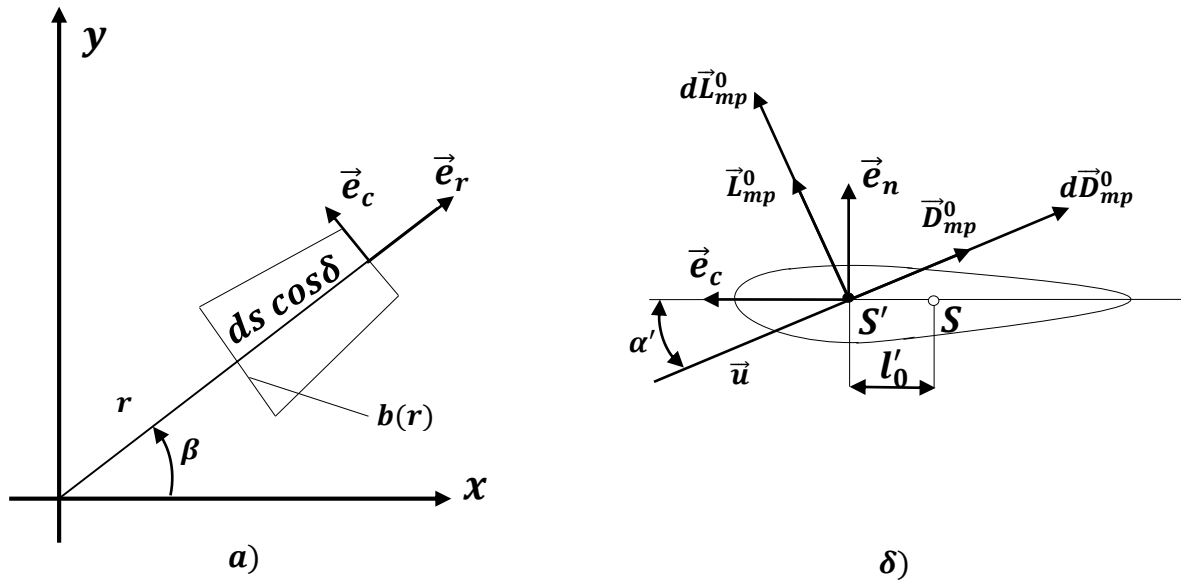


Рис. 2-4 – Схема розташування сил, діючих на траверсу

Елементи траверси у кожен момент часу знаходяться в скошеному потоці повітря як за рахунок можливого власного кута звуження хорди траверси (власна стріловидність траверси крила), так і за рахунок наявності обертання. Надалі будемо вважати, що довжина хорди профілю траверси однакова по її довжині, тобто власний кут звуження траверси, як аеродинамічного крила, відсутній. Для стріловидного крила зазвичай вважається, що аеродинамічні сили (підйомна сила і сила опору) створюються лише за рахунок тієї складової відносної швидкості, яка розташована у площині, перпендикулярній до передньої кромки крила, тобто у даному випадку, за рахунок тієї складової, яка розташована в

площині векторів (\vec{e}_c та \vec{e}_n). Складова вектора швидкості, направлена уздовж осі траверси, призводить до виникнення додаткових сил тертя, спрямованих уздовж осі траверси, які тут не враховуються, оскільки їх моменти відносно осі ВЕУ дорівнюють нулю.

Нехай елемент похилої траверси, розташований в шарі dz , знаходиться від осі вітроколеса на відстані r . Тоді відносна швидкість потоку, що набігає в місці розташування такого елемента буде дорівнювати (індекси “1,2” відносяться до навітряної і підвітряної частини, відповідно):

$$\begin{aligned}\vec{W}_{\text{тp1}} &= (V_1 + r\omega \sin \beta) \vec{x}^0 - r\omega \cos \beta \vec{y}^0, \\ \vec{W}_{\text{тp2}} &= (V_2 + r\omega \sin \beta) \vec{x}^0 - r\omega \cos \beta \vec{y}^0.\end{aligned}\quad (2.17)$$

Проекції відносної швидкості $\vec{W}_{\text{тp1,2}}$ на одиничні вектори \vec{e}_n і \vec{e}_c будуть такими:

$$\begin{aligned}W'_{1n} &= W'_{\text{тp1}} \vec{e}_n = -V_1 \sin \delta \cos \beta, \\ W'_{1c} &= W'_{\text{тp1}} \vec{e}_c = -r\omega - V_1 \sin \beta, \\ W'_{2n} &= W'_{\text{тp2}} \vec{e}_n = -V_2 \sin \delta \cos \beta, \\ W'_{2c} &= W'_{\text{тp2}} \vec{e}_c = -r\omega - V_2 \sin \beta.\end{aligned}\quad (2.18)$$

Вектор \vec{e}_n знаходиться у меридіональній площині вітроколеса. Зауважимо, що проекцією вектора \vec{e}_s на площину Oxy (рис.2-4, а) є вектор $\vec{e}_r = \cos \beta \vec{x}^0 + \sin \beta \vec{y}^0$.

Із рис.2-4,б видно, що кут атаки для профілю елемента траверси α' виражається співвідношенням:

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{W'_n}{-W'_c}, \quad (2.19)$$

Для навітряної та підвітряної частин будемо мати

$$\alpha'_{1,2} = \operatorname{arctg} \frac{-V_{1,2} \sin \delta \cos \beta}{r\omega + V_{1,2} \sin \beta}. \quad (2.20)$$

З останньої формули бачимо, що для елемента горизонтальної траверси кут атаки його профілю дорівнює або $\alpha' = 0$ (якщо $r\omega + V_{1,2}\sin\beta > 0$), або $\alpha' = 180^\circ$ (якщо $r\omega + V_{1,2}\sin\beta < 0$).

При різних числах швидкості на елементах похилих траверс можуть реалізуватися різні кути атаки, значення яких знаходяться в таких межах:

$$\begin{aligned} 0^\circ < \alpha' < 90^\circ : W'_n > 0 \text{ та } W'_s < 0; \\ 90^\circ < \alpha' < 180^\circ : W'_n > 0 \text{ та } W'_s > 0; \\ 180^\circ < \alpha' < 270^\circ : W'_n < 0 \text{ та } W'_s < 0; \\ 270^\circ < \alpha' < 360^\circ : W'_n < 0 \text{ та } W'_s > 0. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Останні формули відрізняються від аналогічних формул (2.10) для лопаті тільки врахуванням існування кута $\delta \neq 0$.

2.4. Вирази для аеродинамічних сил, що діють на елементи лопатей

Розглянемо елемент лопаті завдовжки dz (рис. 2-2 та рис. 2-5). На цей елемент діє сила опору $d\vec{D}$, спрямована уздовж вектора відносної швидкості \vec{W} (окремо для навітряної і підвітряної частин) і підйомна сила $d\vec{L}$, спрямована всередину вітроколеса, якщо ефективний кут атаки $\alpha = \alpha_0 + \psi > 0$.

Розглянемо елемент лопаті, який зображено на рис.2-5, і діючі на нього аеродинамічні сили. Якщо c_x та c_y – коефіцієнти сили опору та підйомної сили профілю лопаті, то для елемента довжиною dz будемо мати наступні вирази для аеродинамічних сил:

$$d\vec{D} = \frac{1}{2} \rho W^2 l dz c_x \vec{D}^0, \quad (2.22)$$

$$d\vec{L} = \frac{1}{2} \rho W^2 l dz c_y \vec{L}^0, \quad (2.23)$$

де l – довжина хорди профілю лопаті, а \vec{D}^0 та \vec{L}^0 – одиничні вектори, напрямки яких визначаються виразами:

$$\begin{aligned} \vec{L}^0 &= \cos\psi \vec{m}^0 + \sin\psi \vec{s}^0, \\ \vec{D}^0 &= \sin\psi \vec{m}^0 - \cos\psi \vec{s}^0, \end{aligned} \quad (2.24)$$

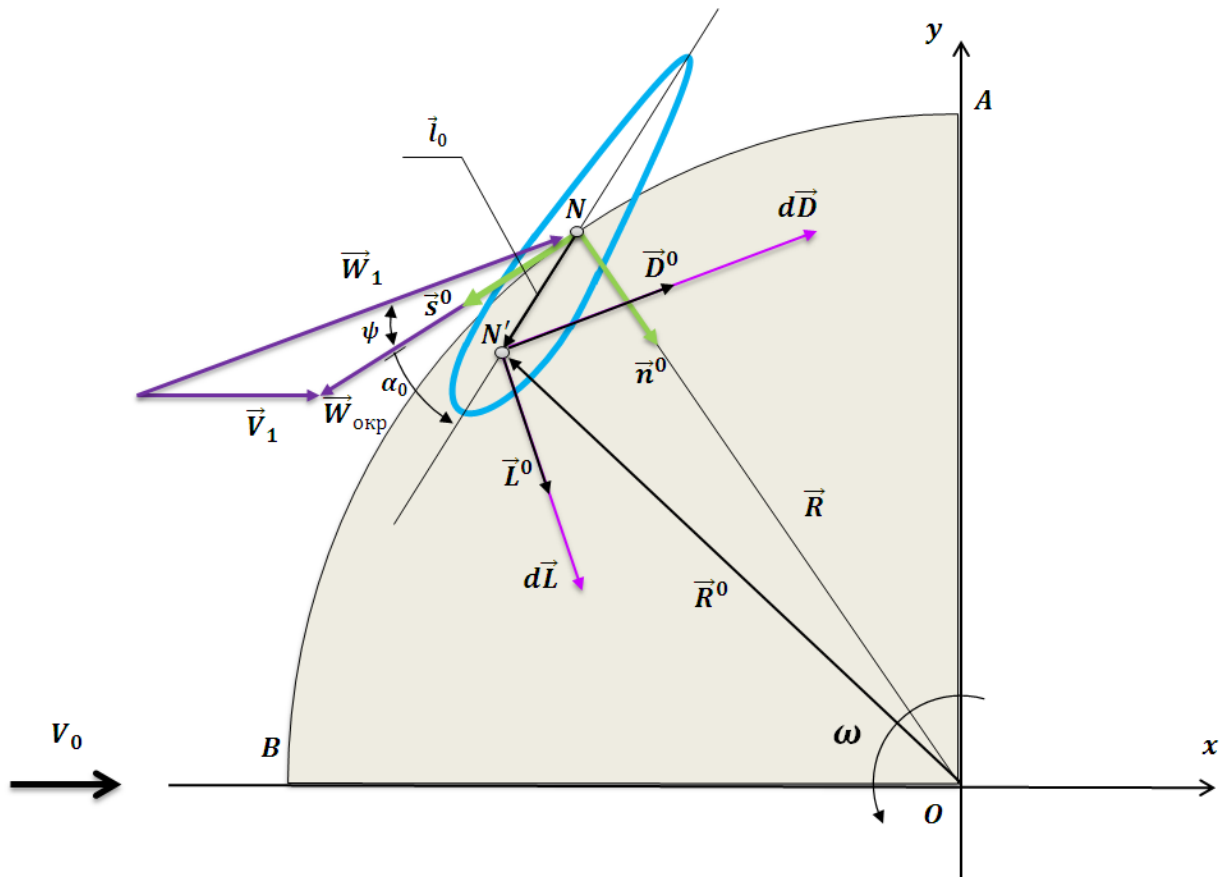


Рис. 2-5 – Схема сил, що діють на елементи лопаті

Зауважимо, що формули (2.24) справджуються як у випадку $\alpha_0 = 0$, так і у випадку коли $\alpha_0 \neq 0$, а аеродинамічні коефіцієнти $c_y(\alpha)$ і $c_x(\alpha)$, що входять до формул (2.19) та (2.20) мають бути розраховані за кутами атаки $\alpha'_{1,2}$, обчисленими за формулами (2.20) та числами Рейнольдса, обчисленими за наступною формулою:

$$\text{Re} = \frac{Wl}{\nu}, \quad (2.25)$$

де W – модуль швидкості \vec{W} , l – довжина хорди профілю лопаті, ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря при статичній температурі в потоці.

Але, зауважимо, що на даній стадії розрахунків ми ще не можемо розрахувати ні кути атаки, ні аеродинамічні коефіцієнти $c_y(\alpha)$ і $c_x(\alpha)$, ні локальне число Рейнольдса, оскільки ми ще не знаємо величин швидкостей V_1 та

V_2 . Виконати ці обчислення можна лише після того, як будуть отримані і розв'язані рівняння для визначення швидкостей V_1 та V_2 через V_0 .

Якщо кут $\alpha = \alpha_0 + \psi > 0$, то напрямок сили $d\vec{L}$ співпадає з вектором \vec{L}^0 , а якщо $\alpha = \alpha_0 + \psi < 0$, то напрямок вектора сили $d\vec{L}$ буде протилежним напрямку вектора \vec{L}^0 за рахунок того, що для симетричного профілю коефіцієнт $c_y(\alpha)$ змінює знак при зміні знака α , тобто

$$c_y(\alpha) = -c_y(-\alpha).$$

Виразимо вектори \vec{L}^0 та \vec{D}^0 через проекції на осі основної системи координат $Oxyz$. Згідно з виразами для \vec{n}^0 та \vec{s}^0 отримаємо:

$$\begin{aligned}\vec{L}^0 &= -\cos(\beta - \psi)\vec{x}^0 - \sin(\beta - \psi)\vec{y}^0, \\ \vec{D}^0 &= \sin(\beta - \psi)\vec{x}^0 - \cos(\beta - \psi)\vec{y}^0.\end{aligned}\tag{2.26}$$

Сумарна аеродинамічна сила, яка діє на елемент лопаті, дорівнює:

$$\begin{aligned}d\vec{F}^0 &= d\vec{L}^0 + d\vec{D}^0 = \\ &= \frac{1}{2}\rho W^2 l dz [c_x(\sin(\beta - \psi)\vec{x}^0 - \cos(\beta - \psi)\vec{y}^0) + \\ &\quad + c_y(-\cos(\beta - \psi)\vec{x}^0 - \sin(\beta - \psi)\vec{y}^0)] = \\ &= dX\vec{x}^0 + dY\vec{y}^0,\end{aligned}\tag{2.27}$$

де dX та dY – складові елементарної сили у напрямку осей ox та oy :

$$dX = \frac{1}{2}\rho W^2 l dz (c_x \sin(\beta - \psi) - c_y \cos(\beta - \psi)),\tag{2.28}$$

$$dY = \frac{1}{2}\rho W^2 l dz (-c_x \cos(\beta - \psi) - c_y \sin(\beta - \psi)).\tag{2.29}$$

Останні формули придатні для будь – якого положення профілю (при будь – якому значенні β), тільки для навітряної сторони замість W потрібно підставляти W_1 , а для підвітряної – W_2 .

Аеродинамічна сила $d\vec{F}$, що діє на профіль в центрі тиску профілю (точці N' , рис. 2-5), яка знаходиться на відстані l_0 від середини хорди N (якщо $l_0 > 0$, тоді точка N' зміщена відносно точки N до носика профілю).

Зазначимо радіус – вектор точки N' відносно точки N через \vec{l}_0 :

$$\vec{l}_0 = l_0 (\cos \alpha_0 \vec{s}^0 + \sin \alpha_0 \vec{n}^0), \quad (2.30)$$

тоді радіус – вектор точки N' відносно початку координат буде дорівнювати:

$$\vec{R}_0 = \vec{R} + \vec{l}_0 + z\vec{z}_0 = R_{0x}\vec{x}^0 + R_{0y}\vec{y}^0 + R_{0z}\vec{z}^0,$$

де R_{0x}, R_{0y}, z - компоненти радіус – вектора \vec{R}_0 :

$$\begin{aligned} R_{0x} &= R \cos \beta - l_0 \sin(\beta + \alpha_0), \\ R_{0y} &= R \sin \beta + l_0 \cos(\beta + \alpha_0). \end{aligned} \quad (2.31)$$

Момент аеродинамічної сили відносно початку координат дорівнює:

$$d\vec{M} = \vec{R}_0 \times d\vec{F}, \quad (2.32)$$

а його складова відносно осі oz дорівнює:

$$\begin{aligned} dM_z &= \frac{1}{2} \rho W^2 l dz [R(c_y \sin \psi - c_x \cos \psi)] + \\ &+ \frac{1}{2} \rho W^2 l_0 dz [c_x \sin(\alpha_0 + \psi) + c_y \cos(\alpha_0 + \psi)] \end{aligned} \quad (2.33)$$

Останній доданок у виразі (2.33) дає значення аеродинамічного моменту лопаті відносно середньої точки лопаті N , а точніше, відносно вертикальної осі лопаті, що проходить через середину хорд.

Таким чином, у положенні, котре характеризується азимутальним кутом β , на елемент лопаті висотою dz , діє аеродинамічна сила $d\vec{F}$, проекції якої на осі ox та oy виражаються формулами (2.28), (2.29), і аеродинамічний момент відносно осі ВЕУ dM_z , який виражається формулою (2.33). Аеродинамічні коефіцієнти c_x та c_y , що входять у формули (2.28), (2.29) та (2.33), залежать від місцевого кута атаки: $\alpha = \alpha_0 + \psi$ та місцевого числа Рейнольдса елементів профілю $Re = \frac{Wl}{\nu}$.

Для того, щоб можна було скористуватися формулами (2.28), (2.29) та (2.33), мають бути відомими теоретичні чи експериментальні залежності коефіцієнтів c_x та c_y , а також величини l_0 від кута атаки та числа Рейнольдса у всьому необхідному діапазоні їх зміни для того типу профілю, який обрано для лопаті.

2.5. Вирази для аеродинамічних сил, що діють на елементи траверс

Для того, щоб знайти вирази для аеродинамічних сил, діючих на траверси, потрібно розглянути елемент похилої траверси, що розташований поміж двома перерізами z та dz . Довжина цього елементу ds дорівнює

$$ds = \frac{dz}{\sin \delta}. \quad (2.34)$$

Згідно до рис.2-3, б, складова відносної швидкості набігаючого потоку в площині нормального перерізу траверси дорівнює:

$$\vec{U} = W'_n \vec{e}_n + W'_c \vec{e}_c. \quad (2.35)$$

де W'_n та W'_c - проекції відносної швидкості \vec{W} на орти \vec{e}_n (2.14) та \vec{e}_c (2.15).

Аеродинамічні сили, що прикладаються до елемента траверси довжиною ds дорівнюють:

$$\begin{aligned} d\vec{D}_{mp} &= \frac{1}{2} \rho U^2 c'_x b ds \vec{D}_{mp}^0, \\ d\vec{L}_{mp} &= \frac{1}{2} \rho U^2 c'_x b ds \vec{L}_{mp}^0, \end{aligned} \quad (2.36)$$

де $b(r)$ – хорда траверси на даному рівні z ; $\vec{D}_{тр}^0$ і $\vec{L}_{тр}^0$ - характерні одиничні вектори векторів $d\vec{D}_{mp}$ та $d\vec{L}_{mp}$:

$$\begin{aligned} \vec{L}_{mp}^0 &= \cos \alpha' \vec{e}_n + \sin \alpha' \vec{e}_c, \\ \vec{D}_{mp}^0 &= \sin \alpha' \vec{e}_n - \cos \alpha' \vec{e}_c. \end{aligned} \quad (2.37)$$

Через c'_x та c'_y позначені аеродинамічні коефіцієнти профілю траверси, кут α' – це власний кут обтікання елемента траверси місцевою відносною швидкістю.

Отримаємо наступні вирази для проекцій елементарної сили, яка прикладена до елемента траверси :

$$d\vec{F}_{mp} = d\vec{L}_{mp} + d\vec{D}_{mp} = dX_{mp} \vec{x}^0 + dY_{mp} \vec{y}^0 + dZ_{mp} \vec{z}_0,$$

де:

$$dX_{mp} = \frac{1}{2} \rho U^2 b ds \{ -c'_y (\sin \delta \cos \alpha' \cos \beta + \sin \alpha' \sin \beta) - c'_x (\sin \delta \sin \alpha' \cos \beta - \cos \alpha' \sin \beta) \}; \quad (2.38)$$

$$dY_{mp} = \frac{1}{2} \rho U^2 b ds \{ -c'_y (\sin \delta \cos \alpha' \sin \beta - \sin \alpha' \cos \beta) - c'_x (\sin \delta \sin \alpha' \sin \beta + \cos \alpha' \cos \beta) \}; \quad (2.39)$$

$$dZ_{mp} = \frac{1}{2} \rho U^2 b ds (c'_y \cos \alpha' + c'_x \sin \alpha') \cos \delta; \quad (2.40)$$

де

$$U_{1,2}^2 = V_{1,2}^2 \sin^2 \delta \cos^2 \beta + (r\omega + V_{1,2} \sin \beta)^2. \quad (2.41)$$

Із цих формул видно, що похила траверса, взагалі кажучи, створює складову осьової сили $dZ_{тр}$, величина якої змінюється с плином часу в процесі обертання лопатей.

Якщо центр тиску перерізу траверси знаходиться в точці S' на відстані l'_0 від передньої кромки профілю, то для цієї точки радіус - вектор матиме вигляд:

$$\bar{R}' = (r \cos \beta - l'_0 \sin \beta) \bar{x}^0 + (r \sin \beta + l'_0 \cos \beta) \bar{y}^0 + z \bar{z}^0, \quad (2.42)$$

і для аеродинамічного моменту елемента траверси відносно осі БЕУ отримуємо вираз:

$$dM_{z,mp} = \frac{1}{2} \rho U^2 b ds \{ r (c'_y \sin \alpha' - c'_x \cos \alpha') + l'_0 \sin \delta (c'_y \cos \alpha' + c'_x \sin \alpha') \}; \quad (2.43)$$

Якщо траверса горизонтальна, то товщину одного шару dz потрібно вибирати так, щоб уся траверса опинилась у цьому шарі, у такому випадку для елемента траверси довжиною $ds = dr$, розташованого на відстані r від осі БЕУ при $\delta = 0$, $\alpha' = 0$, $c'_y = 0$ матимемо:

$$dX_{mp} = \frac{1}{2} \rho U^2 c'_x \cos \alpha' \sin \beta b dr, \quad (2.44)$$

$$dY_{mp} = -\frac{1}{2} \rho U^2 c'_x \cos \alpha' \cos \beta b dr, \quad (2.45)$$

$$dZ_{mp} = 0, \quad (2.46)$$

$$dM_{z,mp} = -\frac{1}{2} \rho U^2 c'_x \cos \alpha' b dr, \quad (2.47)$$

причому

$$U_{1,2}^2 = (r\omega + V_{1,2} \sin \beta)^2. \quad (2.48)$$

Таким чином, якщо відомо аеродинамічні коефіцієнти профілю лопаті та профілю траверси в залежності від кута атаки та числа Рейнольдса, то за формулами (2.28), (2.29) і (2.44)–(2.46) можуть бути знайдені сили, що діють на елементи ВЕУ, а за формулами (2.33) та (2.48) - моменти від цих елементів, відносно осі ВЕУ, як функції кута β .

При цьому, у вказаних виразах для навітряної частини міститься невідоме значення швидкості V_1 , а для підвітряної – невідоме значення швидкості V_2 . Для знаходження цих величин використовуються рівняння зв'язку цих компонент, які, у свою чергу, отримуються із законів збереження маси, імпульсу та енергії.

2.6. Система рівнянь зв'язку швидкостей у навітряній та підвітряній частинах окресленого об'єму вітроустановки

Для розрахунку елементарних сил та моментів, що створюються від лопатів і траверс, необхідно завчасно знайти зв'язок між швидкостями V_1 та V_2 зі швидкістю вітру V_0 . Для знаходження цих рівнянь-зв'язків необхідно використовувати рівняння імпульсу та енергії. На рис. 2-6 показано схематично вітровий потік, що діє на колесо вітродвигуна з вертикальною віссю обертання (вигляд зверху). Як вже вказувалося, вітроколесо підрозділяється на дві частини – навітряну та підвітряну. З точки зору закону про зміну імпульсу навітряна частина вітроколеса розглядається як деяка умовна область «1», в межах якої на деякій умовній поверхні в інтегральному сенсі за рахунок взаємодії потоку з лопатями і траверсами створюється сила і виникає зміна кількості руху потоку повітря. Ця умовна поверхня і є так званий «активний диск». Аналогічним чином розглядається і підвітряна частина вітроколеса – область «2».

При вказаному теоретичному підході положення «активних дисків» в навітряній та підвітряній частині вітроколеса залишається невизначеним, але тут

важливим є не їх положення в просторі, а те, що на цих умовних дисках мають виконуватися закони збереження в інтегральному сенсі.

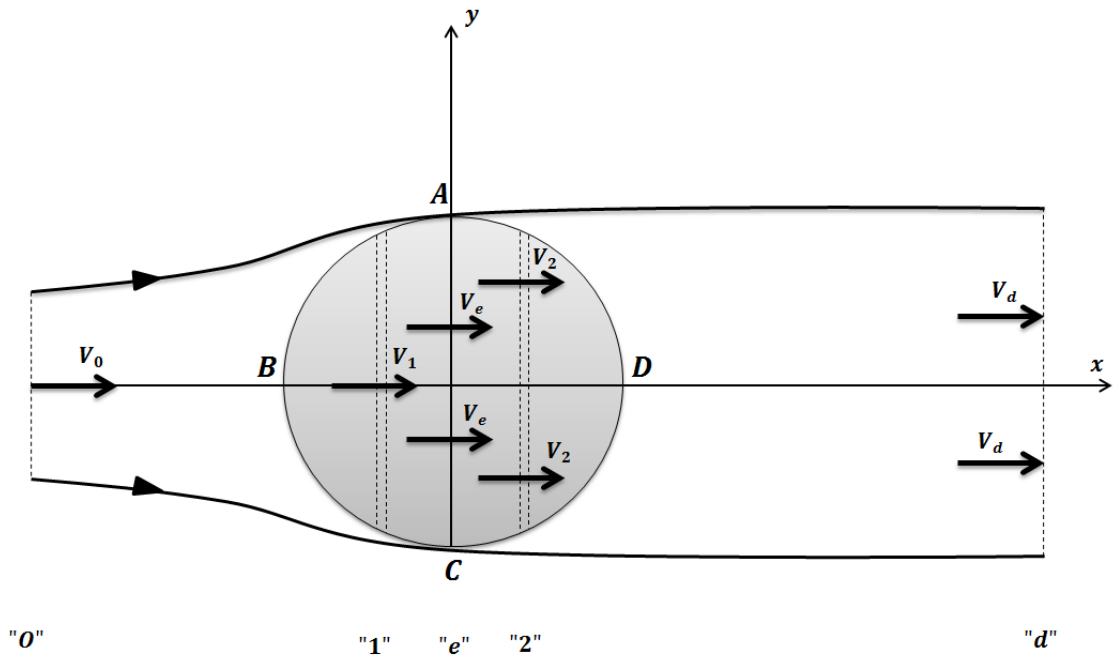


Рис. 2-6 – Схема дводискової моделі

В дводисковій моделі мається на увазі, що після проходження першого диска швидкість потоку від перерізу активного диска до перерізу «e» (поперечний діаметр AC, рис. 2-6) досягає деякого значення V_e :

$$\vec{V}_e = V_e \vec{x}^0,$$

при цьому, ця швидкість, у свою чергу, відіграє роль початкової швидкості набігаючого потоку для підвітряної частини БЕУ, тобто, перед другим «активним диском» «2». Так само, як і для навітряної частини, після проходження «диску» «2», швидкість у перерізі «d» досягає свого граничного асимптотичного значення:

$$\vec{V}_d = V_d \vec{x}^0.$$

Закон про зміну кількості руху потоку в елементарному струмені, що застосовується до першого та другого активного диска, дає такі вирази для сил:

$$X_{1\Sigma} = m_1(V_0 - V_e), \quad (2.49)$$

$$X_{2\Sigma} = m_1(V_e - V_d), \quad (2.50)$$

де $X_{1\Sigma}$ – сумарна повздовжня сила, що діє з боку повітря на елементи всіх тіл, що знаходяться у навітряній частині вітроколеса; аналогічний смисл мають величини для підвітряної частини: повздовжня сила – $X_{2\Sigma}$, m_1 та m_2 означають витрати повітря між цими перерізами [4].

Згідно з законом збереження енергії (зміна кінетичної енергії потоку при проходженні через «активний диск» дорівнює роботі сил, прикладеному прикладених у цьому перерізі до повітря зі сторони твердих тіл), матимемо такі співвідношення [1]:

$$V_1 = \frac{V_0 + V_e}{2}, \quad V_2 = \frac{V_e + V_d}{2}, \quad (2.51)$$

котрі можна застосовувати як до всієї БЕУ, так і до кожного окремого шару dz .

З (2.51) отримаємо:

$$V_e = 2V_1 - V_0, \quad (2.52)$$

$$V_d = 2\left(V_2 - V_1 + \frac{V_0}{2}\right), \quad (2.53)$$

Враховуючи те, що швидкість вітру може змінюватися за висотою, у подальшому всі рівняння будемо застосовувати до деякого шару dz , що знаходиться між перерізами z та $z + dz$.

Згідно з пунктом 2.2, а саме, з формул (2.2) та (2.3) маємо:

$$\Delta m_1 = 2\rho R V_1 k dz, \quad \Delta m_2 = 2\rho R V_2 k dz. \quad (2.54)$$

Використовуючи вирази (2.20) для сумарних сил (2.49) та (2.50) отримуємо вирази:

$$X_{1\Sigma} = 4Rk\rho dz V_1^2 \left(\frac{V_0}{V_1} - 1 \right), \quad (2.55)$$

$$X_{2\Sigma} = 4Rk\rho dz V_2^2 \left(2 \frac{V_1}{V_2} - \frac{V_0}{V_2} - 1 \right), \quad (2.56)$$

Знайдемо тепер вирази для сумарних аеродинамічних сил для навітряної та підвітряної частин БЕУ через аеродинамічні коефіцієнти. Окремо для кожної

з частин вітроколеса для однієї лопаті в шарі dz середні значення повздовжньої сили дорівнюють:

$$\bar{X}_{1,l} = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/2}^{3\pi/2} dX_1 d\beta, \quad \bar{X}_{2,l} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} dX_2 d\beta, \quad (2.57)$$

де сили $dX_{1,2}$ знаходяться за формулою (2.28).

Якщо число лопатей дорівнює N , то за один оберт половина цього числа знаходиться в навітряній частині вітроколеса, а інша половина – в підвітряній, тому середні сили від всіх лопатей для двох частин ВЕУ матимуть вигляд:

$$X_{1\Sigma l} = \frac{N}{2} \bar{X}_{1,l}, \quad X_{2\Sigma l} = \frac{N}{2} \bar{X}_{2,l}, \quad (2.58)$$

тобто

$$X_{1,2,l} = \frac{N}{4\pi} \rho l dz \int_{\frac{\pi}{2}(-\frac{\pi}{2})}^{\frac{3\pi}{2}(\frac{\pi}{2})} W_{1,2}^2 (c_x \sin(\beta - \psi) - c_y \cos(\beta - \psi)) d\beta, \quad (2.59)$$

де індекси «1» та «2» та межі інтегрування відносяться до навітряної та підвітряної частин вітроколеса відповідно.

Якщо в розглянутому шарі dz окрім елементів лопатей знаходяться елементи траверс, то до виразу (2.59) потрібно додати ще і сили, що походять від елементів траверс. Скажімо, для повздовжньої сили $X_{1,2mp}$, аналогічно виразу (2.59) отримуємо, що

$$X_{1,2mp} = \frac{N}{4\pi} \rho b ds \int_{\frac{\pi}{2}(-\frac{\pi}{2})}^{\frac{3\pi}{2}(\frac{\pi}{2})} U_{1,2}^2 \{ c'_x (\cos \alpha' \sin \beta - \sin \delta \sin \alpha' \cos \beta) - c'_y (\sin \delta \cos \alpha' \cos \beta + \sin \alpha' \sin \beta) \} d\beta. \quad (2.60)$$

У формулі (2.60) передбачається, що кількість траверс в шарі дорівнює кількості лопатей. Похилі траверси призводять до появи вертикальної сили, яка навантажує опірні підшипники і може бути спрямована як вгору, так и вниз. Тому траверси доцільно робити симетричними відносно середньої

горизонтальної площини: якщо в шарі dz мається елемент траверси с кутом нахилу δ , то у симетричному шарі слід розташовувати елементи іншої траверси під кутом нахилу $(-\delta)$. Для такого елемента с кутом нахилу $(-\delta)$ вираз для повздовжньої сили розраховується за аналогічною формулою тільки з заміною знака на протилежний.

Якщо траверса горизонтальна і вся знаходиться в шарі товщиною ΔH , то для знаходження сумарної сили від такої траверси потрібно проінтегрувати при $\delta = 0$ вираз (2.60) по всій довжині траверси. Якщо, наприклад $r\omega + V_{1,2} \sin \beta > 0$, тоді:

$$X_{1,2mp}^{zop} = \frac{N\rho}{4\pi} c'_x(0) \int_{r_1}^{r_2} bdr \int_{\frac{\pi}{2}\left(-\frac{\pi}{2}\right)}^{\frac{3\pi}{2}\left(\frac{\pi}{2}\right)} U_{1,2}^2 \sin \beta d\beta. \quad (2.61)$$

При цьому останній інтеграл у виразі (2.61) дорівнює $r\omega V_{1,2}\pi$.

Якщо довжина хорди траверси змінюється уздовж r за лінійним законом:

$$b(r) = b_1 + \frac{b_2 - b_1}{r_2 - r_1} (r - r_1), \quad (2.62)$$

де b_1 – довжина хорди траверси біля комля ($r = r_1$); b_2 – у місці кріплення до лопаті, або у місці переходу від горизонтальної ділянки до похилої ($r = r_2$), то інтеграл по dr в (2.61) обчислюється точно, і остаточно будемо мати вирази:

$$X_{1,2mp}^{zop} = \frac{N}{4} \rho c'_x(0) \omega R^3 V_{1,2}^3 f_1, \quad (2.63)$$

де

$$f_1 = \frac{1}{2} (r_1 + r_2) (\bar{b}_1 \bar{r}_2 - \bar{b}_2 \bar{r}_1) + \frac{1}{3} (\bar{b}_2 - \bar{b}_1) (\bar{r}_2^2 + \bar{r}_2 \bar{r}_1 + \bar{r}_1^2),$$

$$\bar{r}_1 = \frac{r}{R}, \bar{b}_1 = \frac{b_1}{R}, \text{ і т.д.}$$

Прирівнюючи тепер вирази для сил, отриманих за допомогою закону про зміну імпульсу (2.55) та (2.57) та через аеродинамічні коефіцієнти, отримуємо наступну систему рівнянь для знаходження невідомих швидкостей V_1 та V_2 :

- для навітряної частини:

$$\frac{V_0}{V_1} - 1 = F_1, \quad (2.64)$$

- для підвітряної частини:

$$2 \frac{V_1}{V_2} - \frac{V_0}{V_2} - 1 = F_2, \quad (2.65)$$

де

$$\begin{aligned} F_{1,2} = & \mu_1 \int_{\frac{\pi}{2}(-\frac{\pi}{2})}^{\frac{3\pi}{2}(\frac{\pi}{2})} \bar{W}_{1,2}^2 (c_x \sin(\beta - \psi) - c_y \cos(\beta - \psi)) d\beta + \\ & + \varphi \mu_2 \int_{\frac{\pi}{2}(-\frac{\pi}{2})}^{\frac{3\pi}{2}(\frac{\pi}{2})} \bar{U}_{1,2}^2 \{ c'_x (\cos \alpha' \sin \beta - \sin \delta \sin \alpha' \cos \beta) + \\ & - c'_y (\sin \delta \cos \alpha' \cos \beta + \sin \alpha' \sin \beta) \} d\beta + \\ & + \chi \mu_3 \rho c'_x(0) \frac{\omega R^2}{V_{1,2}} \frac{R}{\Delta H} f_1, \end{aligned} \quad (2.66)$$

де

$$\begin{aligned} \bar{W}_{1,2}^2 &= \left(\frac{W_{1,2}}{V_{1,2}} \right)^2 = \frac{(R\omega)^2 + 2V_{1,2}R\omega \sin \beta + V_{1,2}^2}{V_{1,2}^2}, \\ \bar{U}_{1,2}^2 &= \frac{V_{1,2}^2 \sin^2 \delta \cos^2 \beta}{V_{1,2}^2} + \frac{(r\omega + V_{1,2} \sin \beta)^2}{V_{1,2}^2}, \end{aligned}$$

а також введено наступні позначення:

$$\mu_1 = \frac{Nl}{16\pi Rk}, \quad \mu_2 = \frac{Nb}{16\pi Rk}, \quad \mu_3 = \frac{N}{16k}.$$

У виразі (2.66) введено множники ϕ та χ : множник $\phi = 1$ та $\phi = 0$ показує чи потрапив в розглянутий шар dz елемент похилої траверси чи ні, аналогічно множник $\chi = 1$ або $\chi = 0$ для горизонтальної траверси.

У виразі (2.66) входять безрозмірні швидкості:

- для навітряної частини:

$$\bar{W}_1 = \frac{W_1}{V_1}, \quad \bar{U}_1 = \frac{U_1}{V_1};$$

- для підвітряної частини:

$$\bar{W}_2 = \frac{W_2}{V_2}, \quad \bar{U}_2 = \frac{U_2}{V_2}.$$

Отже, при заданій швидкості вітру V_0 , частоті обертання та геометрії БЕУ система рівнянь (2.64), (2.65) являє собою систему двох трансцендентних рівнянь для розрахунку значень швидкостей V_1 та V_2 в залежності від V_0 , причому перше рівняння не залежить від другого і може бути вирішено самостійно, тоді як друге рівняння залежить від першого.

2.7. Знаходження коефіцієнта моменту та коефіцієнта потужності

Знайдемо сумарний крутний момент відносно осі БЕУ, який створюється в шарі ΔH . Миттєве значення моменту, яке створюється елементом однієї лопаті в шарі, виражається формулою (2.14). Середні значення сумарного моменту від всіх елементів лопатей окремо в навітряній та підвітряній частинах розраховуються виразами:

$$dM_{z1,2,l} = \frac{N}{4\pi} \rho l \Delta H \int_{\frac{\pi}{2}(-\frac{\pi}{2})}^{\frac{3\pi}{2}(\frac{\pi}{2})} W_{1,2}^2 \{ R(c_y \sin \psi - c_x \cos \psi) + \\ + l_0 (c_y \cos(\alpha_0 + \psi) + c_x \sin(\alpha_0 + \psi)) \} d\beta. \quad (2.67)$$

Середні значення сумарного моменту від всіх елементів траверс окремо в навітряній та підвітряній частинах розраховуються виразами:

$$dM_{z1,2mp} = \frac{N}{4\pi} \rho b \Delta H \int_{\frac{\pi}{2}(-\frac{\pi}{2})}^{\frac{3\pi}{2}(\frac{\pi}{2})} U_{1,2}^2 \{r(c'_y \sin \alpha' - c'_x \cos \alpha') + l'_0 \sin \delta (c'_y \cos \alpha' + c'_x \sin \alpha')\} d\beta. \quad (2.68)$$

Якщо в шарі товщиною ΔH знаходяться елемент $ds = dr$ горизонтальної траверси, то середнє значення сумарного моменту від горизонтальних траверс виражається формулою:

$$\begin{aligned} \Delta M_{z1,2mp}^{zop} &= -\frac{N}{4\pi} \rho c'_x(0) b r dr \int_{\frac{\pi}{2}(-\frac{\pi}{2})}^{\frac{3\pi}{2}(\frac{\pi}{2})} (r\omega + V_{1,2} \sin \beta)^2 d\beta = \\ &= -\frac{N}{2} \rho c'_x(0) dr dr \left(r^2 \omega^2 + \frac{1}{2} V_{1,2}^2 \right). \end{aligned} \quad (2.69)$$

Інтегруючи останній вираз по всій довжині траверси, можна отримати середнє значення сумарного моменту горизонтальної траверси. Загалом, сумарний середній крутний момент, що створюється в шарі ΔH , дорівнює:

$$M_{cp} = M_{z1l} + M_{z2l} + \phi(M_{z1mp} + M_{z2mp}) + \chi M_{z1,2mp}^{zop}. \quad (2.70)$$

При обертанні вітроколеса зі сталою кутовою швидкістю ω середня потужність, що розвивається за один оберт, дорівнює:

$$P_{cp} = M_{cp} \omega. \quad (2.71)$$

Локальні коефіцієнт крутного моменту і коефіцієнт потужності шару мають вигляд:

$$M_{cp} = c_m \frac{1}{2} \rho V_0^2 2R^2 \Delta H, \quad (2.72)$$

$$P_{cp} = c_m \frac{1}{2} \rho V_0^2 2R^2 \Delta H \omega = c_p \frac{1}{2} \rho V_0^3 2R \Delta H. \quad (2.73)$$

Отже прирівнюючи вирази (2.70) до (2.72) можна знайти коефіцієнт моменту c_m , а використовуючи вирази (2.44), (2.45) та (2.46) можна знайти коефіцієнт потужності c_p в залежності від V_0 та геометричних параметрів ВЕУ.

2.8. Методика розрахунку енергетичних характеристик вітроустановки з урахуванням залежності аеродинамічних характеристик елементів профілів лопатів від місцевого числа Рейнольдса

Для розрахунку задач використовувалися класичні профілі серії НАСА: 0012, 0015, 0018, 0021. Значення аеродинамічних коефіцієнтів цих профілів визначалися шляхом обробки масиву експериментальних даних, отриманих при дослідженнях їх характеристик у повному діапазоні кутів атак в аеродинамічних лабораторіях різних країн. Для розрахунку були використані аеродинамічні коефіцієнти вказаних профілів для різних чисел Рейнольдса у діапазоні $Re = 10^4 \div 5 \cdot 10^6$. Залежність аеродинамічних коефіцієнтів c_x та c_y від кута атаки в загальному випадку для вибраних профілів у всьому діапазоні кутів атаки від 0° до 180° мають типовий вигляд, показаний на рис. 2-6.

Для прикладу, залежність коефіцієнту підйомної сили c_y та коефіцієнту сили лобового опору c_x для профілю НАСА 0018 від числа Рейнольдса показано на рис. 2-7 та рис. 2-8 відповідно.

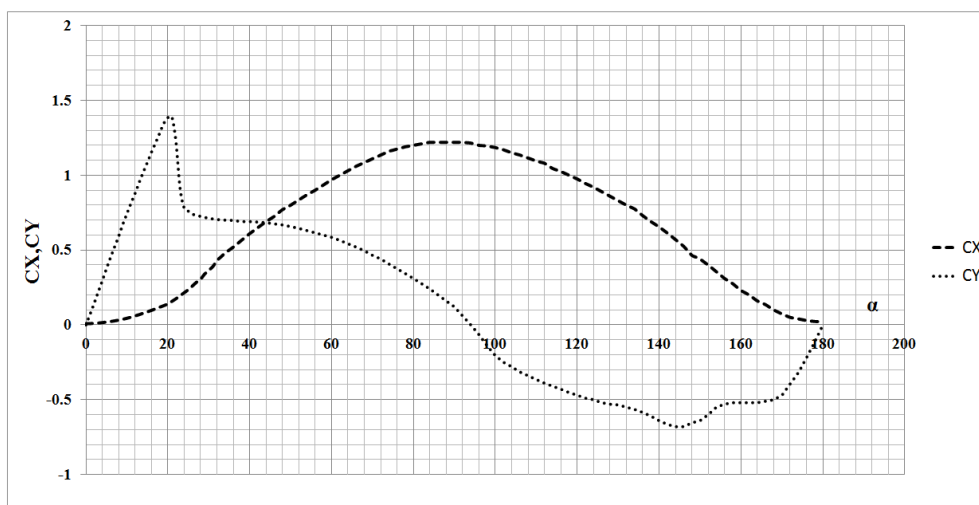


Рис. 2-6— Загальна залежність аеродинамічних коефіцієнтів c_x та c_y від кута атаки

Вказані профілі містять значення кутів α в діапазоні $(0; 180^\circ)$. Однак розрахунок коефіцієнтів c_x та c_y слід забезпечити в діапазоні $(-180^\circ; 180^\circ)$ значень цих кутів. Для від'ємних значень кута атаки застосовувались рівності, котрі справедливі для симетричних профілів:

$$c_x(\alpha) = c_x(-\alpha), c_y(\alpha) = -c_y(-\alpha).$$

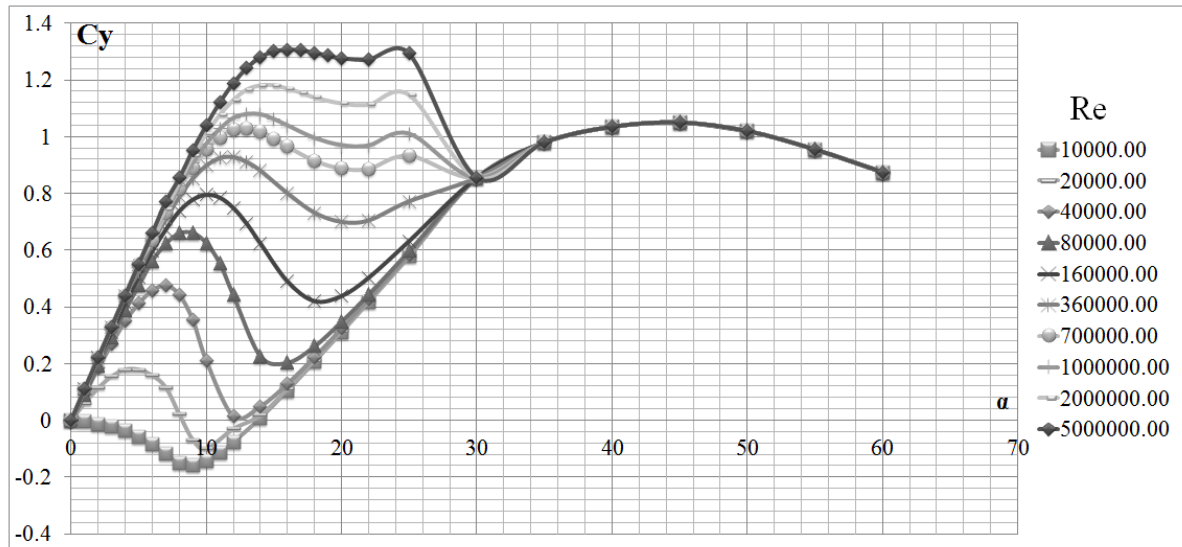


Рис. 2-7– Коефіцієнт підйомної сили c_y в залежності від кута атаки α та числа

$$\text{Рейнольдса } Re_0 = \frac{V_0 l}{\nu} \quad [19]$$

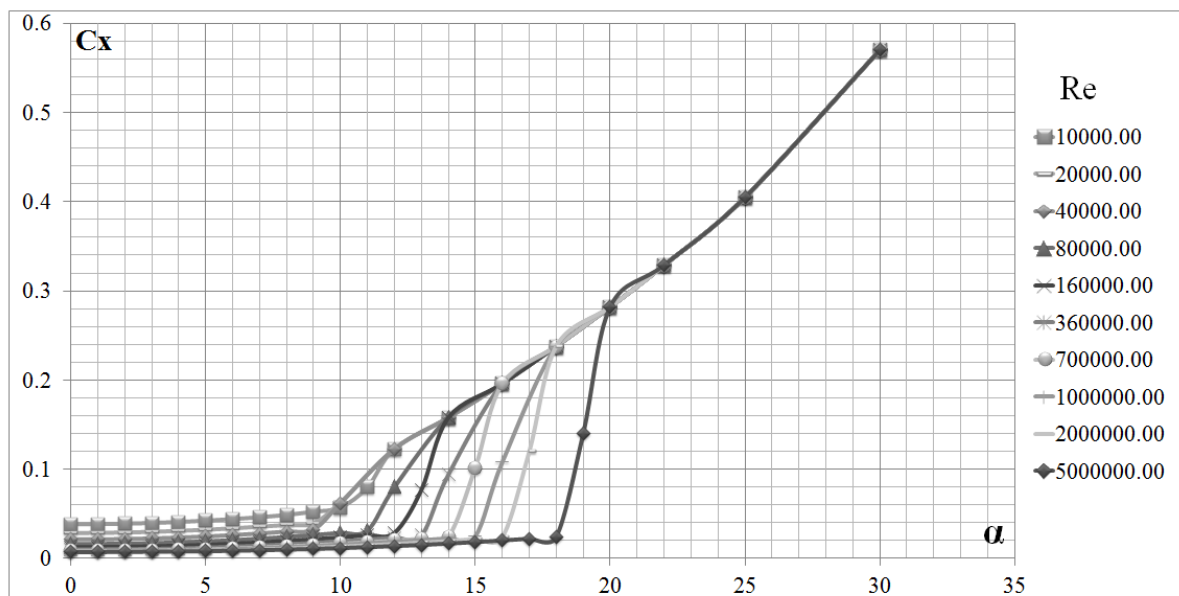


Рис. 2-8– Коефіцієнт сили лобового опору c_x в залежності від кута атаки α та

$$\text{числа Рейнольдса } Re_0 = \frac{V_0 l}{\nu} \quad [19]$$

Для вказаного класу профілів зміна коефіцієнтів c_x та c_y в залежності від числа Рейнольдса прослідковується лише при невеликих кутах атаки: $\alpha = 0 \div 30^\circ$.

З графіків залежностей коефіцієнтів c_x та c_y від числа Рейнольдса (рис.2-7 та рис.2-8) видно, що коефіцієнт підйомної сили c_y зростає зі збільшенням числа Рейнольдса, а коефіцієнт лобового опору c_x , навпаки, – зменшується.

У розрахунках для загальної фізичної моделі у класичному випадку прийнято, що число Рейнольдса, при обертанні ВЕУ по колу, має сталі значення, адже розрахунок проводиться при аеродинамічних характеристиках профілю при одному і тому ж числі Рейнольдса, а в удосконаленому - що число Рейнольдса залежить від швидкостей V_1 та V_2 – середніх значень швидкостей потоку у вітроколесі та місцевого кута атаки α .

Аеродинамічні коефіцієнти c_x та c_y при змінному числі Рейнольдса знаходились за допомогою лінійної локальної інтерполяції у проміжку двох фіксованих експериментальних табличних даних при використанні діапазону фіксованих чисел Рейнольдса та їх аеродинамічних коефіцієнтів. У загальному випадку, класична формула для локальної лінійної інтерполяції має вигляд [76]:

$$f(x_1) = f(x_0) + \frac{f(x_2) - f(x_0)}{x_2 - x_0}. \quad (2.74)$$

Інтерполяція проводилась не по самому числу Рейнольдса, а по його логарифму, вираз (2.74) для знаходження c_x та c_y при куті атаки $\alpha = const$ можна записати таким чином:

$$c_x(\lg Re_1) = c_x(\lg Re_0) + \frac{c_x(\lg Re_2) - c_x(\lg Re_0)}{\lg Re_2 - \lg Re_0}, \quad (2.75)$$

$$c_y(\lg Re_1) = c_y(\lg Re_0) + \frac{c_y(\lg Re_2) - c_y(\lg Re_0)}{\lg Re_2 - \lg Re_0}. \quad (2.76)$$

Вирази (2.75) та (2.76) інтерполюються у логарифмічних величинах задля більшої точності, адже зазвичай число Рейнольдса знаходиться у діапазоні великих чисел $Re = 10^4 \div 5 \cdot 10^6$.

2.9. Методика розрахунку енергетичних характеристик БЕУ за однодисковою теорією

Як вказувалось раніше, перше рівняння (2.64) системи знаходження швидкостей V_1 та V_2 у вітроколесі не залежить від другого (2.65) і може бути вирішено самостійно, тоді як друге рівняння залежить від першого. Інколи, розв'язок системи двох трансцендентних рівнянь з двома невідомими швидкостями являє собою труднощі, адже прямий метод послідовних наближень за двома параметрами дає добрий результат тільки в деякому діапазоні зміни шуканих V_1 та V_2 . Для переходу від дводискової імпульсної теорії до однодискової маємо використати перше рівняння системи, маючи на увазі те, що швидкість потоку V_1 відповідає за середнє значення швидкості потоку у всьому вітроколесі.

Згідно з припущеннями, якщо не враховувати вплив траверси, маємо таке рівняння:

$$\frac{V_1}{V_0} - 1 = F_1, \quad (2.77)$$

де права частина рівняння, вираз для сили, що діє на лопать, має вигляд:

$$F_1 = \mu_1 \int_0^{2\pi} \vec{W}_1^2 (c_x \sin(\beta - \psi) - c_y \cos(\beta - \psi)) d\beta, \quad (2.78)$$

$$\vec{W}_1^2 = \left(\frac{W_1}{V_1} \right)^2 = \frac{(R\omega)^2 + 2V_1 R\omega \sin \beta + V_1^2}{V_1^2}. \quad (2.79)$$

Перепишемо рівняння (2.77) у вигляді:

$$V_0 = V_1(F_1 + 1). \quad (2.80)$$

Права частина рівняння (2.80) залежить тільки від V_1 , тому можна знаходити залежність:

$$V_0 = f(V_1) \quad (2.81)$$

Задаючи діапазон чисел V_1 та ωR можна отримати діапазон чисел V_0 . Проте цей спосіб не є зовсім коректним. Якщо записати рівняння (2.77) відносно невідомої швидкості V_1 :

$$V_1 = \frac{V_0}{F_1 + 1}, \quad (2.82)$$

то можна використовувати класичний метод ітерацій – метод послідовних наближень [76].

Сумарний крутний момент відносно осі БЕУ у припущенні, що центр тиску профілю співпадає з серединою хорди, для однієї лопаті має вигляд:

$$M_{z1} = \frac{1}{2} \rho W^2 l dz R (c_y(\text{Re}, \alpha) \sin \psi - c_x(\text{Re}, \alpha) \cos \psi) \quad (2.83)$$

Середнє значення сумарного моменту має вигляд:

$$M_{z1} = \frac{N}{4\pi} \rho l H V_1^2 \int_0^{2\pi} R W_1^2 (c_y(\text{Re}, \alpha) \sin \psi - c_x(\text{Re}, \alpha) \cos \psi) d\beta, \quad (2.84)$$

$$M_{z1} = \frac{N}{4\pi} \rho l H \cdot \Phi(V_1, \omega R), \quad (2.85)$$

де

$$\begin{aligned} \Phi(V_1, \omega R) = \int_0^{2\pi} R \left[(R\omega)^2 + 2V_1 R \omega \sin \beta + V_1^2 \right] & \left[c_y(\text{Re}, \alpha) \cdot \sin \psi - \right. \\ & \left. - c_x(\text{Re}, \alpha) \cos \psi \right] d\beta. \end{aligned} \quad (2.86)$$

Середня потужність, що розвивається за один оберт:

$$P_{cp} = M_{cp} \omega. \quad (2.87)$$

Локальні коефіцієнт крутного моменту і коефіцієнт потужності шару мають вигляд:

$$M_{cp} = c_m \frac{1}{2} \rho V_0^2 2R^2 H, \quad (2.88)$$

$$P_{cp} = c_m \frac{1}{2} \rho V_0^2 2R^2 H \omega = c_p \frac{1}{2} \rho V_0^3 2RH. \quad (2.89)$$

Прирівнюючи вирази (2.85) та (2.88), отримуємо:

$$M_{cp} = c_m \frac{1}{2} \rho V_0^2 2R^2 H = \frac{N}{4\pi} \rho c H \Phi(V_1, \omega R). \quad (2.90)$$

Остаточно:

$$c_m = \frac{Nc}{4\pi} \cdot \frac{1}{(V_0 R)^2} \Phi(V_1, \omega R);$$

$$c_p = c_m \cdot \frac{\omega R}{V_0}. \quad (2.85)$$

2.10. Висновки до розділу 2

Основні результати, отримані у другому розділі, можна сформулювати таким чином: було розглянуті геометричні та кінематичні параметри елементів ВЕУ лопаті та траверси, отримано систему рівнянь зв'язку швидкостей у навітряній та підвітряній частинах окресленого об'єму вітроколеса, у математичному плані реалізація дводискової імпульсної теорії зводиться до наступного алгоритму: сили, що діють на лопаті та траверси, з одного боку, виражаються через аеродинамічні коефіцієнти профілів лопаті та траверс (розраховуються за місцевими кутами атаки та місцевими відносними швидкостями, які заздалегідь невідомі); з іншого боку – ці ж самі сили виражаються за допомогою теореми імпульсів. Прирівнявши вирази для сил, отриманих вказаними двома способами, для кожного з активних перерізів, ми отримали систему двох трансцендентних рівнянь, з якої знаходяться величини так званих індукованих швидкостей потоку, точніше, відношення V_1/V_0 та V_2/V_0 в навітряній та підвітряній частинах окресленого об'єму вітроенергетичної установки. При цьому рівняння для навітряної частини вдається розв'язати безпосередньо відносно V_1/V_0 незалежно від рівняння для підвітряної частини, а це останнє рівняння, в свою чергу, залежить від розв'язку рівняння для

навітряної частини. Враховуючи цей факт, у розділі також було викладено однодискову імпульсну теорію.

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІТРОУСТАНОВКИ З УРАХУВАННЯМ ЗАЛЕЖНОСТІ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФІЛІВ ЛОПАТЕЙ ВІД ЛОКАЛЬНОГО ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА

3.1. Аналіз обраних профілів для розрахунку

При розрахунку основних аеродинамічних характеристик профілю ВЕУ, а також його стійкості та керованості необхідно знати сили та моменти, що діють на ВЕУ.

Аеродинамічні сили, що діють на поверхню профілю – тиск і тертя, можна привести до головного вектора аеродинамічних сил \vec{R}_0 , прикладеного в центрі тиску (рис.3-1), і пари сил, момент яких дорівнює головному моменту аеродинамічних сил відносно центра мас.

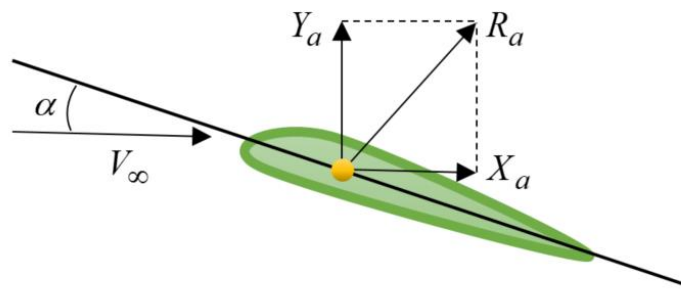


Рис. 3-1 – Повна аеродинамічна сила та її проекції у двовірному випадку

Основні глобальні геометричні характеристики профілю задаються такими основними параметрами, як довжина і товщина хорди. Хордою профілю називається відрізок прямої, що з'єднує дві найвіддаленіші точки профілю. Хорда ділить профіль на дві частини: верхню та нижню. Найбільший перпендикулярний хорді відрізок, укладений між верхнім та нижнім обводами профілю, називається товщиною профілю h . Лінія, що з'єднує середини відрізків, перпендикулярних хорді та укладених між верхнім та нижнім обводами профілю, називається середньою лінією. Найбільший перпендикулярний хорді відрізок, укладений між хордою та середньою лінією

профілю, називається кривизною профілю f . Якщо $f=0$, то профіль називається симетричним.

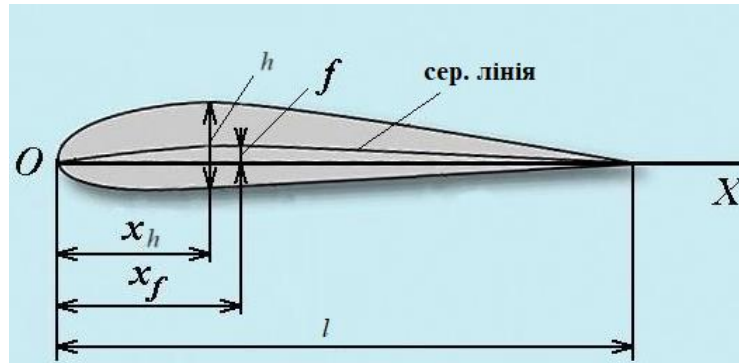


Рис. 3-2 – Профіль крила

На рис.3-2 в схемі профілю крила показано: l – довжина хорди профілю, h – товщина профілю, а також координати x_f та x_h , які, як правило, вимірюють у відносних величинах, або відсотках.

3.2. Розрахунок енергетичних характеристик вітроустановки в залежності від основних геометричних параметрів вітродвигуна

Для вітроенергетичної установки вибір профілю зумовлено малою дозвуковою швидкістю обтікання, тому в даній роботі за основу було обрано серію звичайних симетричних профілів НАСА з чотирьохзначними позначеннями: 0012, 0015, 0018, 0021.

Для зручності введемо параметр γ – параметр, котрий пов'язує геометричні параметри вітроустановки:

$$\gamma = \frac{l}{R}, \quad (3.1)$$

де R – радіус вітроустановки, l – довжина хорди лопаті.

Висота вітроустановки H була прийнята за одиничне значення: $H = 1\text{ м}$, коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря прийнято за нормальних умов: $\nu = 15.06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Розрахунки проводились при врахуванні змінності місцевого числа Рейнольдса, котре перераховується в залежності від зміни кута установки лопаті до потоку вітру та азимутального кута β .

У класичній дводисковій схемі розрахунку ВОВД не враховується той факт, що окремі елементи лопаті обтікаються кожен зі своєю відносною швидкістю набіжного потоку, тому кожен елемент лопаті має своє особисте локальне місцеве число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{лок}} = \frac{|W|l}{\nu} . \quad (3.2)$$

Це локальне число Рейнольдса (3.2) є заздалегідь невідомим, оскільки заздалегідь нам невідомі швидкості V_1 та V_2 (при дводисковій моделі), чи V_1 (при однодисковій моделі), тому що вітровий потік в окресленому об'ємі вже є дещо “пом’ятим”, він втрачає деяку частку своєї незбуреної швидкості за рахунок роботи по переміщенню лопатей ВЕУ і передачі їм частини своєї кінетичної енергії.

Усі подальші графіки подані в залежності від коефіцієнту швидкохідності:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_0} . \quad (3.3)$$

Швидкохідність вітроколеса є одним із найважливішим його параметром, що визначає основні конструктивні рішення по вітроустановці. Вона залежить від трьох основних величин ВЕУ: діаметра вітроколеса, швидкості обертання вітроколеса і швидкості вітру.

Загалом, турбіни з горизонтальною віссю і високим коефіцієнтом швидкохідності мають найбільше значення коефіцієнта використання енергії вітру $c_p = 0.46 \div 0.48$. Віротурбіни з вертикальним розташуванням осі менш ефективні $c_p = 0.45$, але вони мають ту перевагу, що не вимагають підстроювання під напрямки вітру.

На рис. 3-3 – рис. 3.22 показано коефіцієнти потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру $V_0 = 5 \text{ м/с}$, $V_0 = 7 \text{ м/с}$, $V_0 = 10 \text{ м/с}$, $V_0 = 13 \text{ м/с}$ та $V_0 = 15 \text{ м/с}$ при різних кількостях лопатей $N = 2 \div 6$ та профілів НАСА 0012, 0015, 0018 та 0021.

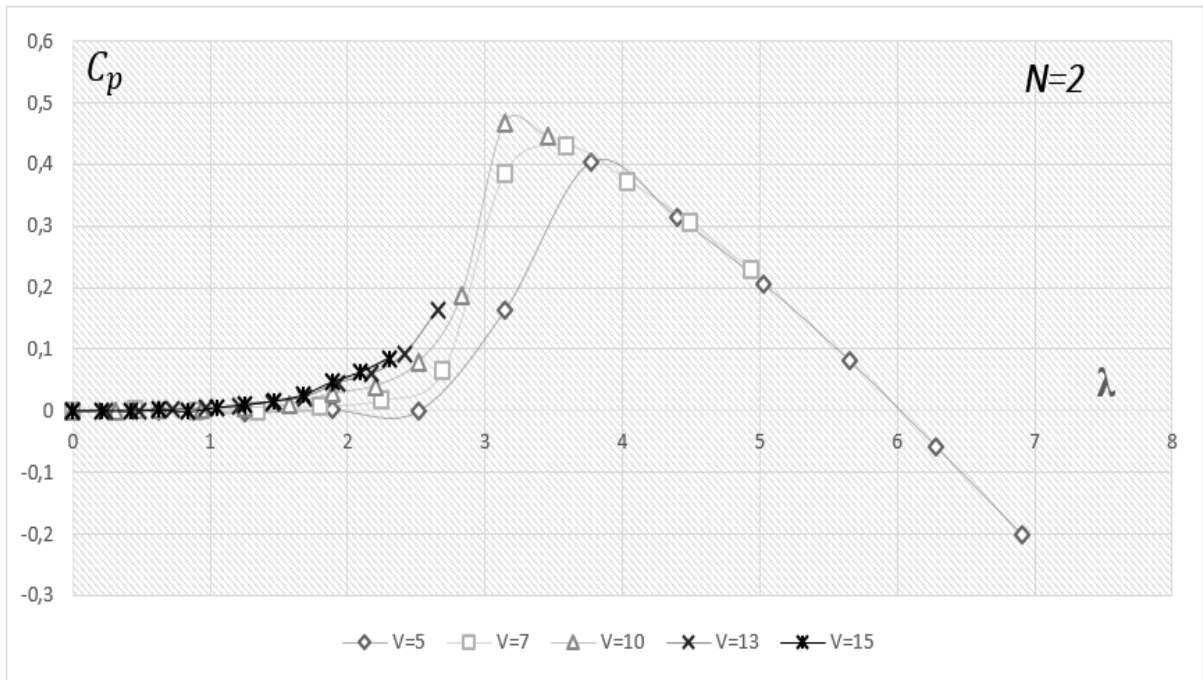


Рис. 3-3 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю NACA 0012

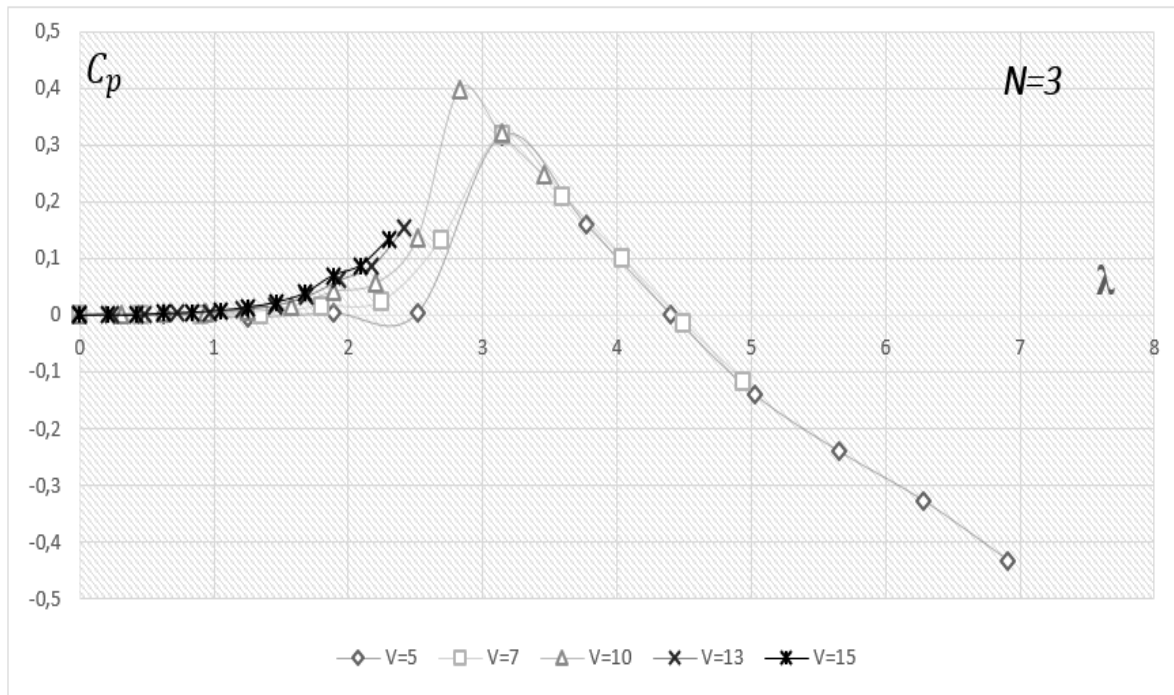


Рис. 3-4 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю NACA 0012

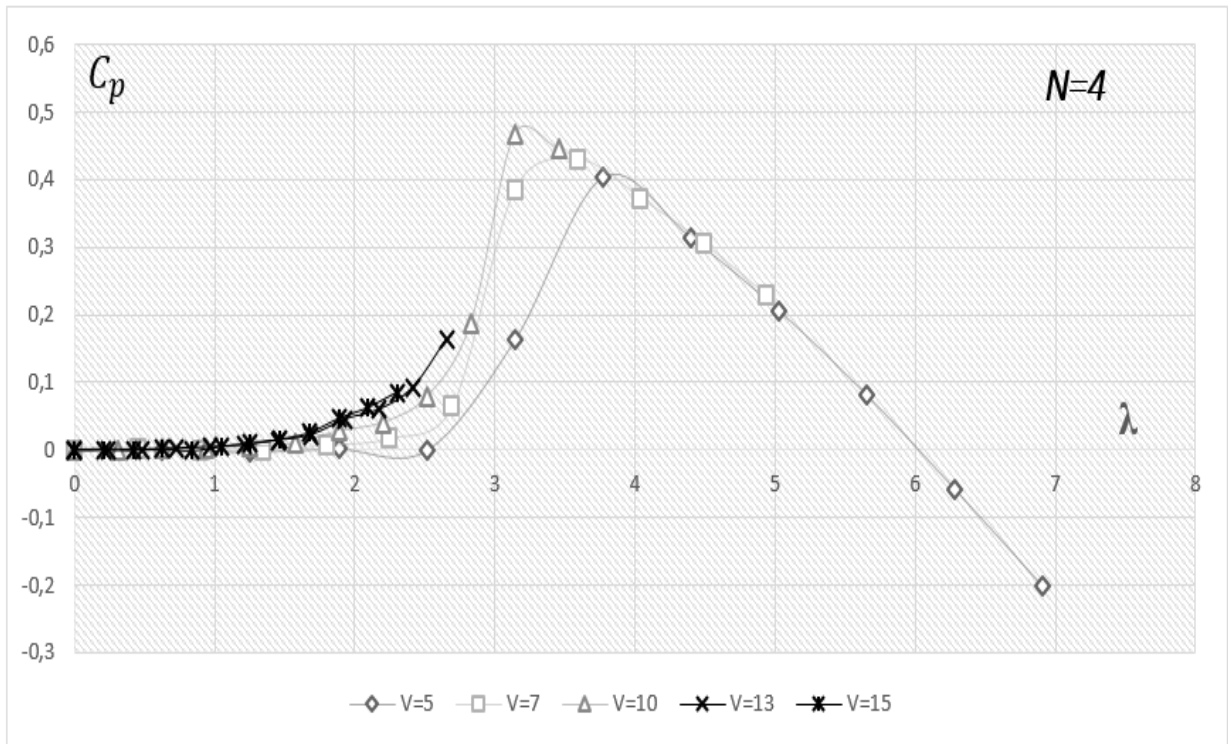


Рис. 3-5 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=4$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю NACA 0012

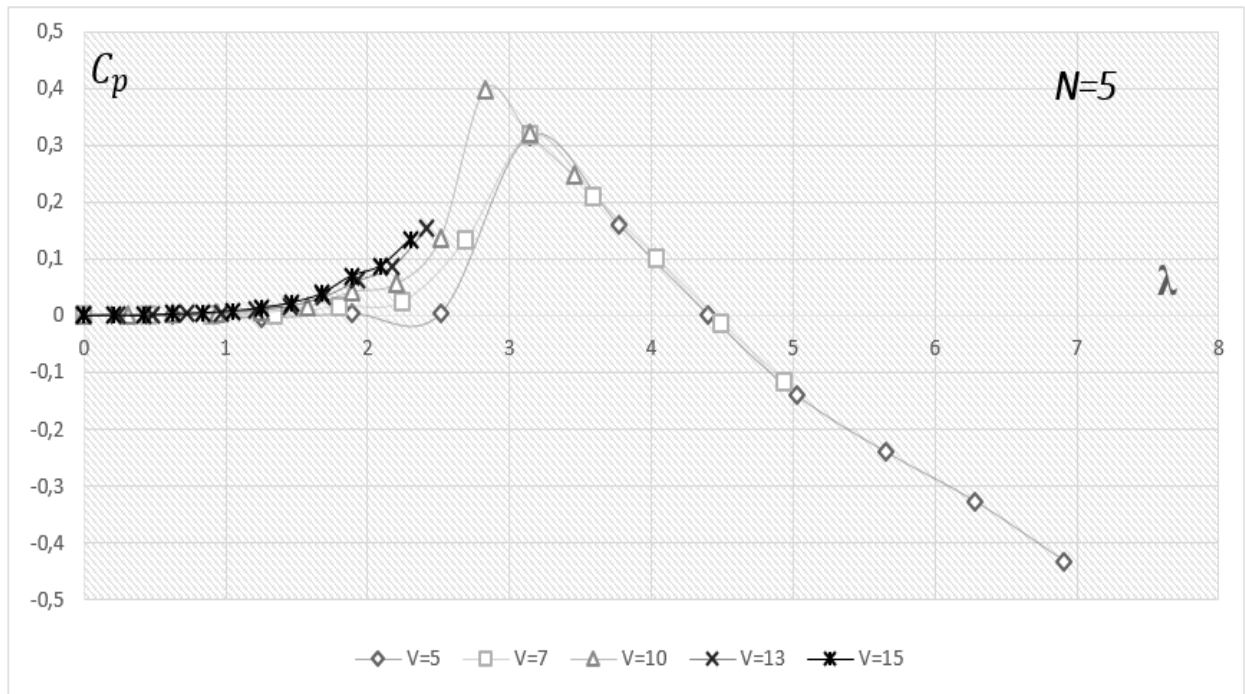


Рис. 3-6 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=5$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю NACA 0012

На рис. 3-3 – рис. 3.22 показано коефіцієнти потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру, різних кількостях лопатей та профілів НАСА 0012, 0015, 0018 та 0021.

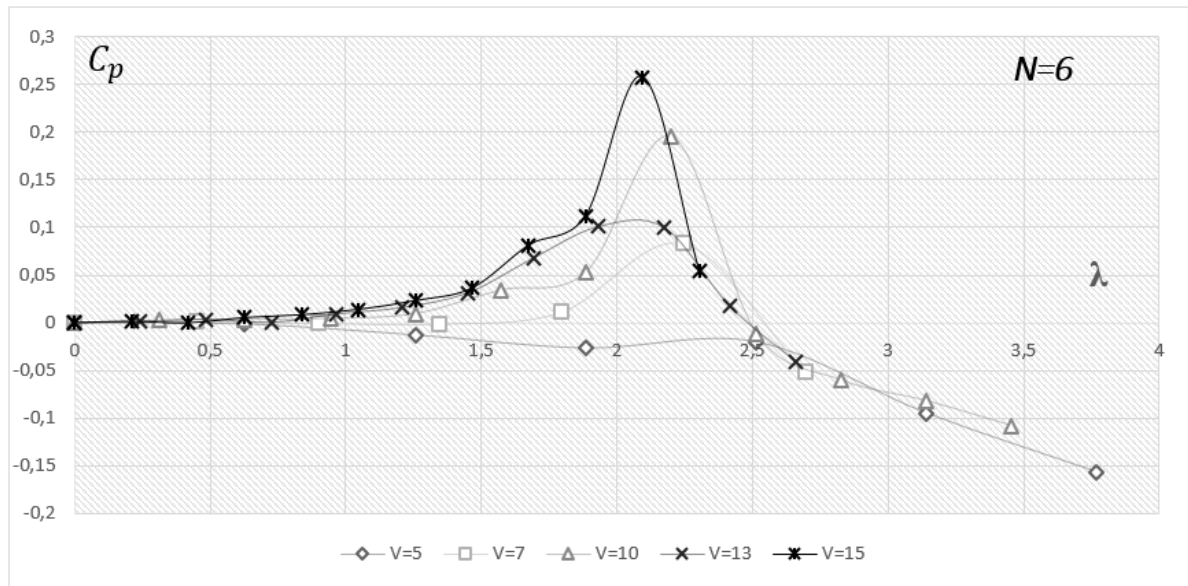


Рис. 3-7 – Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=6$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю НАСА 0012

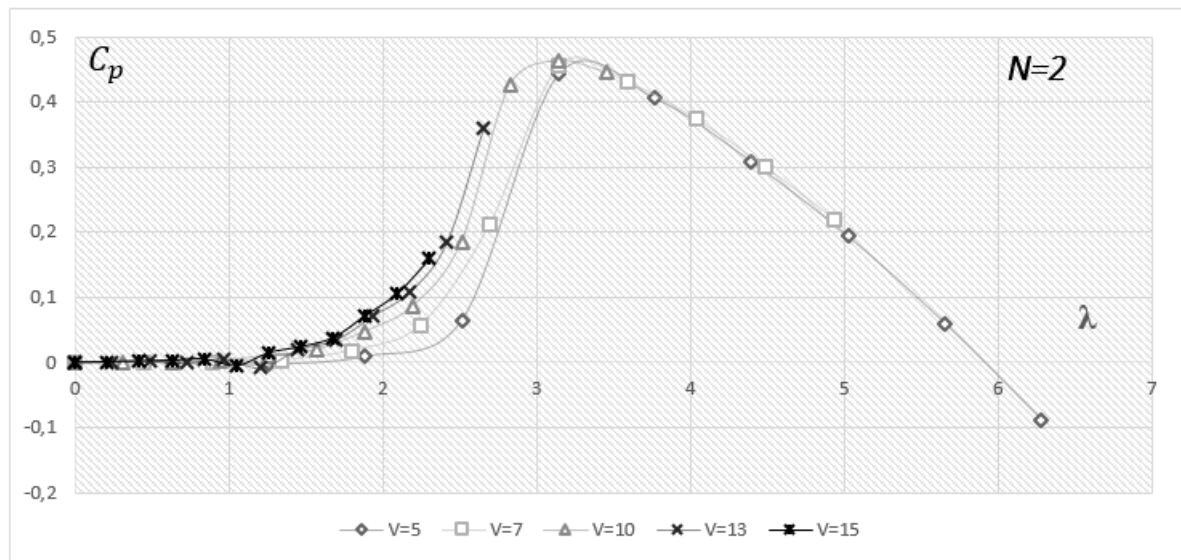


Рис. 3-8 – Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю НАСА 0015

Розрахунки показали, що при зменшенні кількості лопатей максимум значення коефіцієнта потужності зміщується в сторону зменшення числа швидкохідності. Зі збільшенням кількості лопатей модельного вітроагрегату ефективний діапазон його роботи зменшується.

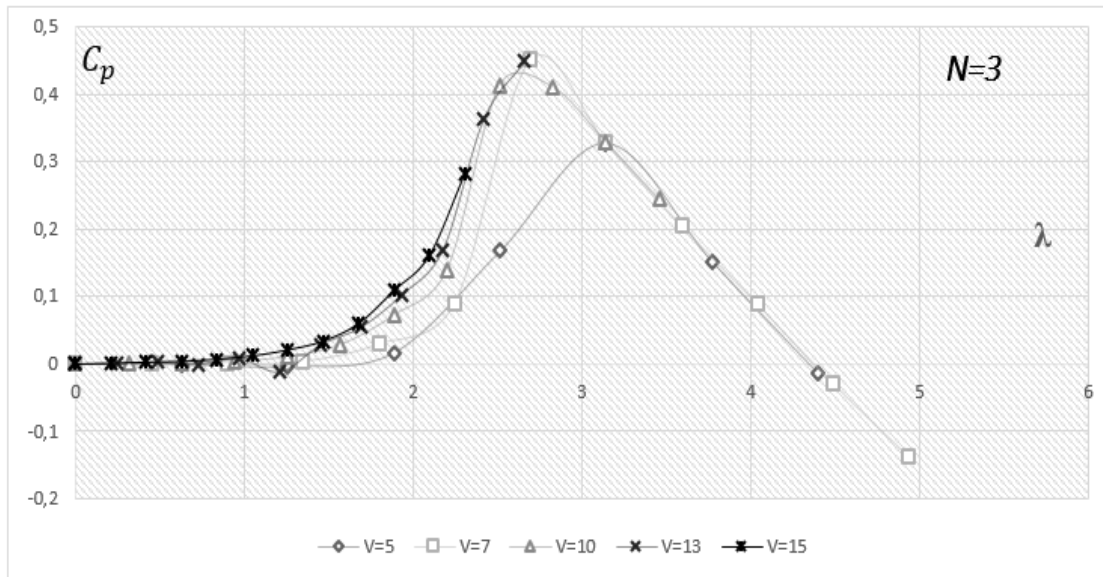


Рис. 3-9 – Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю NACA 0015

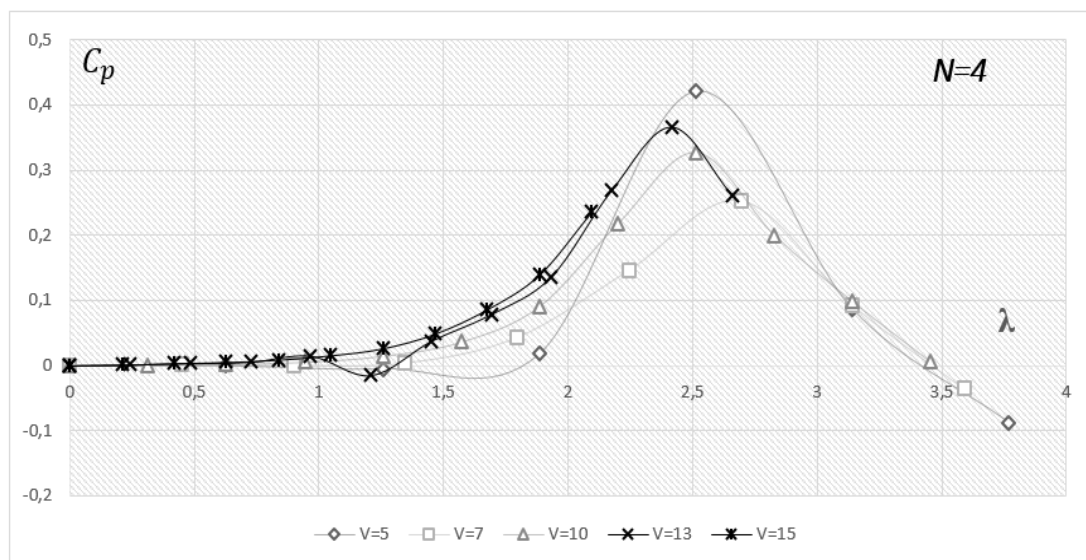


Рис. 3-10 – Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=4$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю NACA 0015

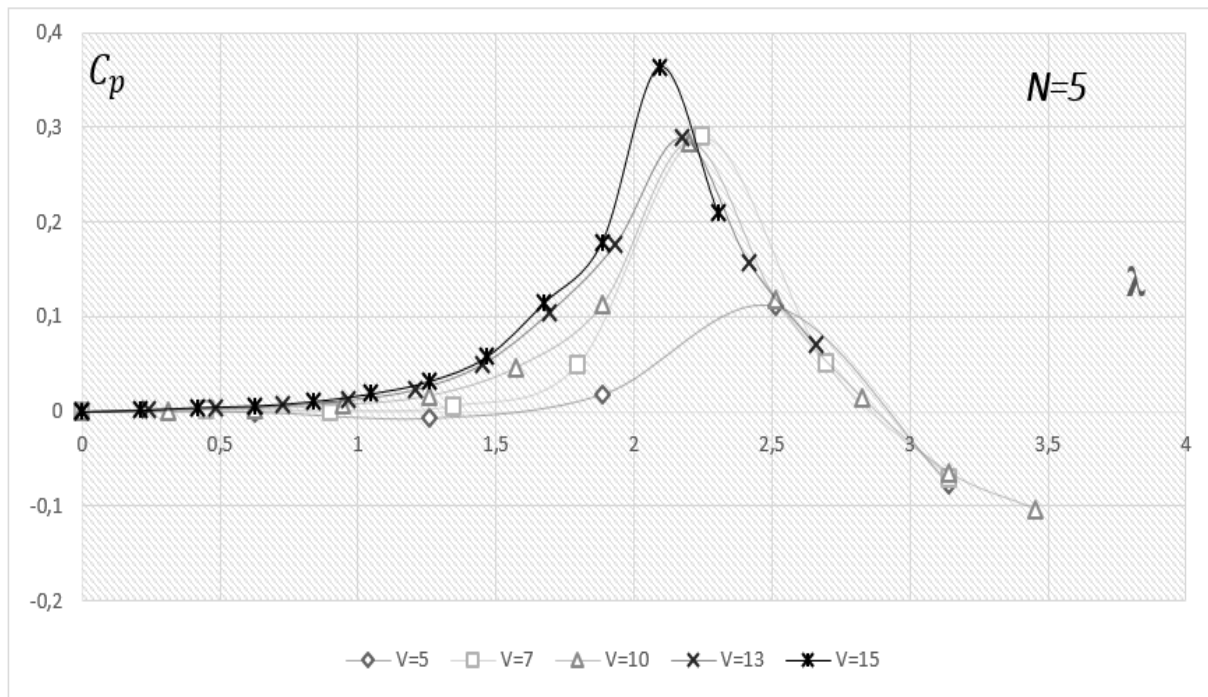


Рис. 3-11 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=5$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю NACA 0015

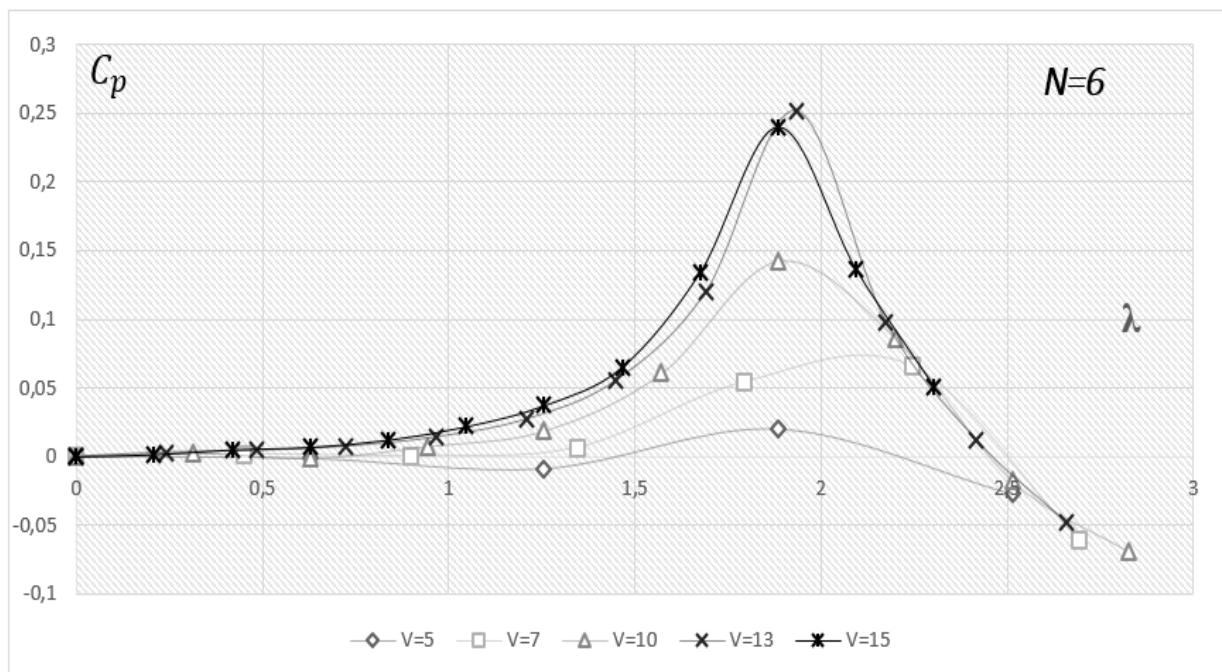


Рис. 3-12 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=6$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю NACA 0015

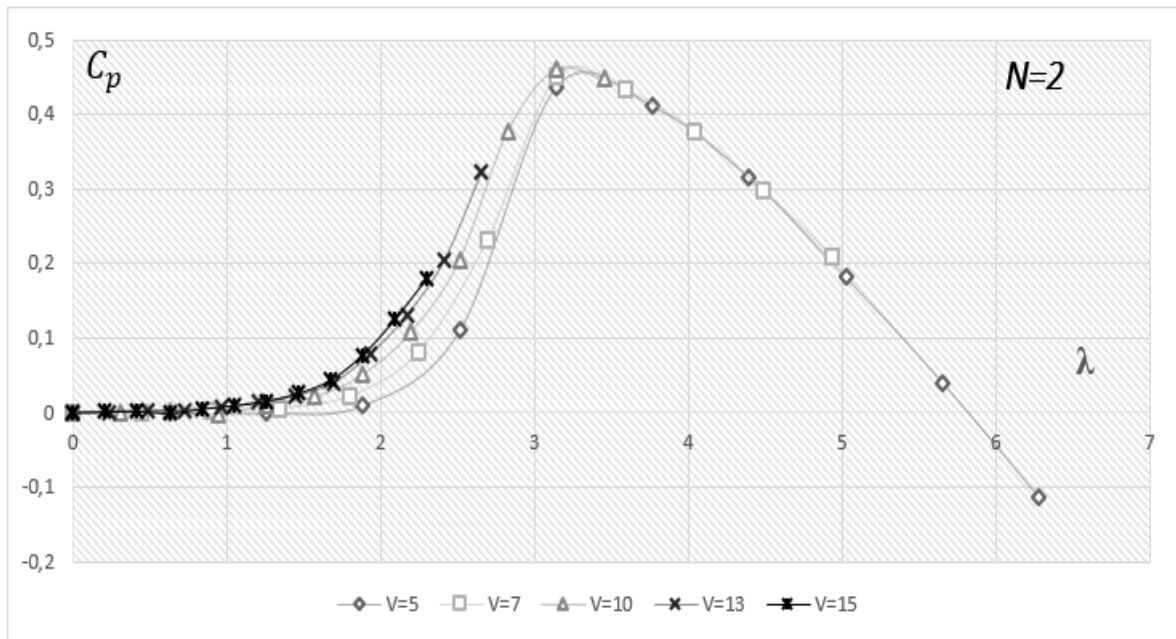


Рис. 3-13 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнту $\gamma=0,2$ та профілю NACA 0018

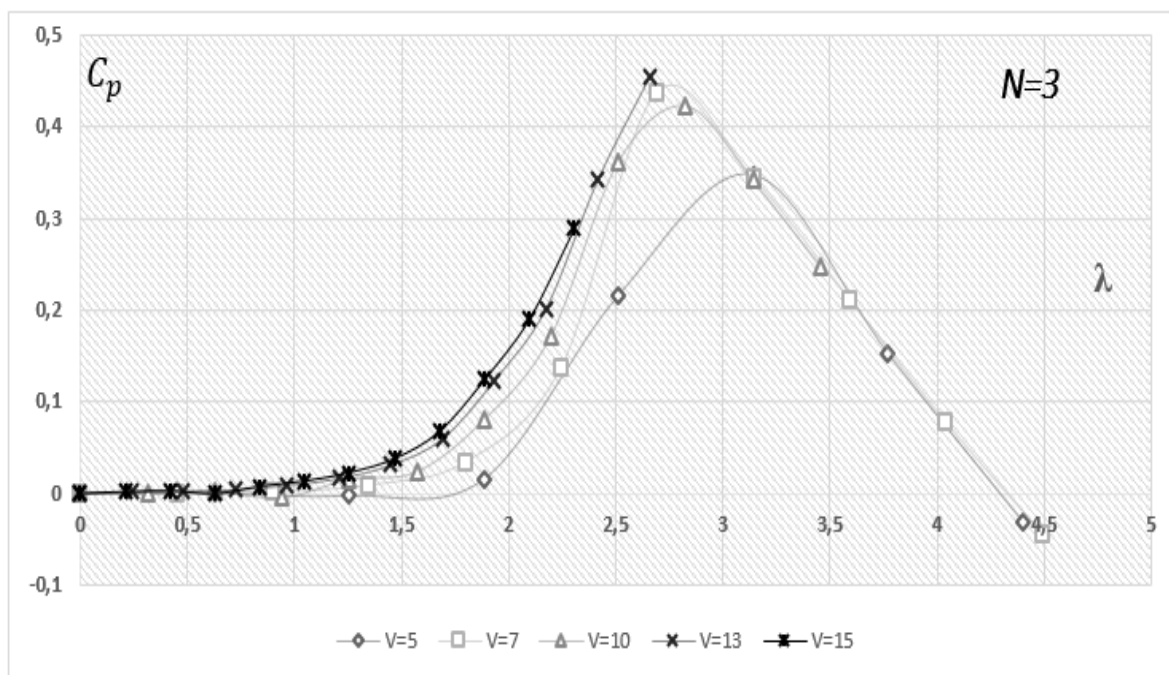


Рис. 3-14 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнту $\gamma=0,2$ та профілю NACA 0018

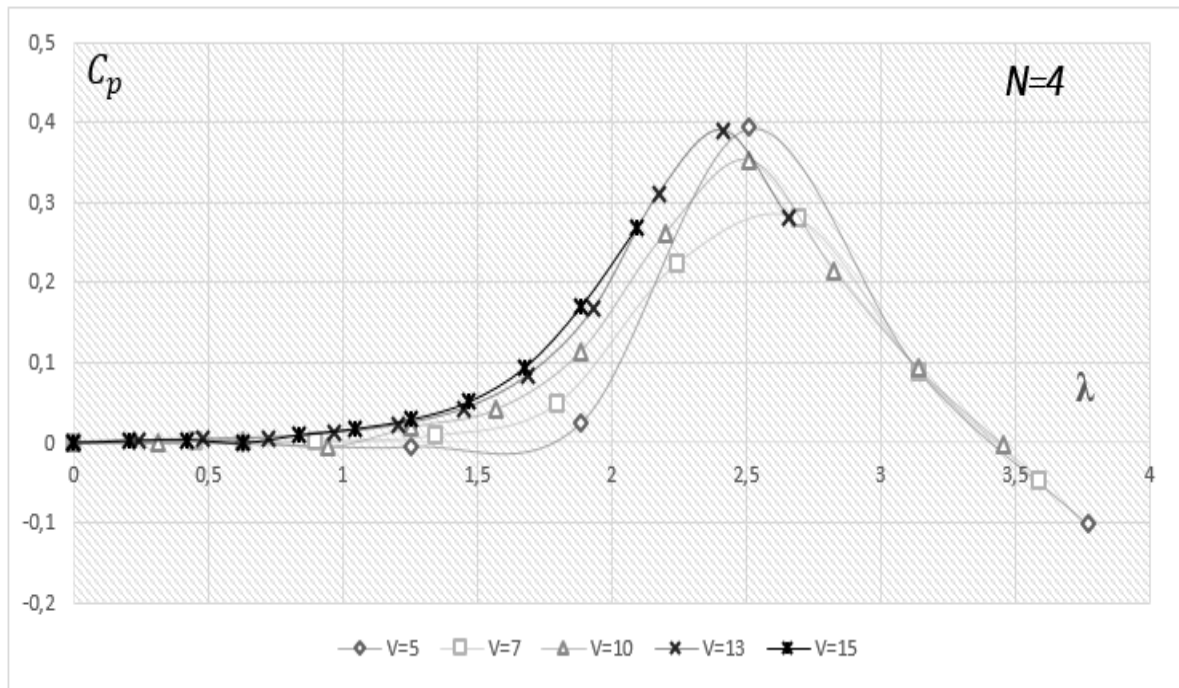


Рис. 3-15 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=4$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю NASA 0018

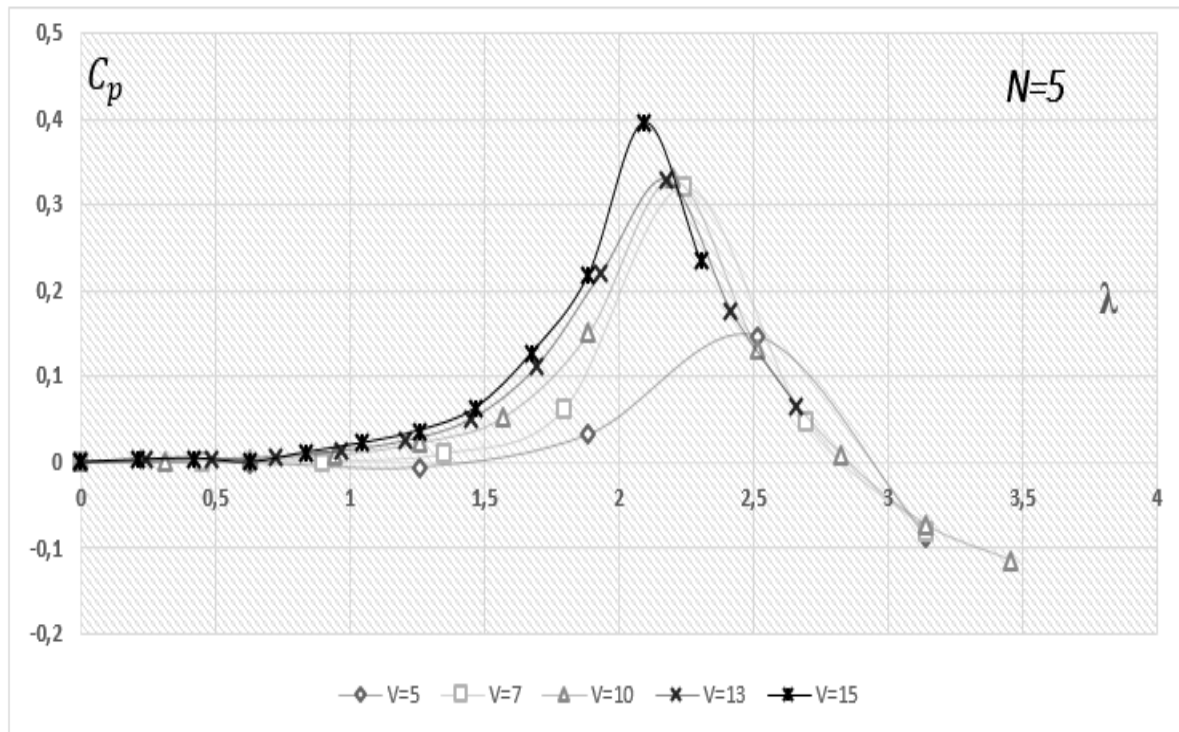


Рис. 3-16 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=5$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю NASA 0018

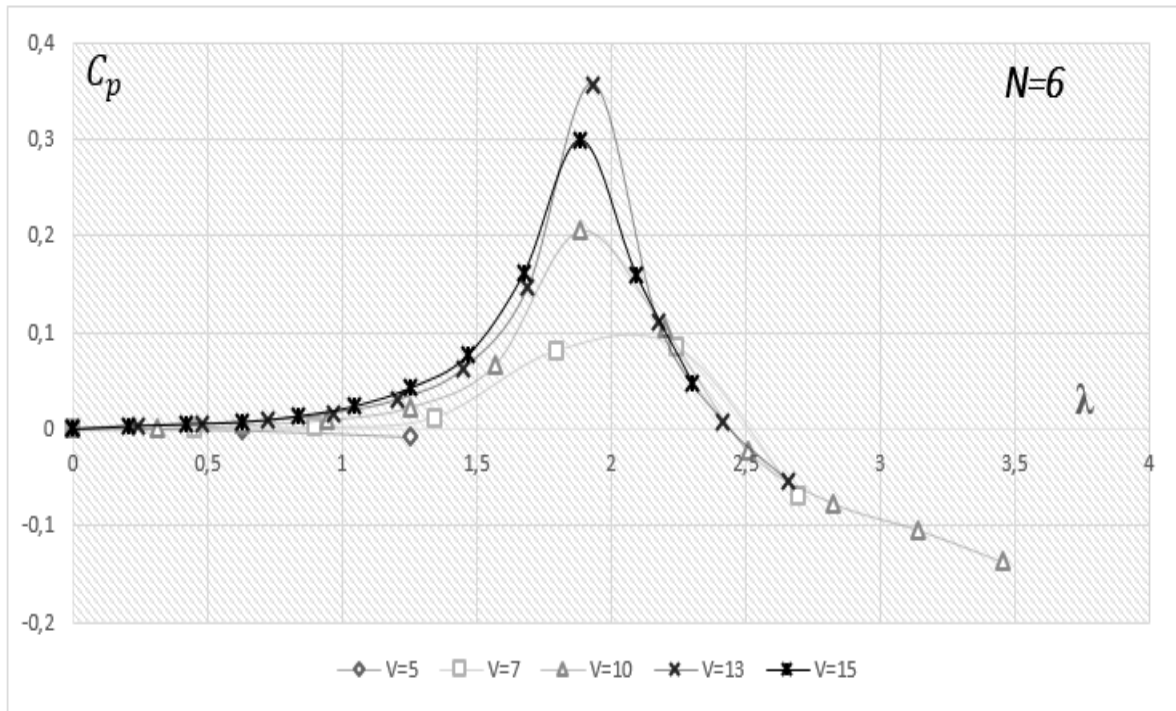


Рис. 3-17 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=6$, коефіцієнту $\gamma=0,2$ та профілю NASA 0018

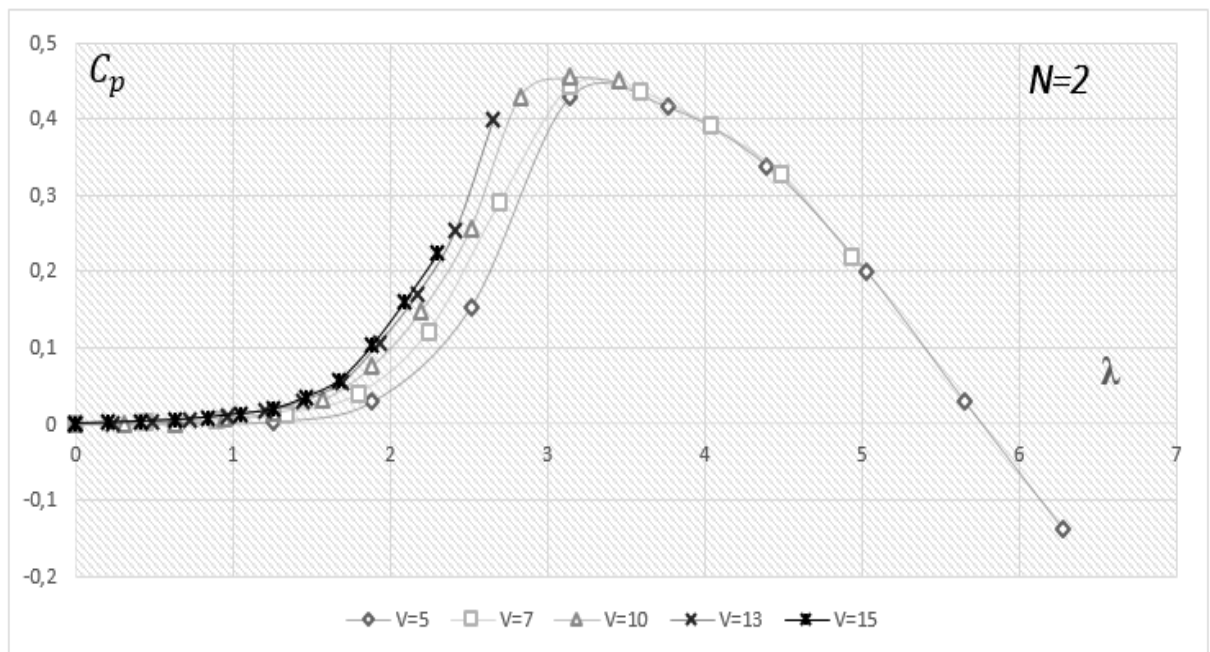


Рис. 3-18 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнту $\gamma=0,2$ та профілю NASA 0018

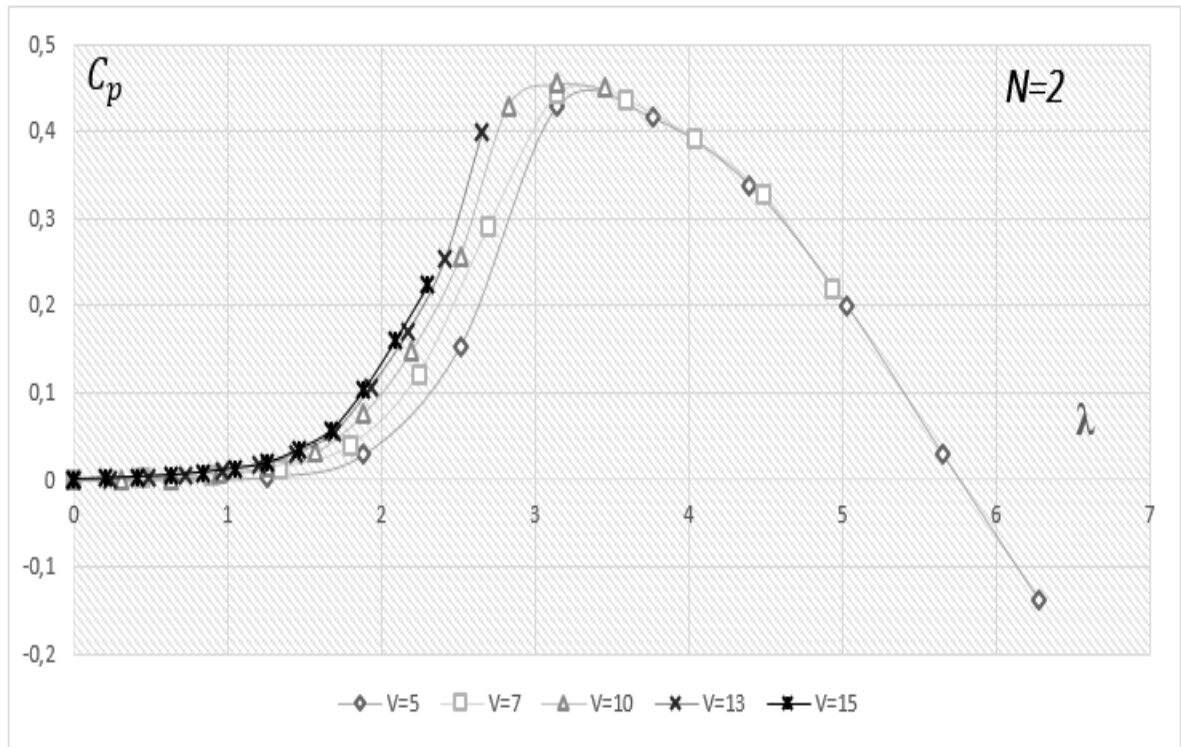


Рис. 3-19 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю NACA 0021

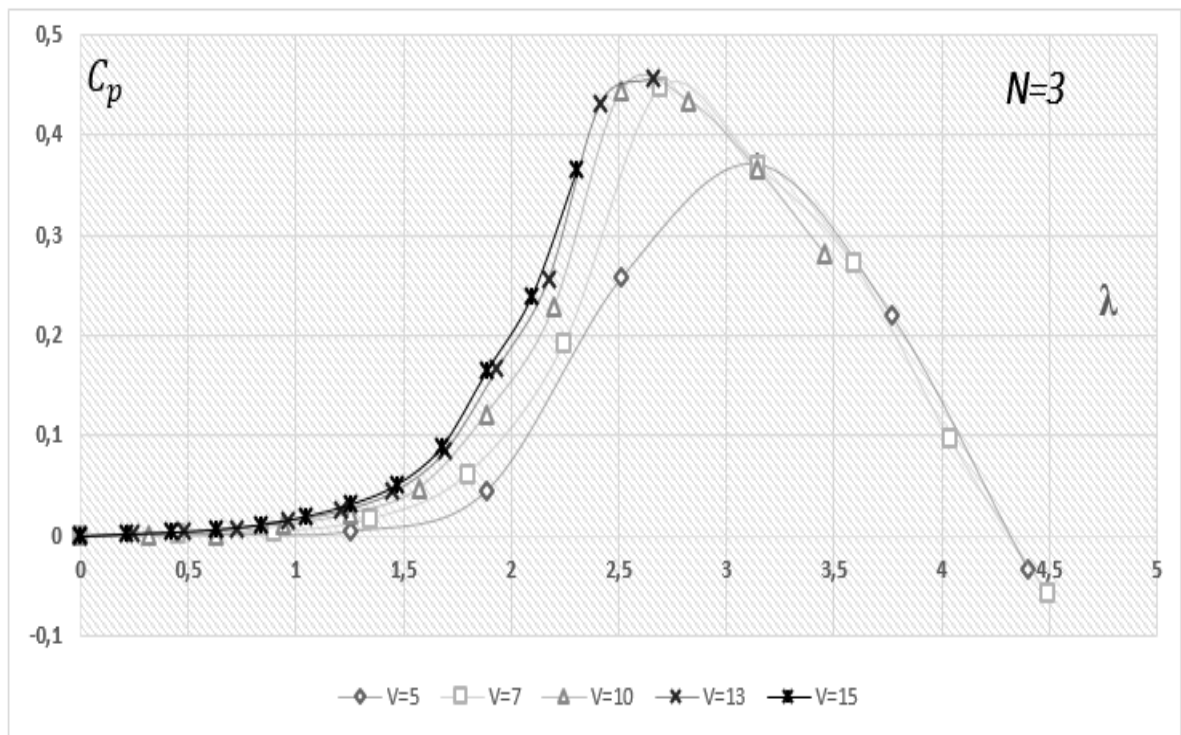


Рис. 3-20 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю NACA 0021

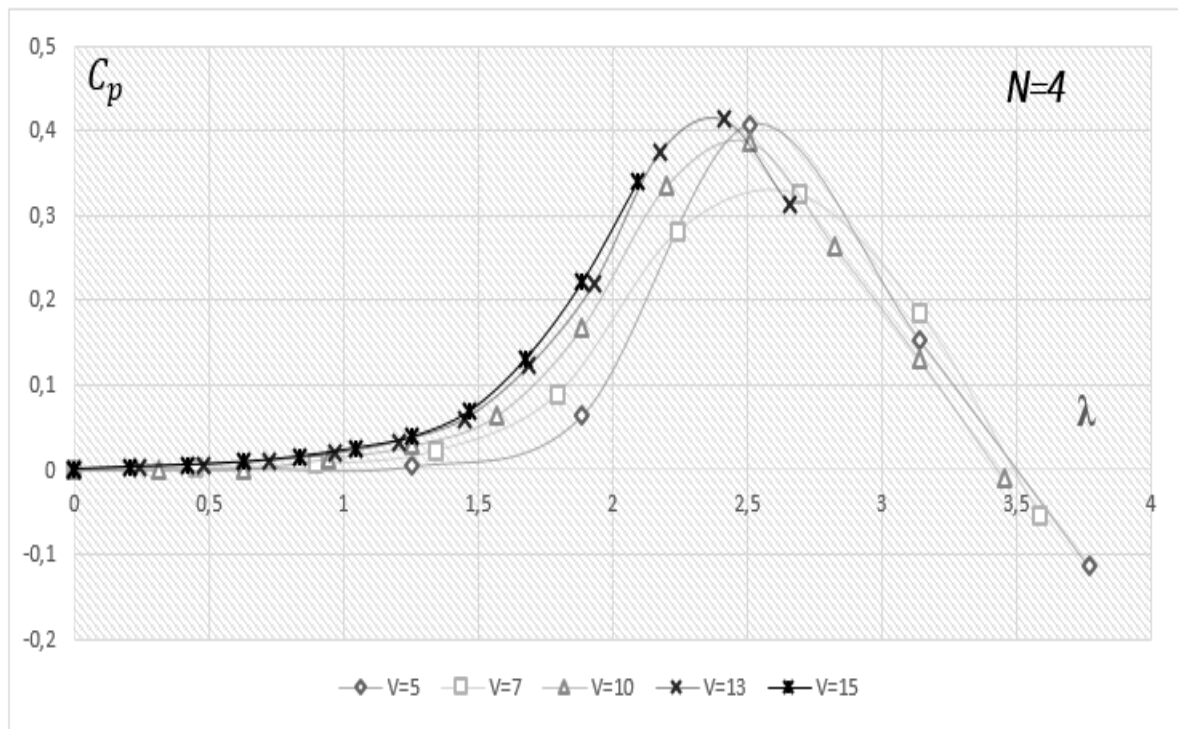


Рис. 3-21 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=4$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю NACA 0021

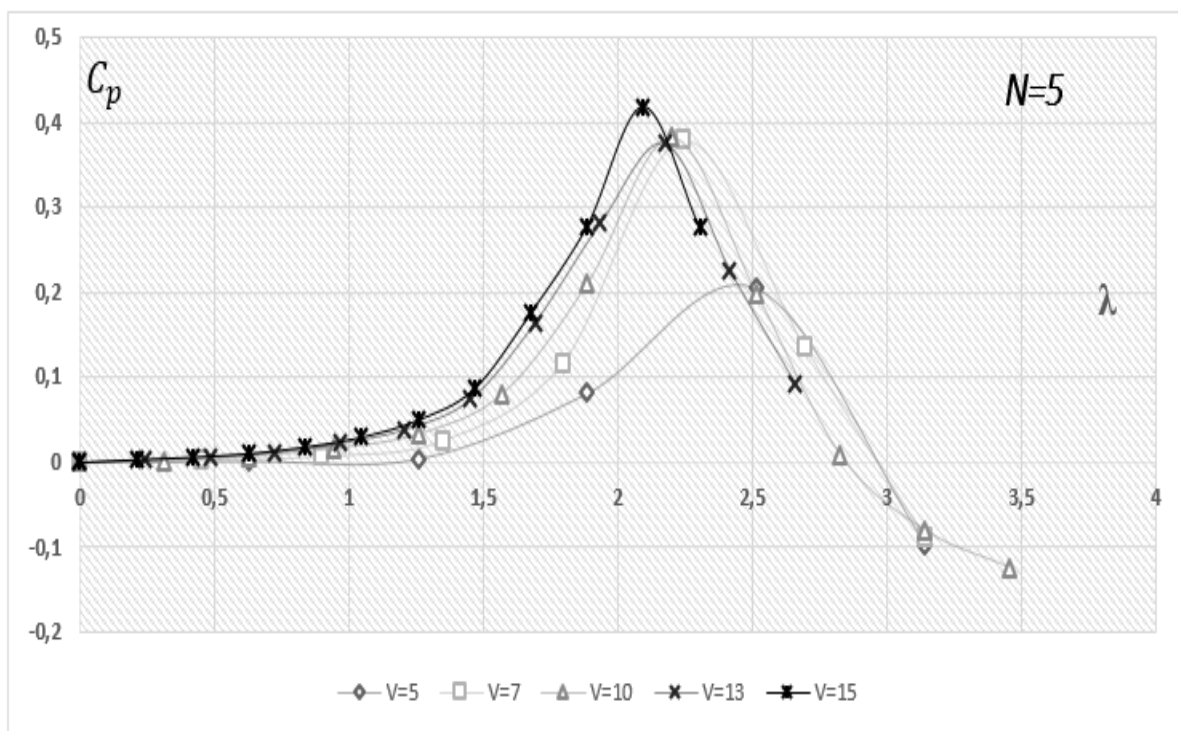


Рис. 3-22 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=5$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю NACA 0021

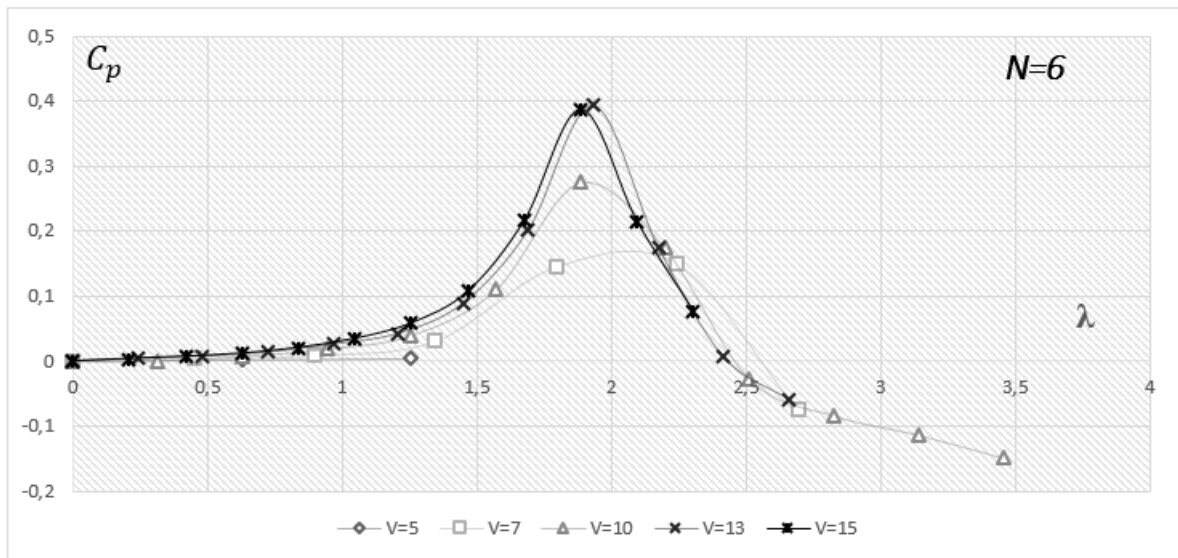


Рис. 3-23 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при різних швидкостях вітру V_0 при кількості лопатей $N=6$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ та профілю NACA 0021

Розрахунок показав, що найбільш прийнятними БЕУ за кількостями лопатей є вітроагрегати з двома та трьома лопатями.

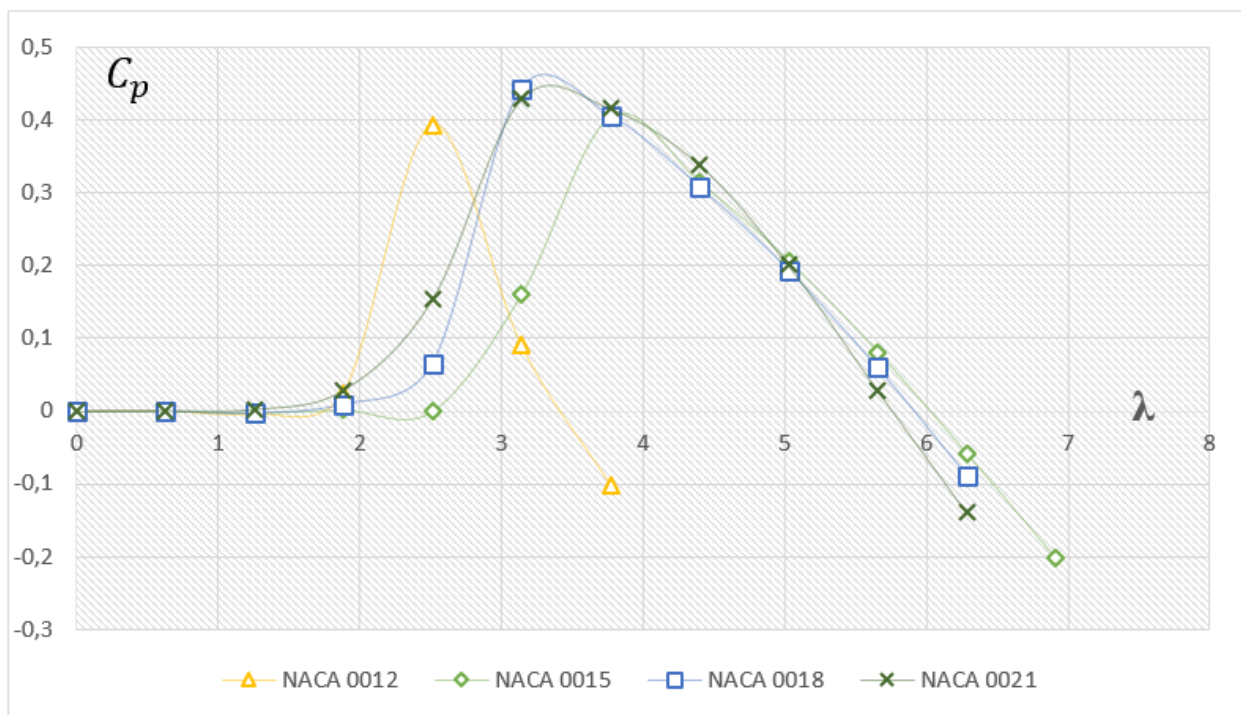


Рис. 3-24 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 5$ м/с при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ при різних профілях

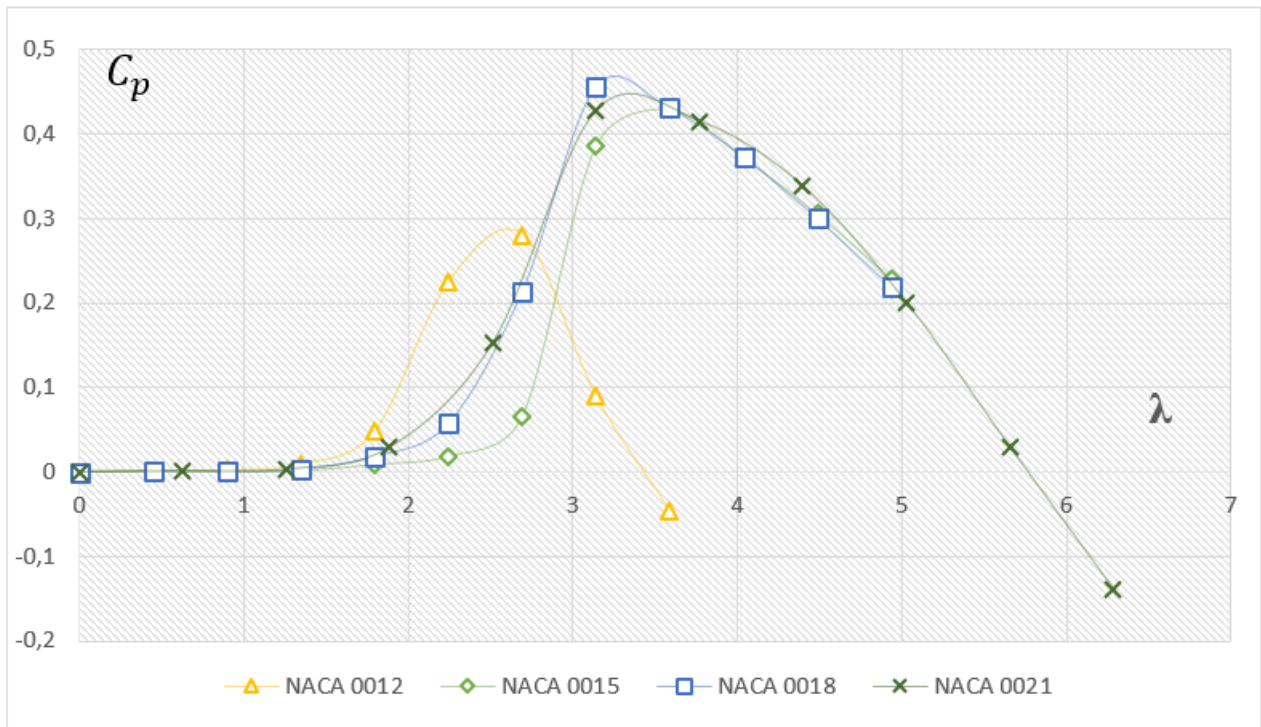


Рис. 3-25 – Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 5 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ при різних профілях

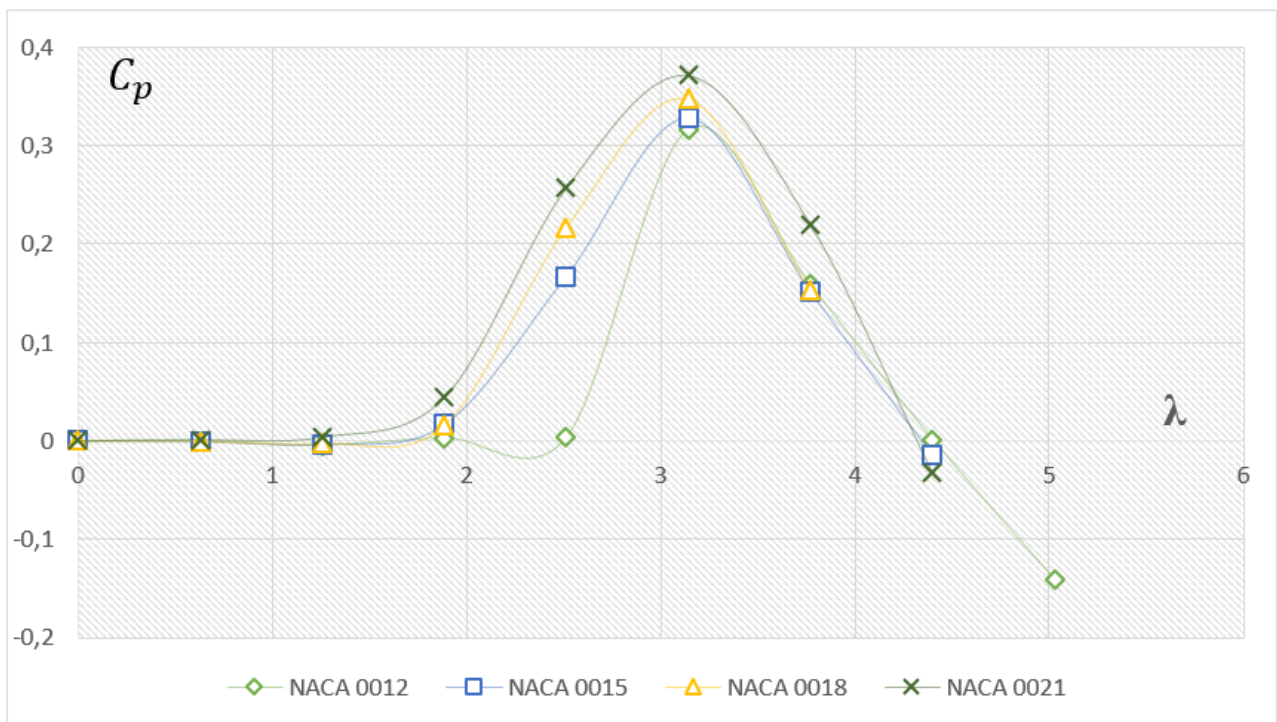


Рис. 3-26 – Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 7 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ при різних профілях

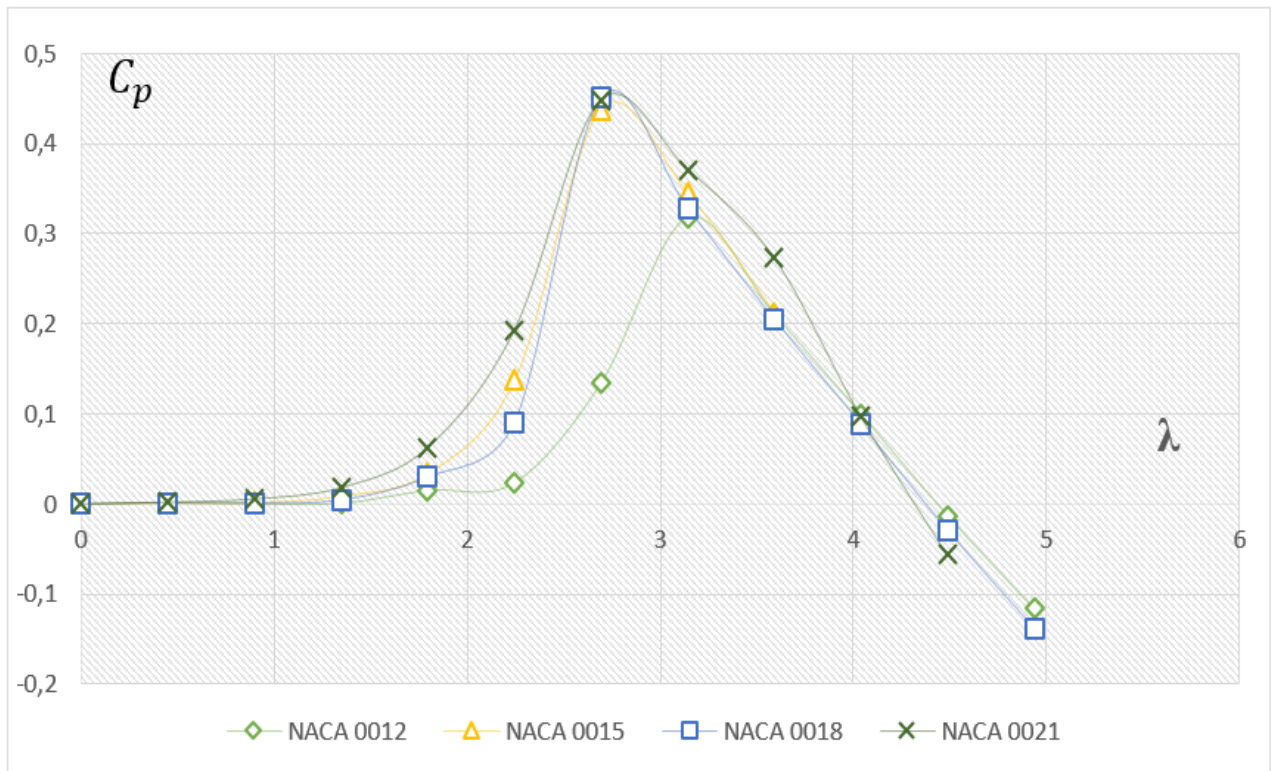


Рис. 3-27 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 7 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнту $\gamma=0.2$ при різних профілях

На рис. 3.24 – рис.3.27 показано коефіцієнти потужності в залежності від різних профілів при швидкостях вітру $V_0 = 5 \text{ м/с}$ та $V_0 = 7 \text{ м/с}$ та кількостях лопатей $N = 2$ та $N = 3$. Розрахунок показав, що найбільш прийнятними для установки у БЕУ лопатей є профілі NACA 0018 та 0021, при використанні профілей NACA 0012 та 0015 при невеликих числах λ спостерігається від'ємні значення c_p , це означає, що установці необхідно для нормальної роботи споживати енергію ззовні.

Надалі, на рис. 3-28 – рис.3.51, подано графіки коефіцієнта потужності в залежності від параметру безрозмірного параметру $\gamma = l/R$. Розрахунки проводились при кількостях лопатей $N = 2$ та $N = 3$, швидкостях вітру $V_0 = 5 \text{ м/с}$, $V_0 = 7 \text{ м/с}$, $V_0 = 9 \text{ м/с}$, та у свою чергу $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$.

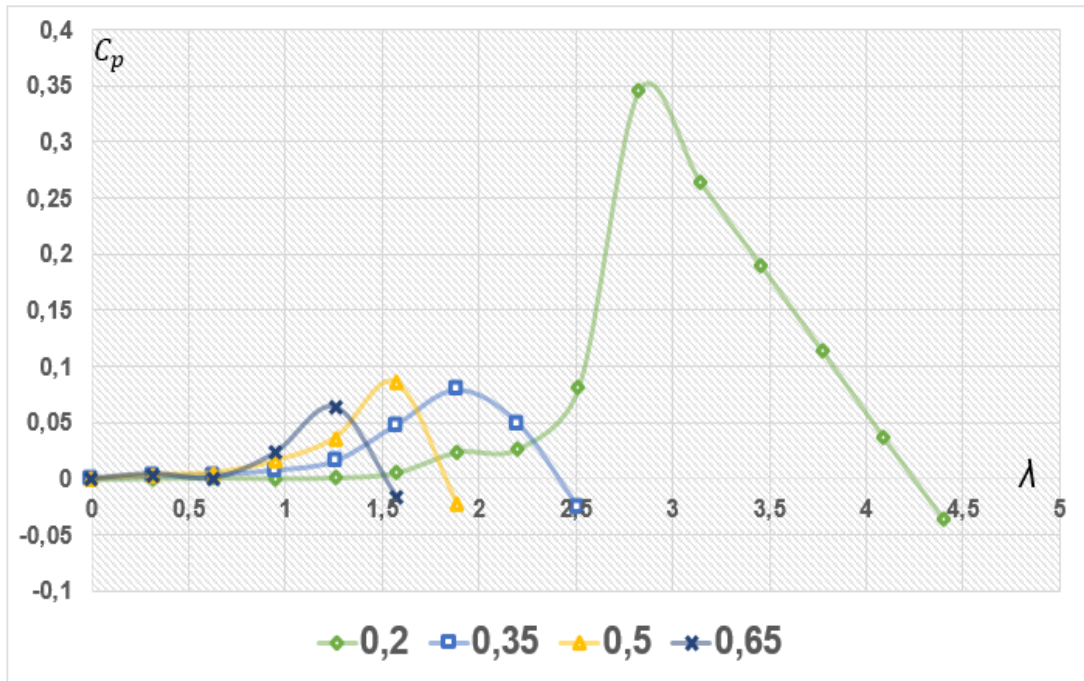


Рис. 3-28 – Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 5 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнтах $\gamma = 0,2$, $\gamma = 0,35$, $\gamma = 0,5$, $\gamma = 0,65$ при профілі NASA 0012

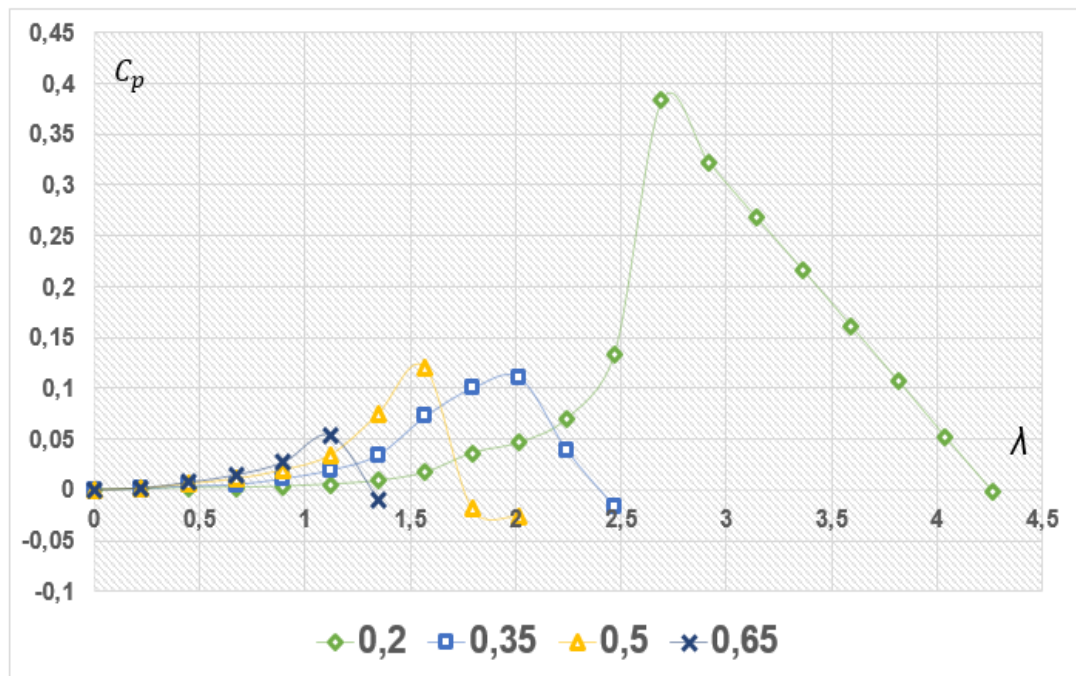


Рис. 3-29– Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 7 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнтах $\gamma = 0,2$, $\gamma = 0,35$, $\gamma = 0,5$, $\gamma = 0,65$ при профілі NASA 0012

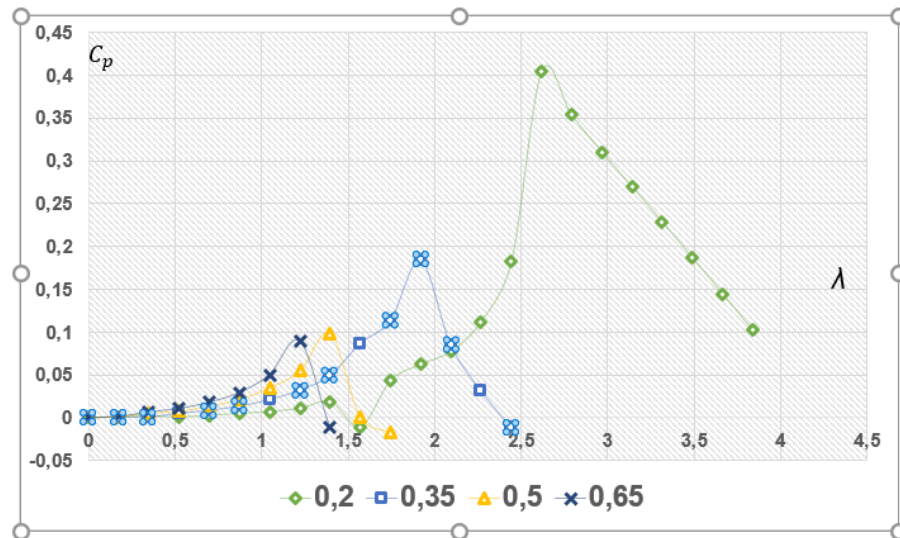


Рис. 3-30– Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 9 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NASA 0012

З рис. 3.28 – рис. 3.30 видно, що у всіх трьох випадках різних швидкостей вітру найбільш оптимальним є параметр $\gamma = 0.2$. При збільшенні цього параметру вітроустановка значно менше отримує енергії через збільшення довжини хорди лопаті, що у свою чергу зменшує кількість об'єму потоку повітря, яке проходить через навітряну частину вітроколеса. Аналогічні графіки побудовані для $N=3$: рис. 3.31– рис. 3.33.

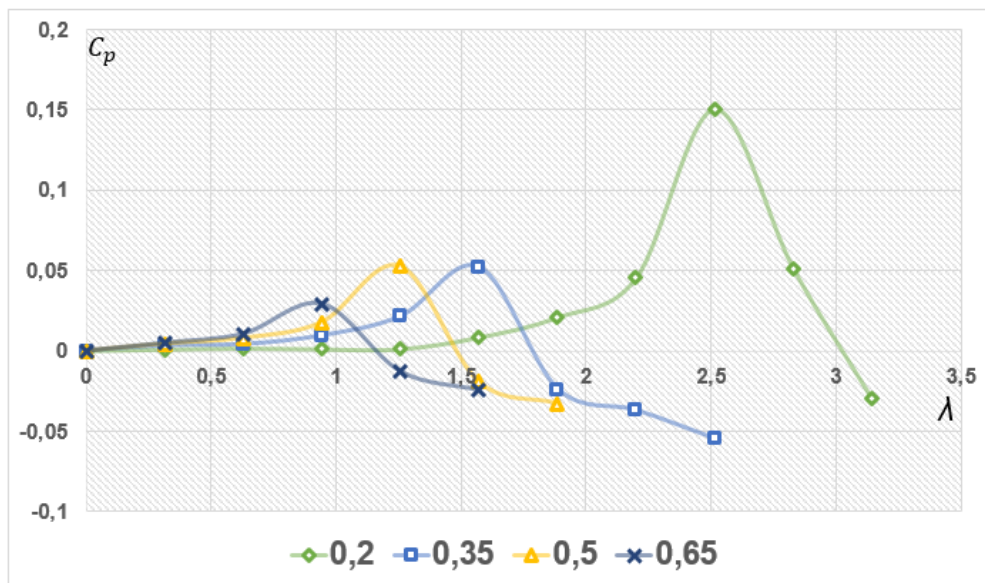


Рис. 3-31– Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 5 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NASA 0012

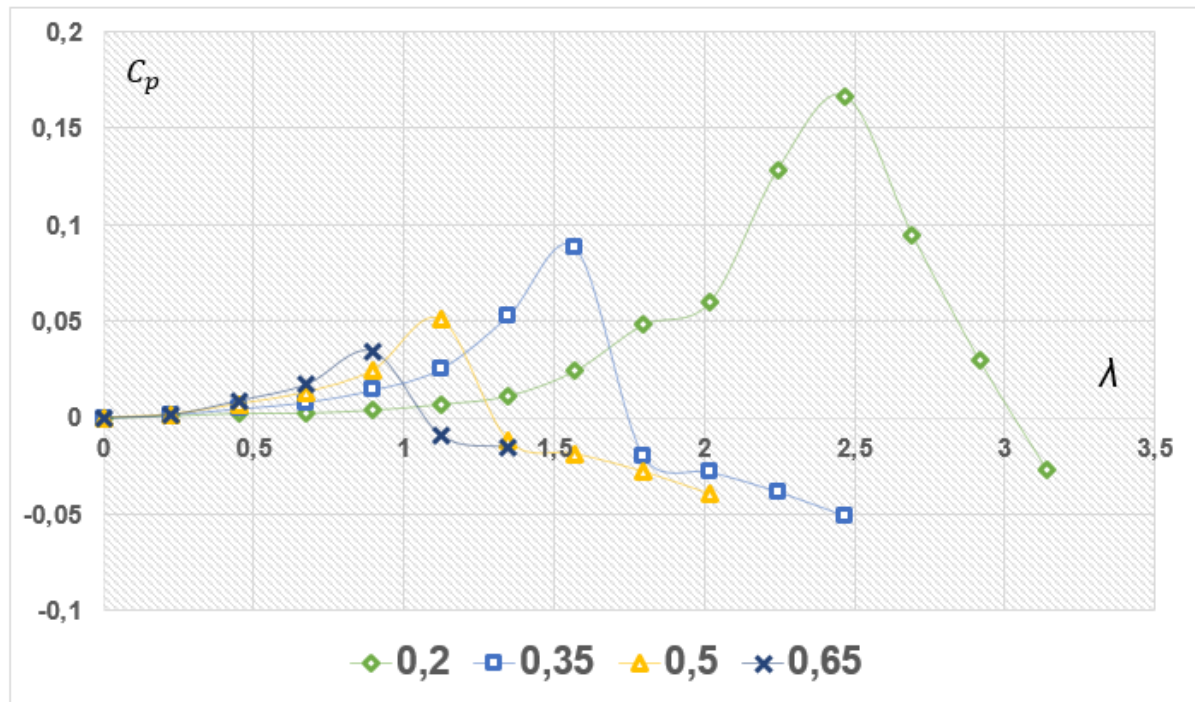


Рис. 3-32– Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 7 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NACA 0012

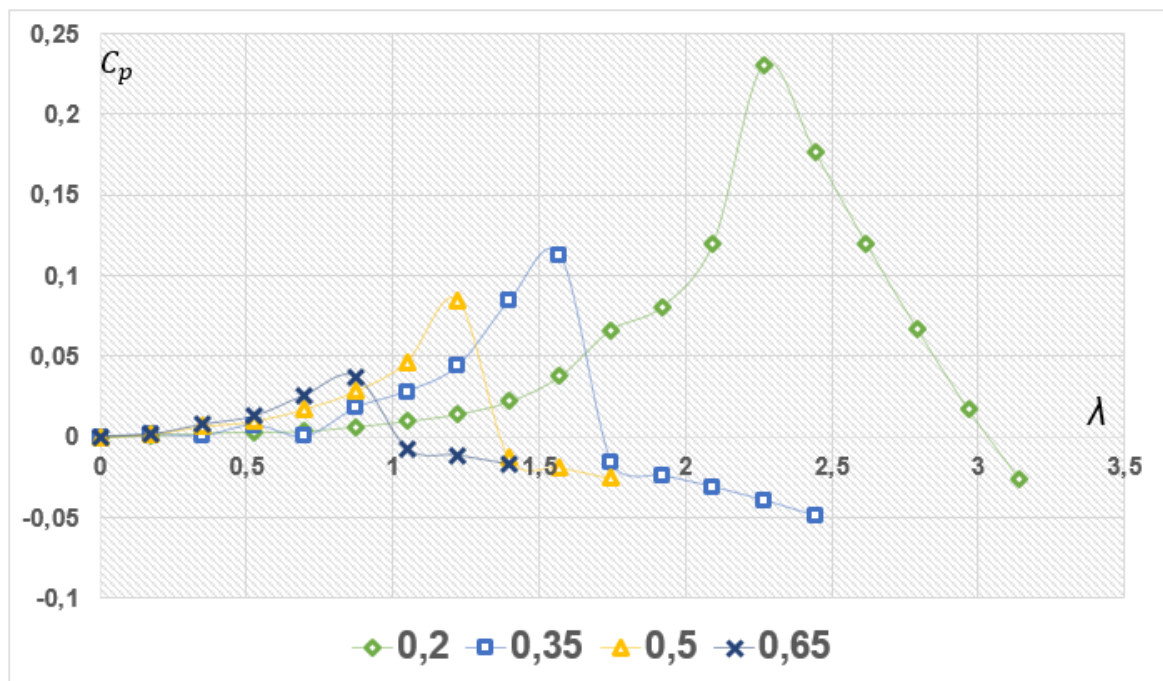


Рис. 3-33– Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 9 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NACA 0012

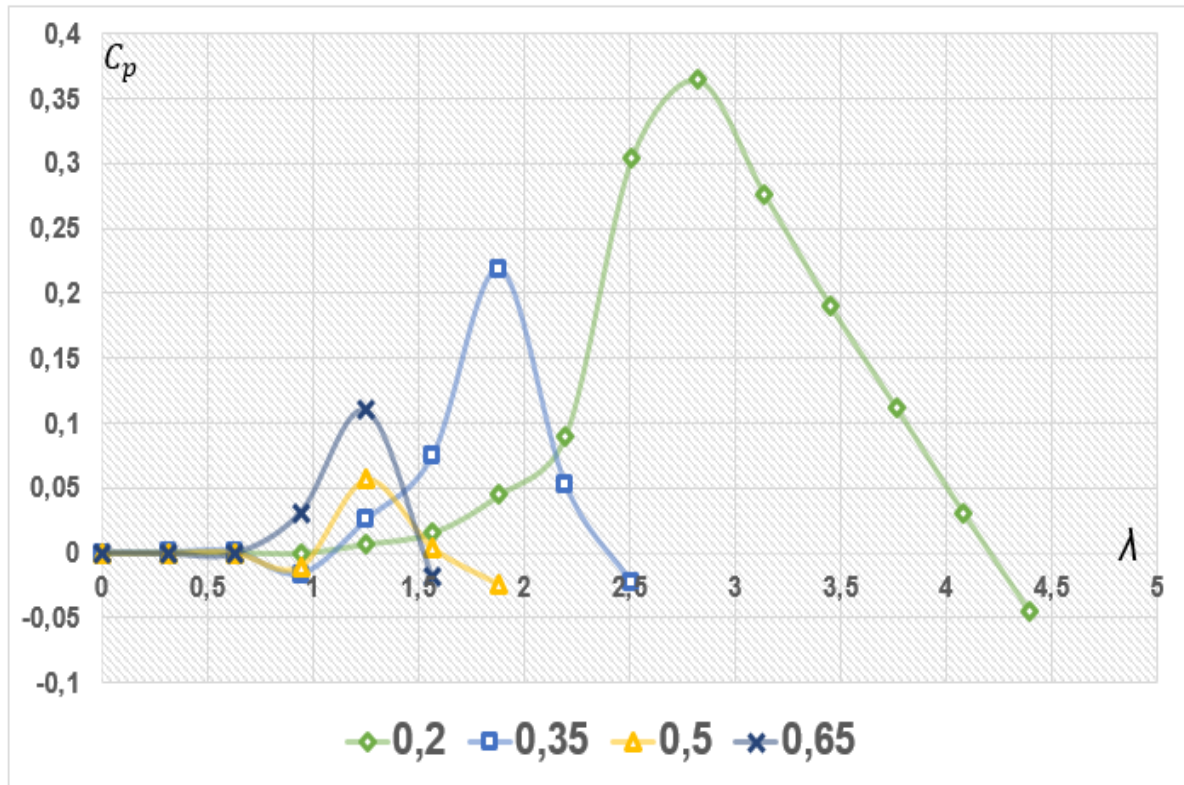


Рис. 3-34— Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 5 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NASA 0015

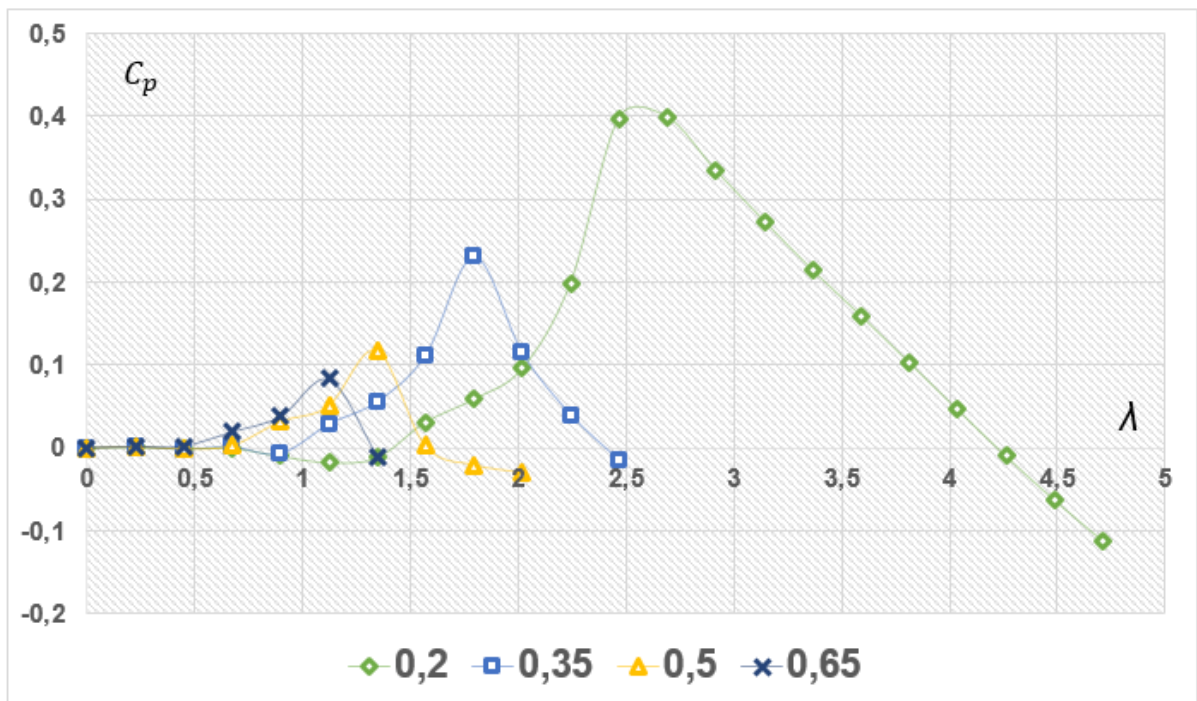


Рис. 3-35— Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 7 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NASA 0015

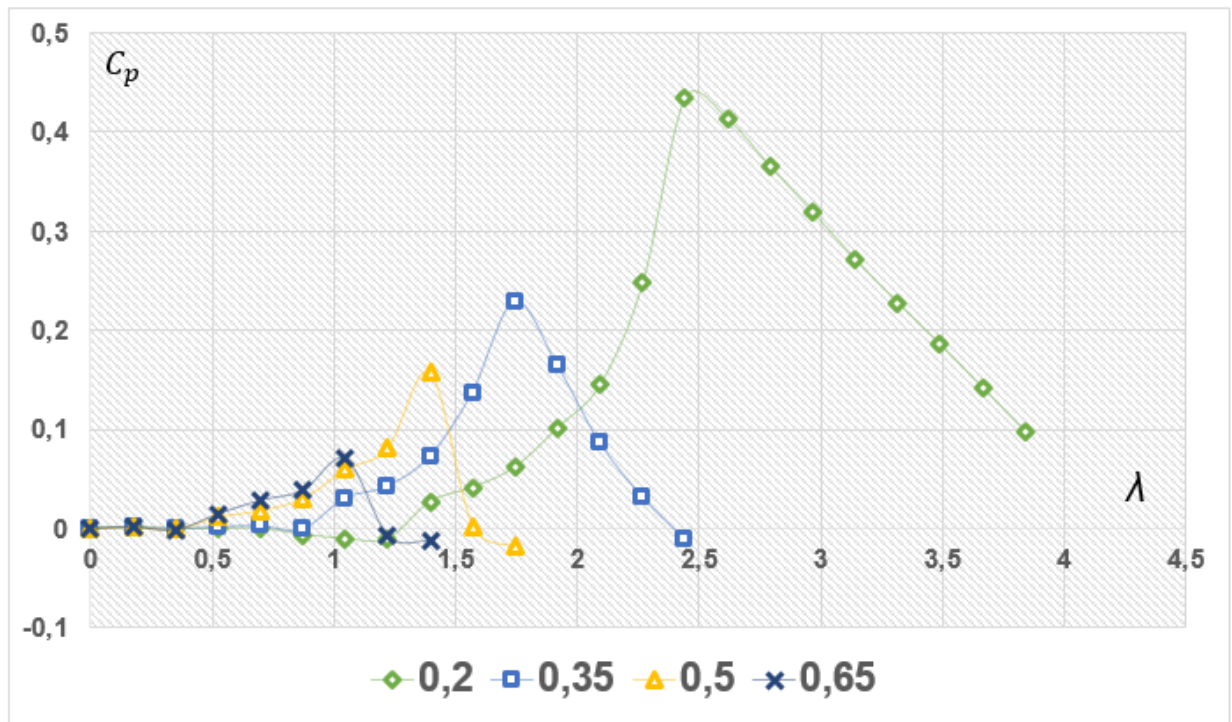


Рис. 3-36 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 9 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NASA 0015

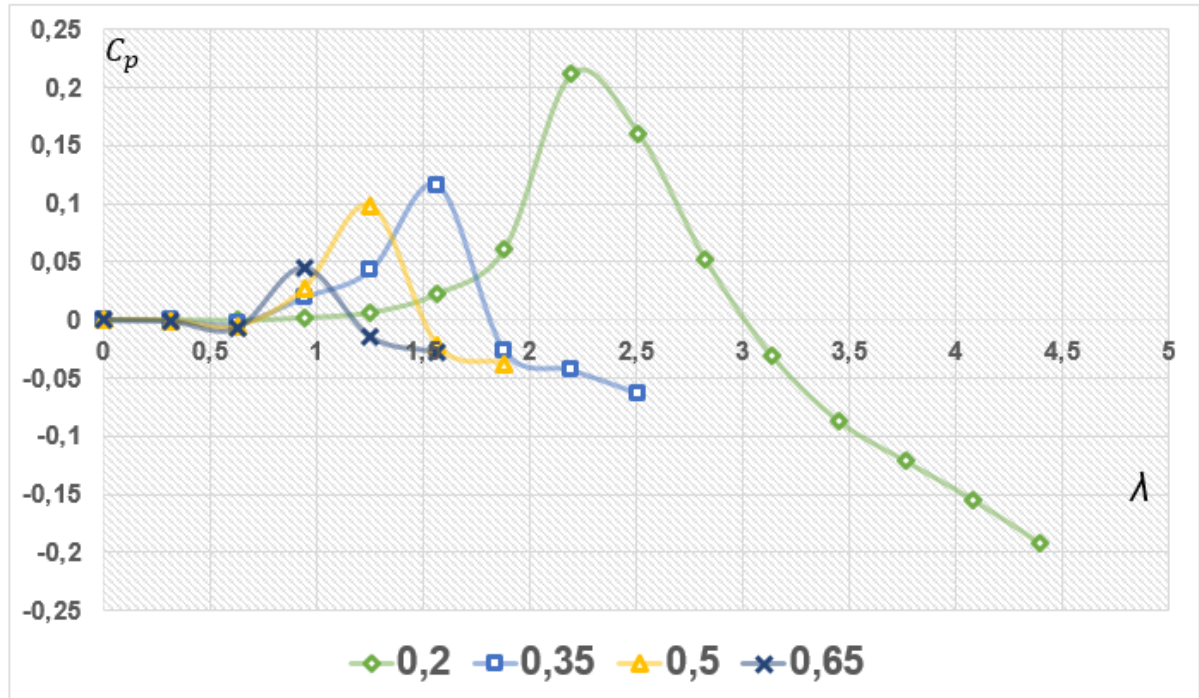


Рис. 3-37 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 5 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NASA 0015

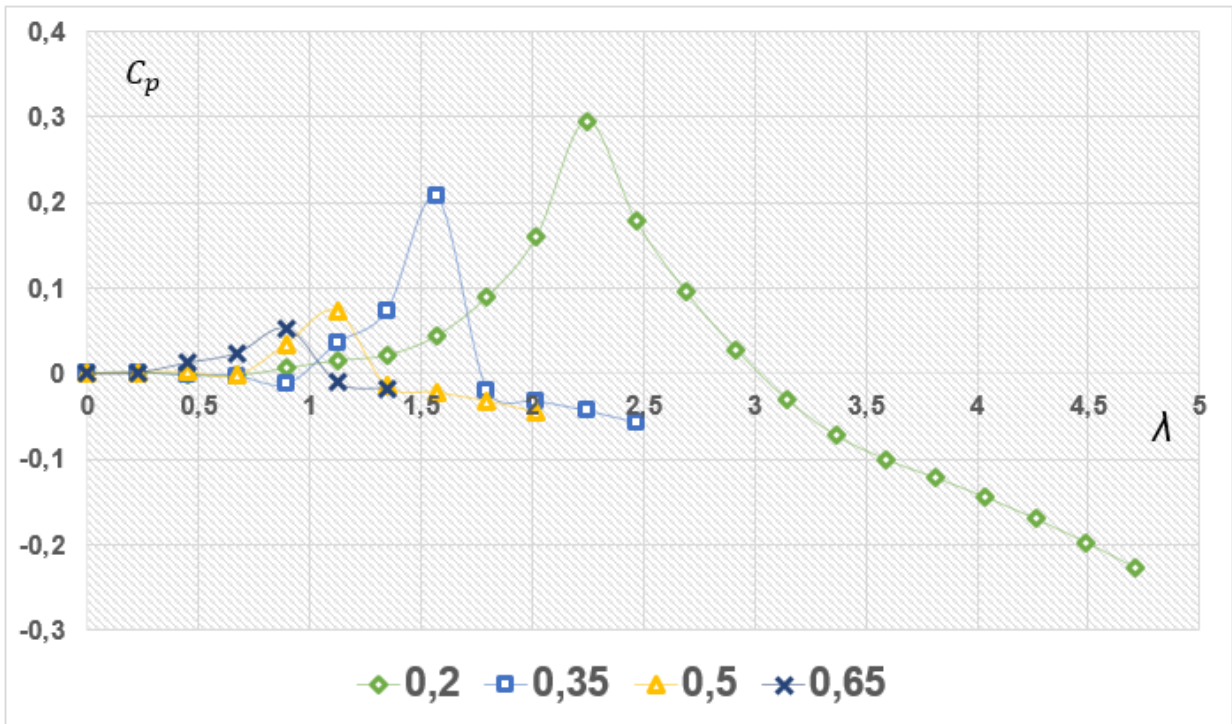


Рис. 3-38 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 7 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнтах $\gamma = 0,2$, $\gamma = 0,35$, $\gamma = 0,5$, $\gamma = 0,65$ при профілі NASA 0015

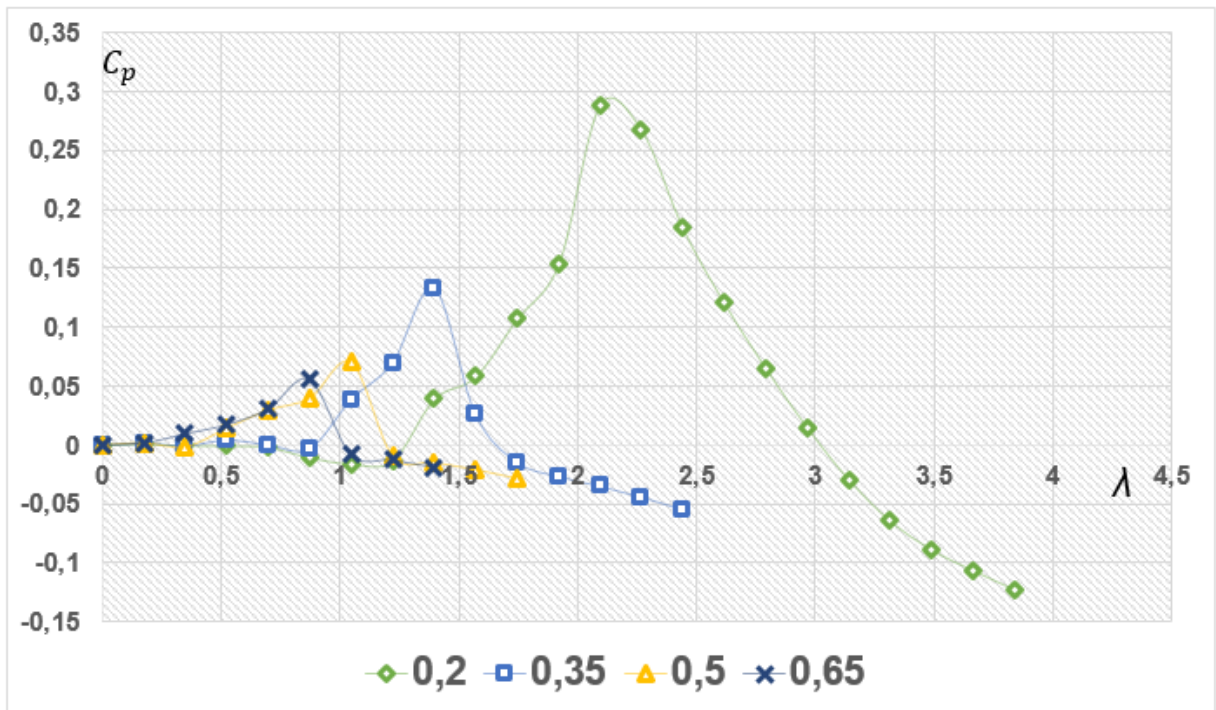


Рис. 3-39 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 9 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнтах $\gamma = 0,2$, $\gamma = 0,35$, $\gamma = 0,5$, $\gamma = 0,65$ при профілі NASA 0015

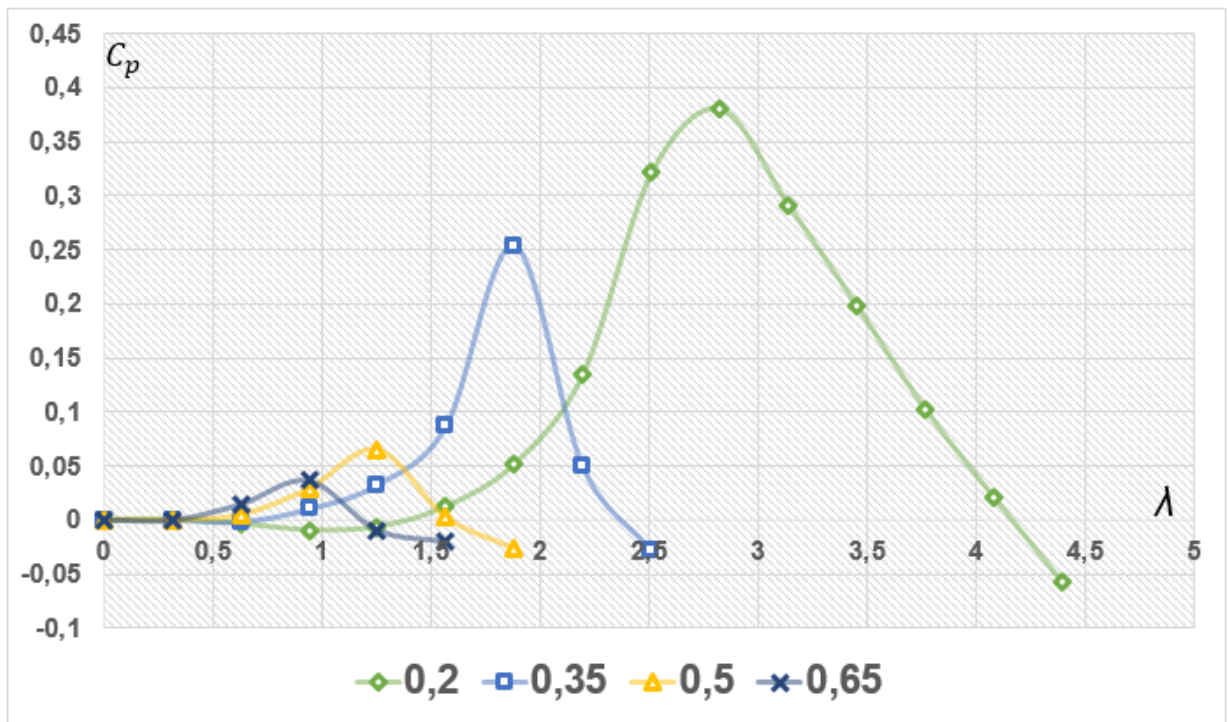


Рис. 3-40 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 5 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NASA 0018

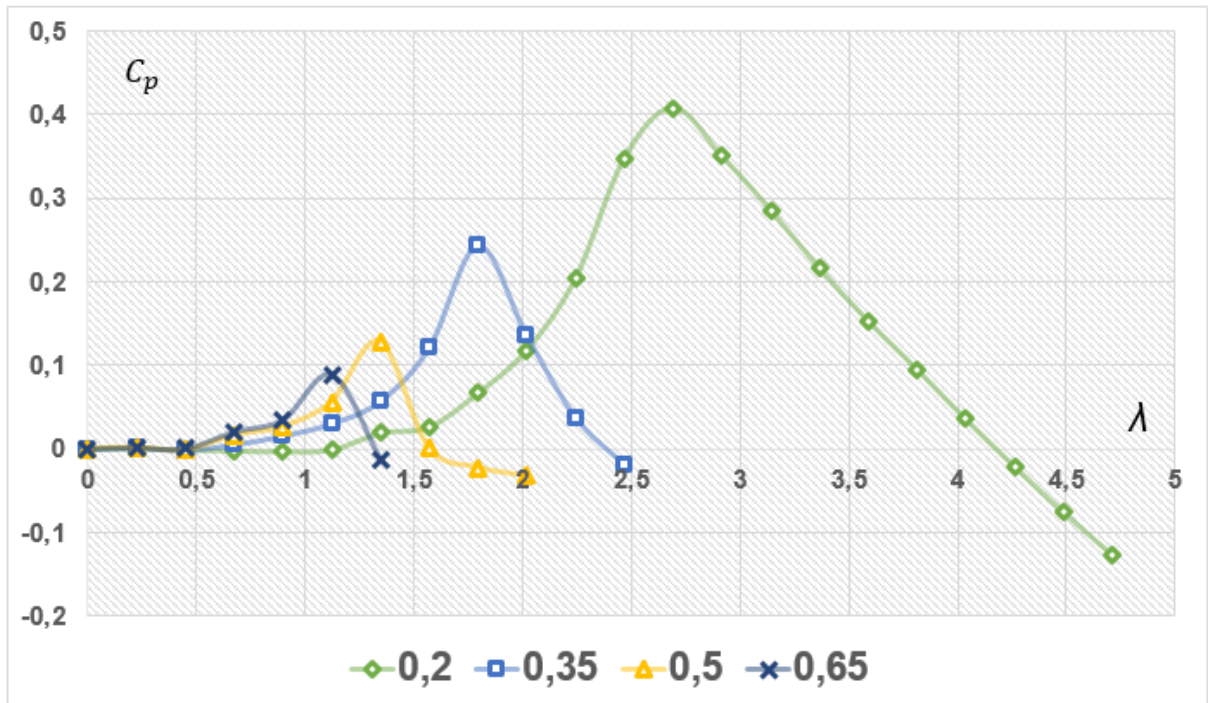


Рис. 3-41 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 7 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NASA 0018

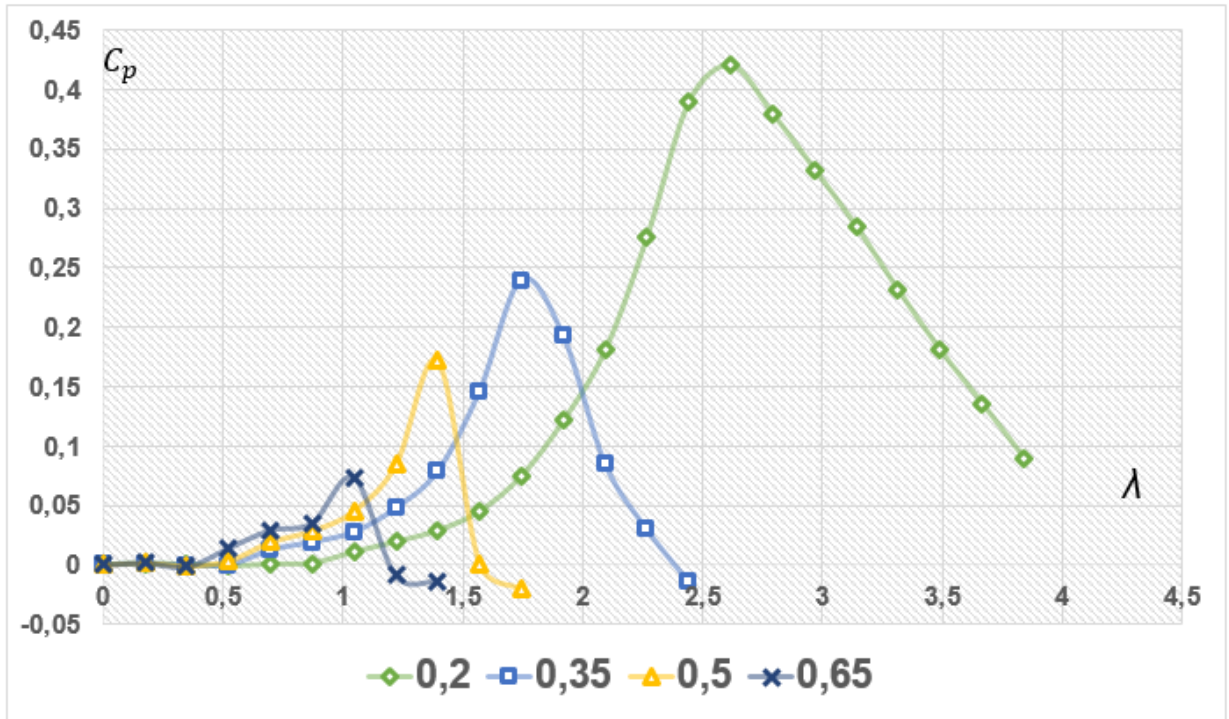


Рис. 3-42 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 9 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NACA 0018

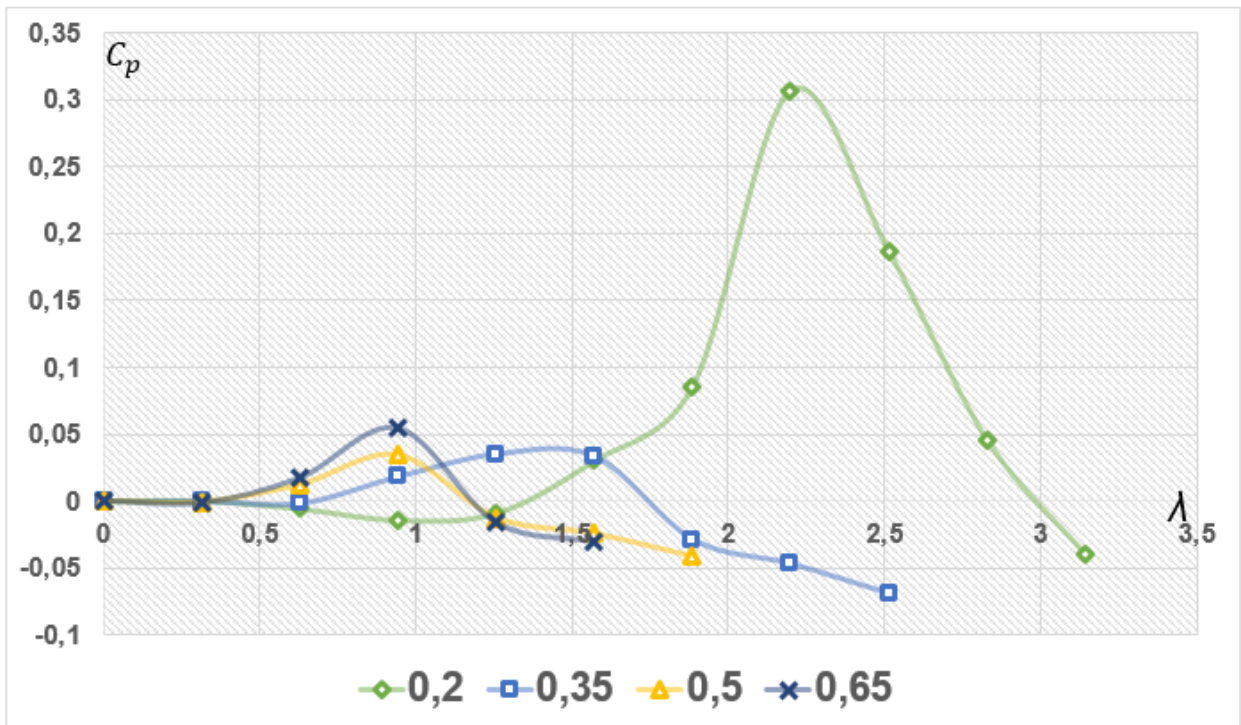


Рис. 3-43 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 5 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NACA 0018

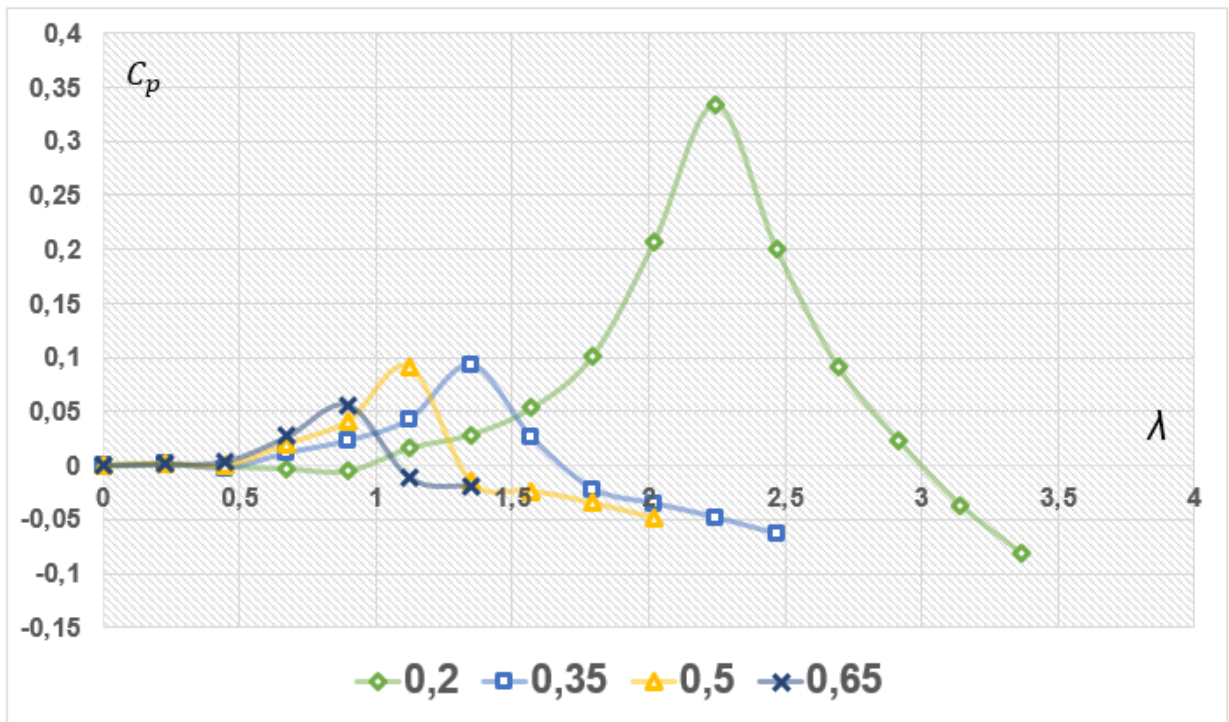


Рис. 3-44 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 7 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NASA 0018

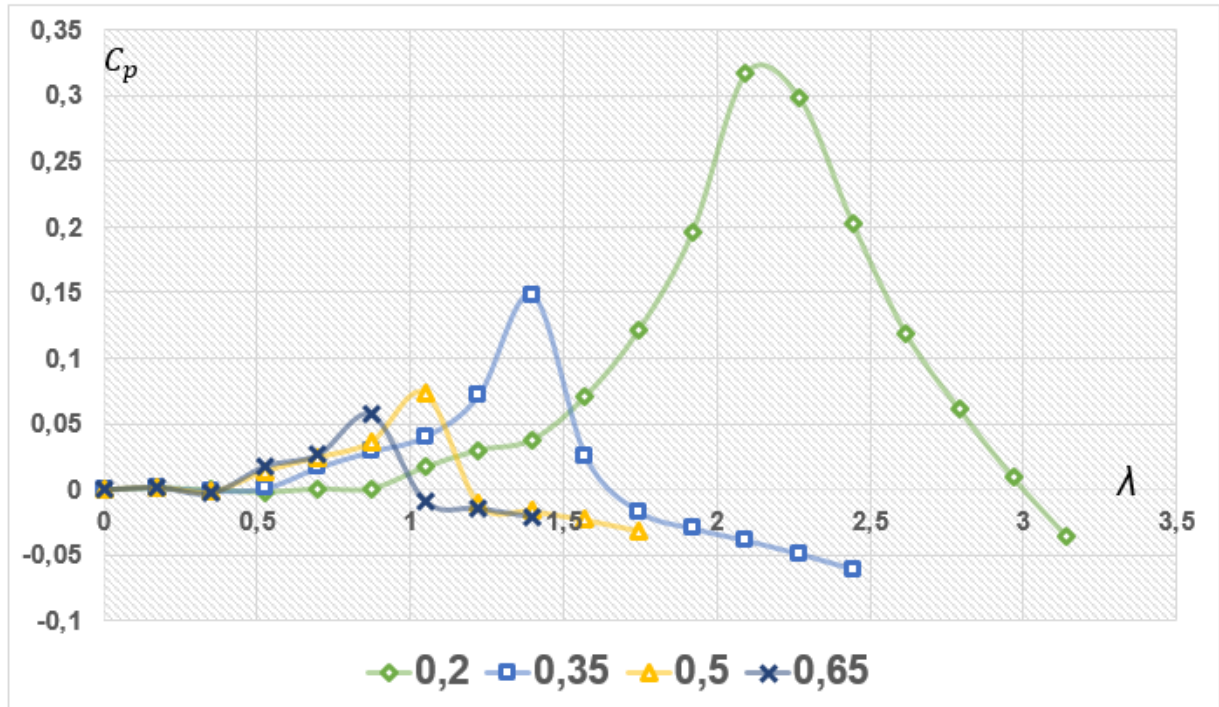


Рис. 3-45 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 9 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NASA 0018

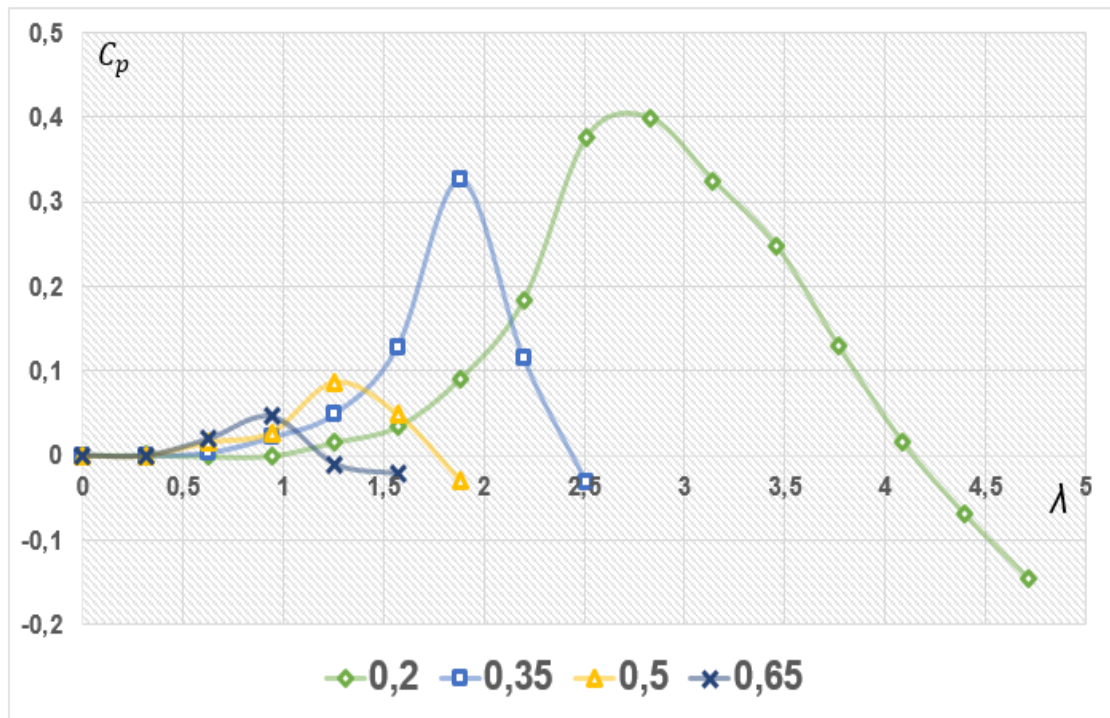


Рис. 3-46 – Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 5 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NASA 0021

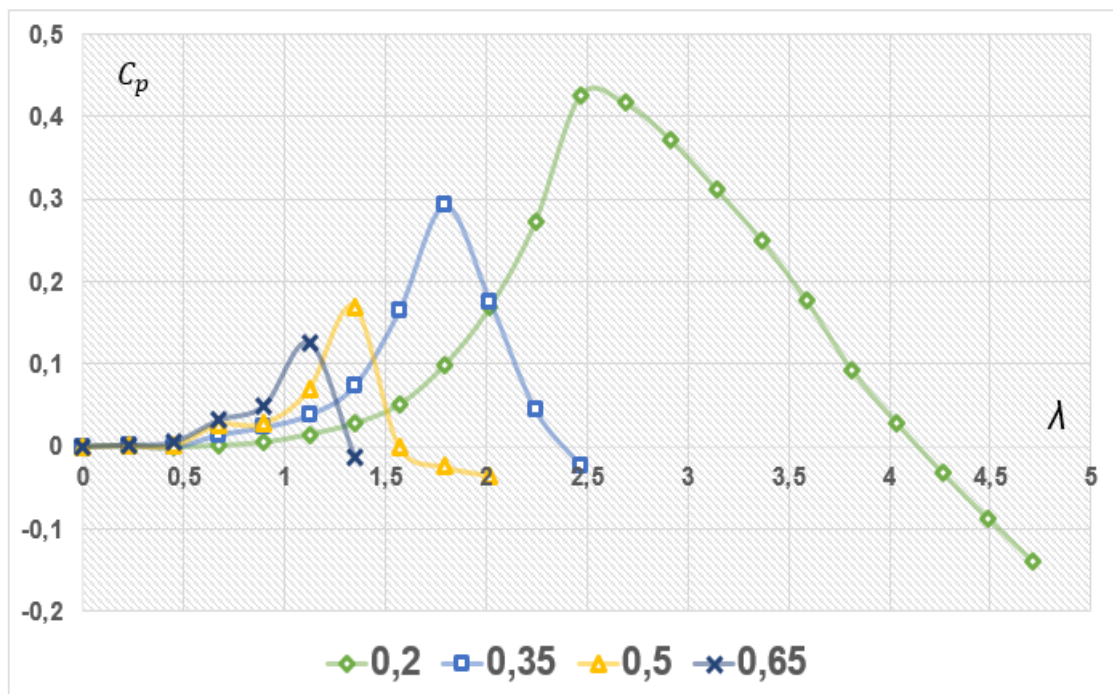


Рис. 3-47 – Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 7 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NASA 0021

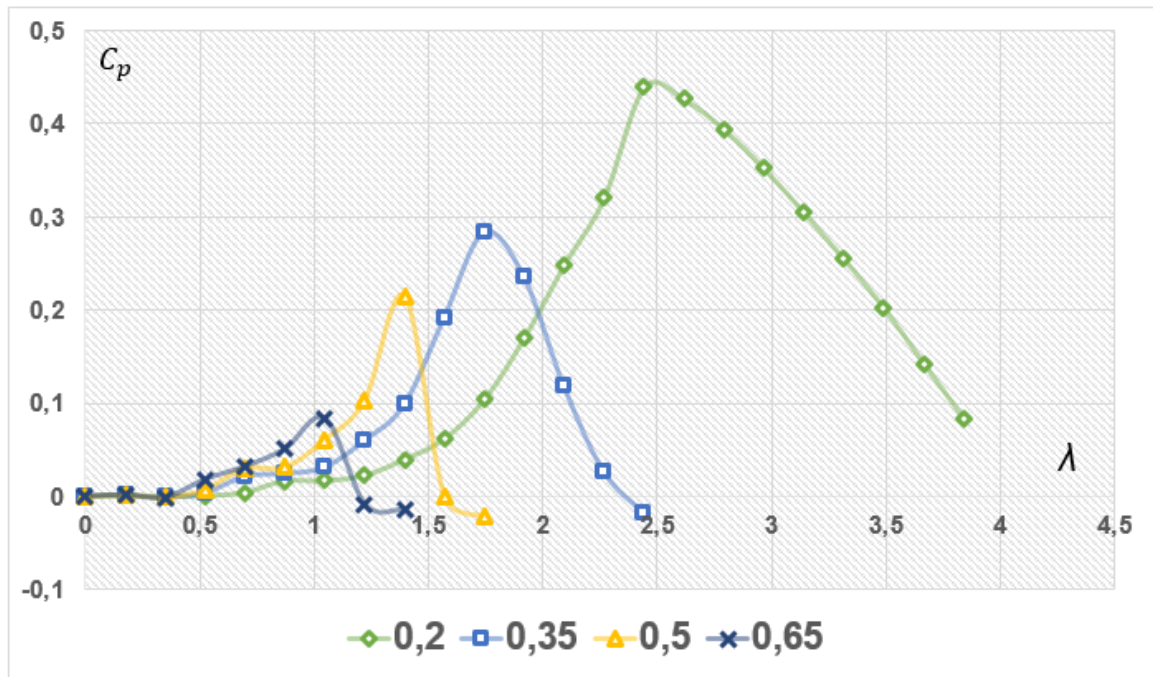


Рис. 3-48 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 9 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=2$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NACA 0021

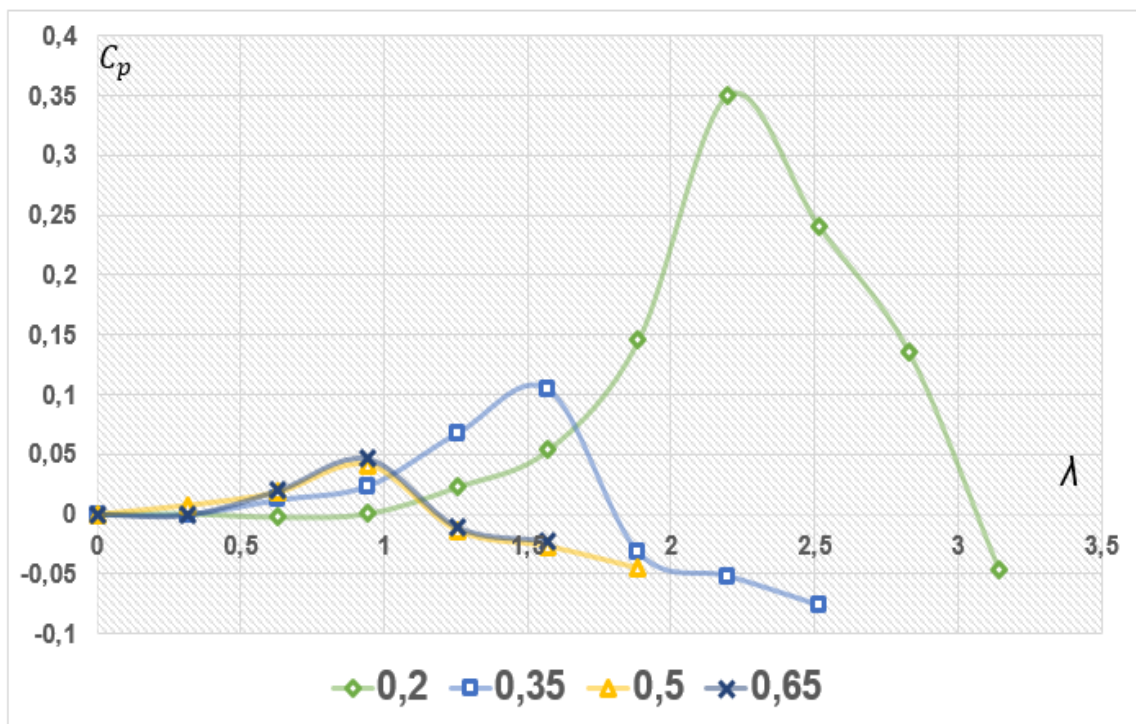


Рис. 3-49 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 5 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NACA 0021

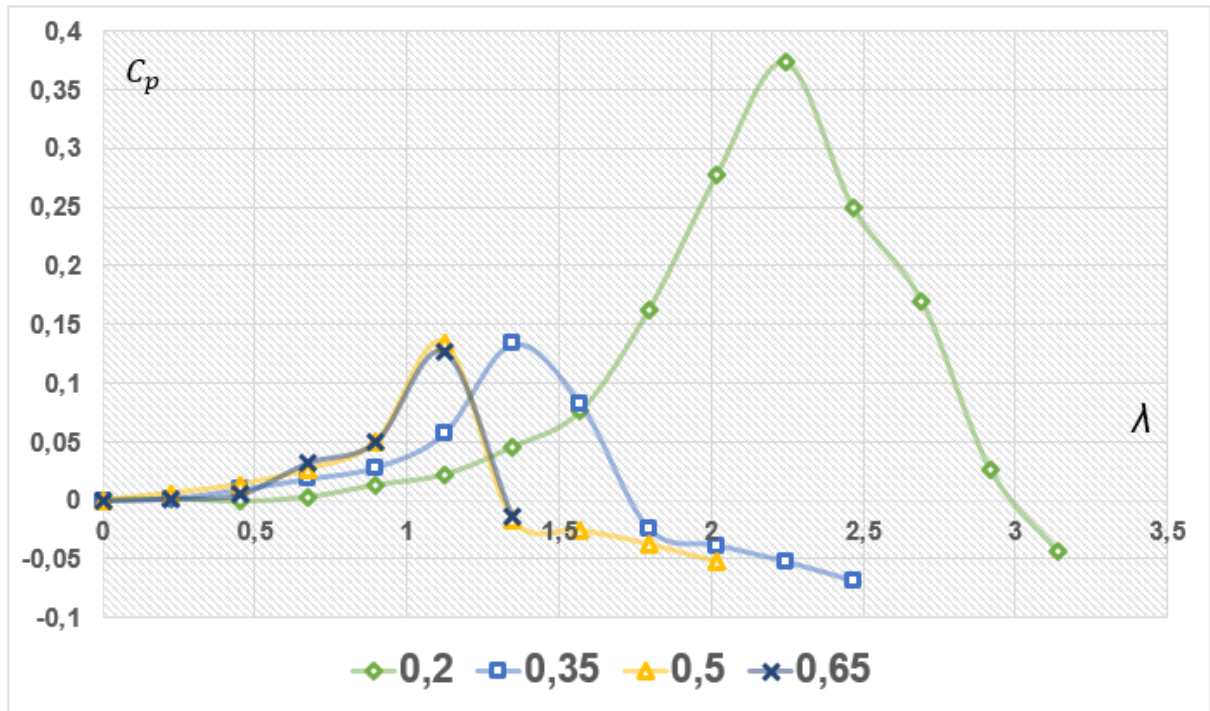


Рис. 3-50 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 7 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NASA 0021

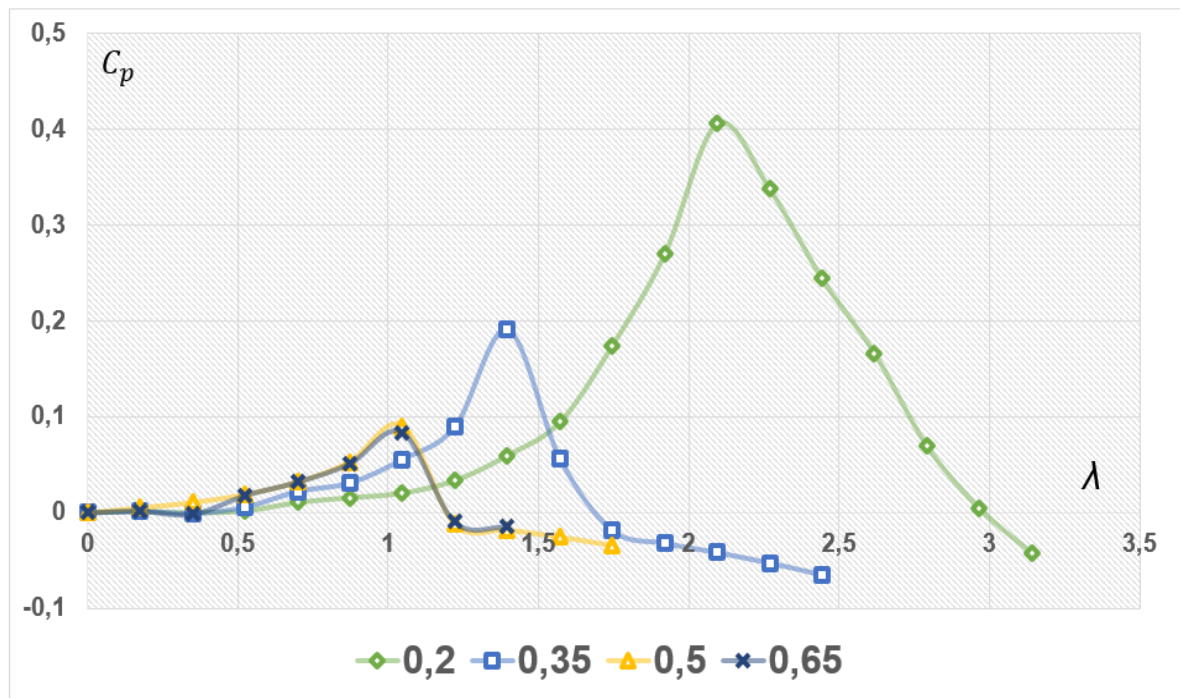


Рис. 3-51 – Коефіцієнт потужності БЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 9 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=3$, коефіцієнтах $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.35$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 0.65$ при профілі NASA 0021

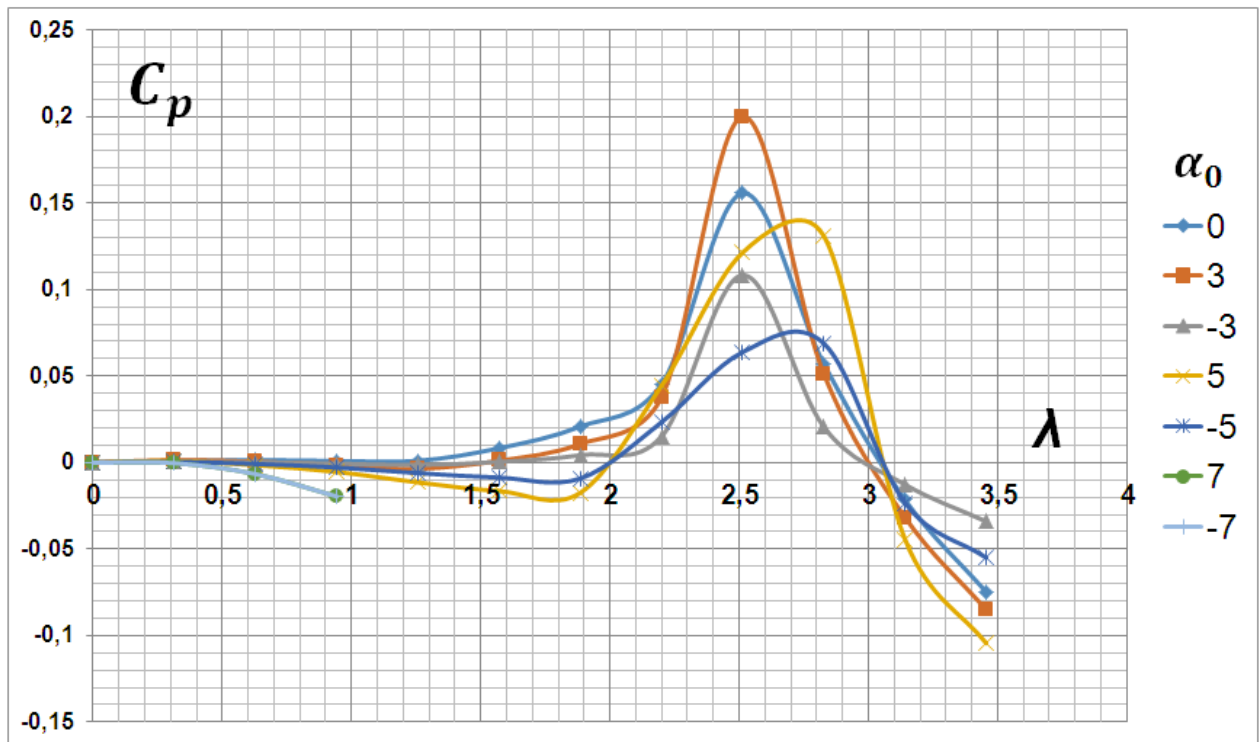


Рис. 3-52 – Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 5 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=3$, куту установки лопаті $\alpha_0 = [0^\circ, 3^\circ, -3^\circ, 5^\circ, -5^\circ, 7^\circ, -7^\circ]$ для профілю NACA 0012

На рис. 3-52 показано вплив куту установки лопаті α_0 на коефіцієнт потужності C_p . При деяких додатніх кутах установки спостерігається значне збільшення коефіцієнту, так, при $\alpha_0 = 3^\circ$ при $\lambda = 2.5$ коефіцієнт $C_p = 0.2$, а при $\alpha_0 = 0^\circ$ – $C_p = 0.16$. Проте, при подальшому збільшенні або зменшенні кута установки лопаті бачимо тенденцію зменшення коефіцієнту потужності, так наприклад, при $\alpha_0 = 5^\circ$ коефіцієнт потужності C_p зменшився з 0.16 до 0.14, а при $\alpha_0 = -5^\circ$ – до значення 0.06 у точці $\lambda = 2.7$. При $\alpha_0 = \pm 7^\circ$ коефіцієнт C_p від самого початку приймає від’ємні значення, це говорить про те, що при такій цій установці лопатей вітрогенератор не зможе нормально працювати.

Цей графік показує, що варіювання куту установки лопаті є ефективним інструментом збільшення отримання енергії з вітроагрегату. Аналогічні графіки для інших швидкостях вітру набіжного потоку $V_0 = 7 \text{ м/с}$ та $V_0 = 9 \text{ м/с}$ показано на рис. 3.53 – рис. 3.54.

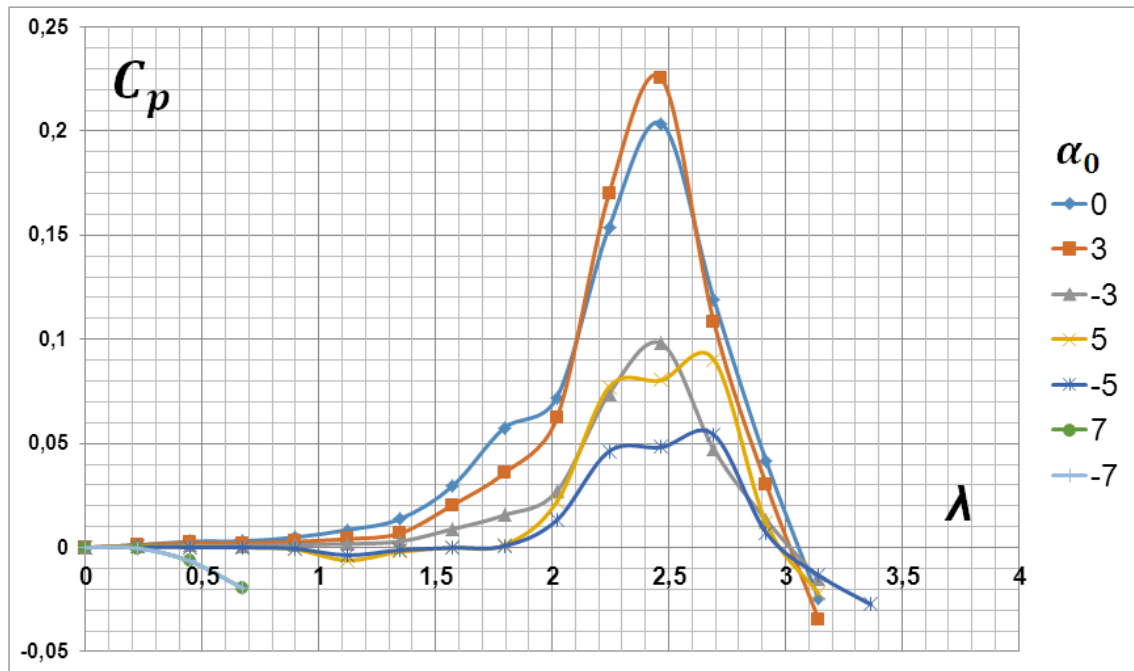


Рис. 3-53 – Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 7 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=3$, куту установки лопаті $\alpha_0 = [0^\circ, 3^\circ, -3^\circ, 5^\circ, -5^\circ, 7^\circ, -7^\circ]$ при профілі NASA 0012

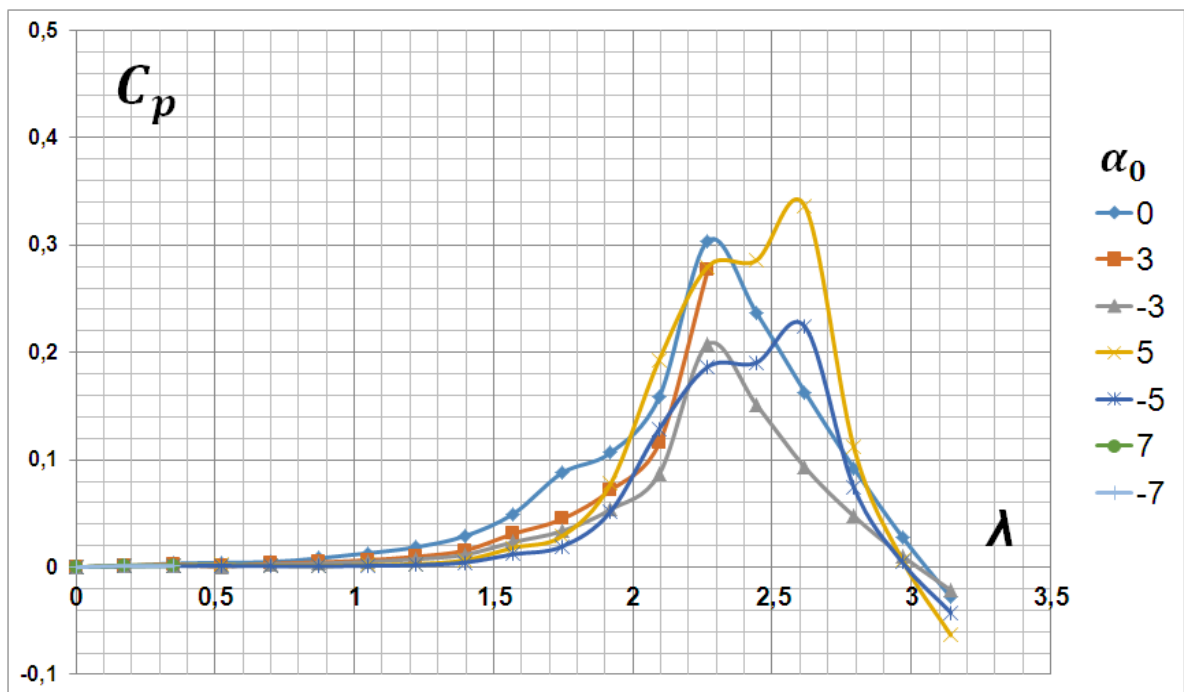


Рис. 3-54 – Коефіцієнт потужності ВЕУ в залежності від числа швидкохідності при швидкості вітру $V_0 = 9 \text{ м/с}$ при кількості лопатей $N=3$, куту установки лопаті $\alpha_0 = [0^\circ, 3^\circ, -3^\circ, 5^\circ, -5^\circ, 7^\circ, -7^\circ]$ при профілі NASA 0012

Надалі подано розрахунки ВЕУ при використанні профілю НАСА 0018, параметрів $R = 3.6 \text{ м}$, $l = 0.5 \text{ м}$, $N = 3$, $H = 3 \text{ м}$. Розрахунок показав, що значення потужності у деякому діапазоні чисел Рейнольдса мають від'ємні значення – це свідчить про те, що установка повинна споживати енергію ззовні і її робота неефективна.

Подальші графіки (рис.3-55 – рис.3-61), будуть представлені в залежності від n – кількості обертів ВЕУ за хвилину:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}, \quad (3.4)$$

$$n = \frac{30\omega}{\pi}. \quad (3.5)$$

На графіках рис.3-55 – рис.3-61 суцільні лінії $n = 40$, $n = 60$, $n = 80$ та $n = 100$ показують результати розрахунку з урахуванням змінності числа Рейнольдса, - удосконаленою автором методикою цієї роботи, у всіх інших випадках, де вказано конкретне число Рейнольдса, – це розрахунок за класичною методикою, відповідно, з сталим числом Рейнольдса.

Так, на рис. 3-55 можна спостерігати, що максимальне значення потужності, розраховане за класичною методикою досягається при $Re = 5 \cdot 10^6$ і $V_0 = 7 \text{ м/с}$, $P = 3.2 \text{ кВт}$, у свою чергу, мінімальне – $Re = 1.5 \cdot 10^5$ і $V_0 = 5 \text{ м/с}$, $P = 1 \text{ кВт}$. При $Re = 1.6 \cdot 10^5$ при швидкості набіжного потоку $V_0 > 6 \text{ м/с}$ величина потужності має від'ємні значення, а отже діапазон чисел Рейнольдса вітрового потоку до лопатей у цьому випадку повинен бути $Re \geq 3.6 \cdot 10^5$.

За удосконаленою методикою при $n = 40$ маємо максимум потужності при $V_0 = 6 \text{ м/с}$ – $P = 1.5 \text{ кВт}$. Розрахунок за удосконаленою методикою за змінним числом Рейнольдса при $n = 40$ при вказаних вище геометричних параметрах ротора наближується до розрахунку при $Re = 7 \cdot 10^5$, у точках $V_0 = 10 \text{ м/с}$, $V_0 = 11 \text{ м/с}$ та $V_0 = 12 \text{ м/с}$ методики розрахунку співпадають і мають значення $P = 1 \text{ кВт}$.

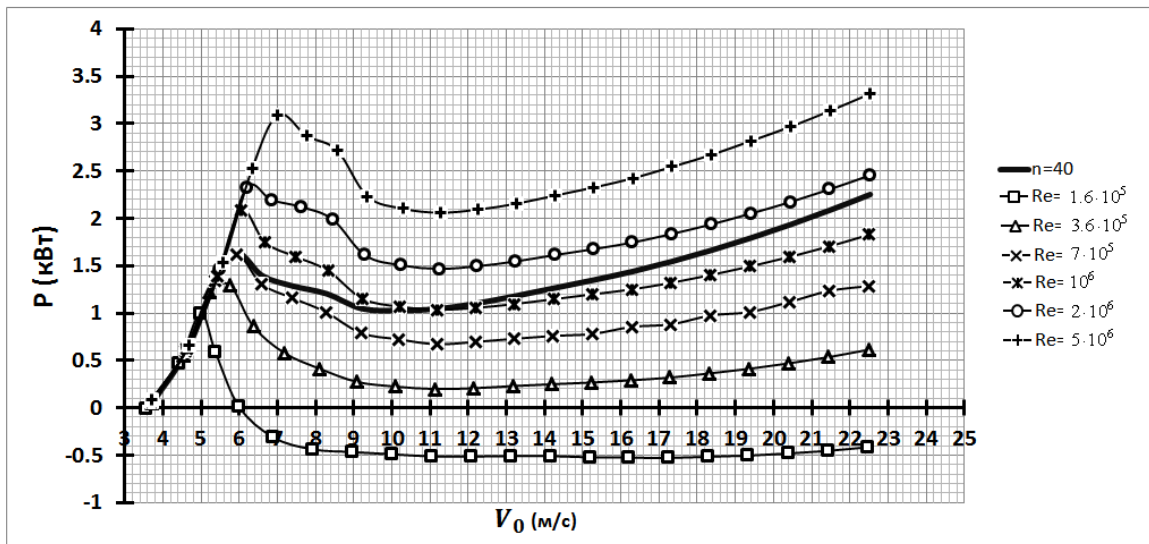


Рис. 3-55 – Залежність потужності від швидкості вітру при $n = 40$ при змінному числі Рейнольдса і від фіксованих чисел Рейнольдса

На рис.3-56 показано залежність потужності від швидкості вітру при $n = 60$, у цьому випадку максимальне значення потужності за класичною методикою досягається при $Re = 5 \cdot 10^6$ і $V_0 = 10 \text{ м/с}$, $P = 10.2 \text{ кВт}$, у свою чергу, мінімальне – $Re = 1.6 \cdot 10^5$ і $V_0 = 7.5 \text{ м/с}$, $P = 3 \text{ кВт}$. За удосконаленою методикою при $n = 60$ маємо максимум потужності при $V_0 = 9 \text{ м/с}$ – $P = 6.5 \text{ кВт}$. Розрахунок за змінним числом Рейнольдса при $n = 60$ при вказаних вище геометричних параметрах ротора наближується до розрахунку при $Re = 10^6$.

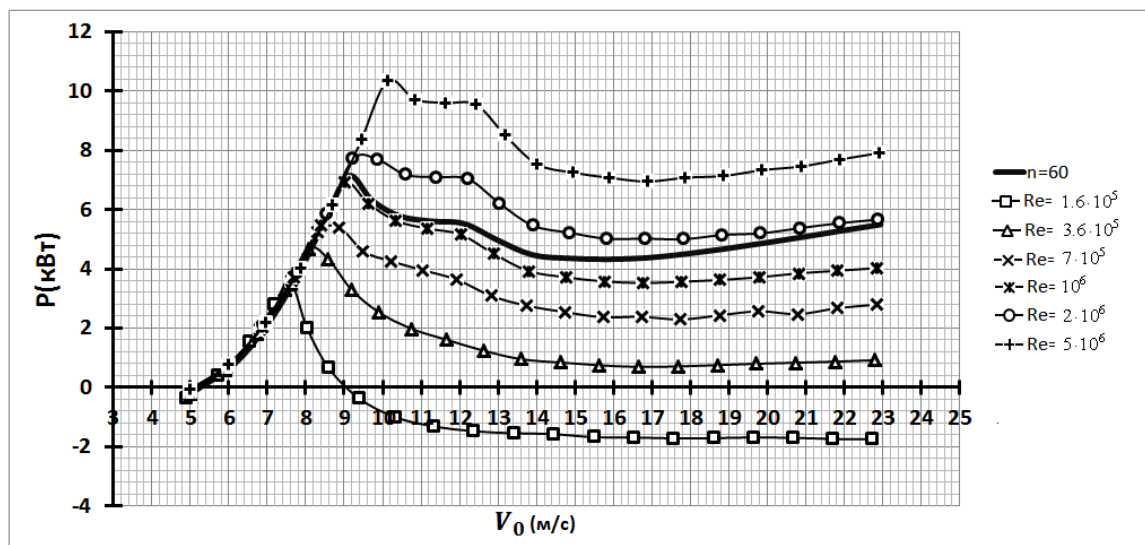


Рис. 3-56 – Залежність потужності від швидкості вітру при $n = 60$ при змінному числі Рейнольдса і від фіксованих чисел Рейнольдса

Аналогічний графік залежності потужності від швидкості вітру було побудовано для $n = 80$ (рис.3-57). Розрахунок за змінним числом Рейнольдса при $n = 80$ при вказаних вище геометричних параметрах ротора знаходиться поміж $Re = 10^6$ та $Re = 2 \cdot 10^6$.

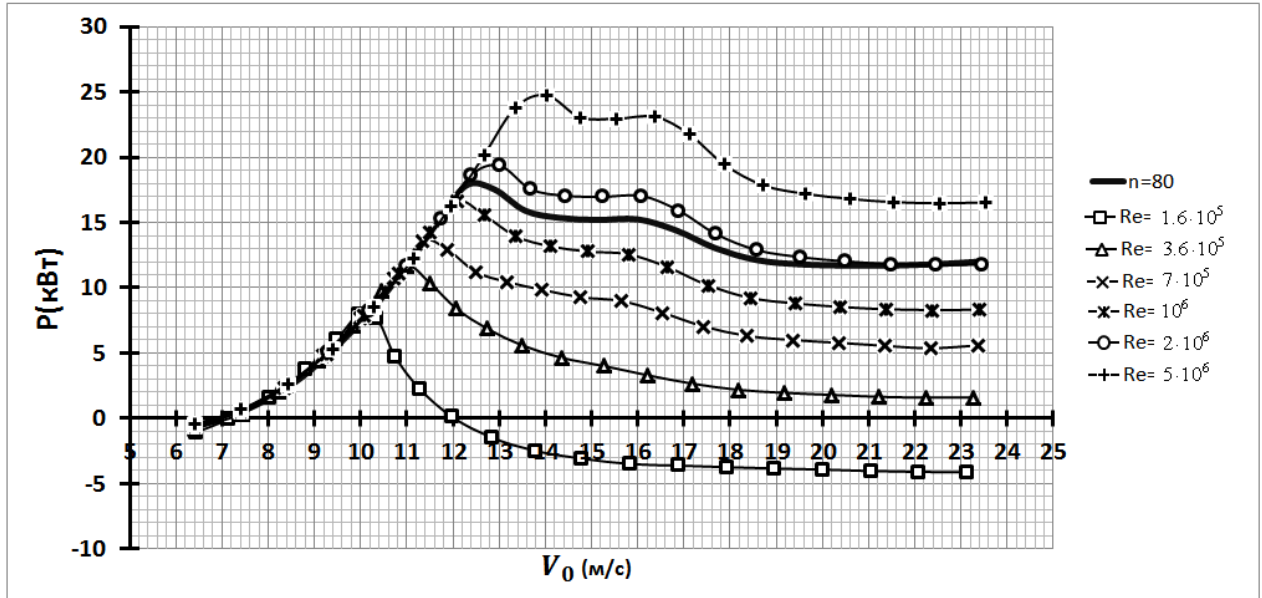


Рис. 3-57 – Залежність потужності від швидкості вітру при $n = 80$ при змінному числі Рейнольдса і від фіксованих чисел Рейнольдса

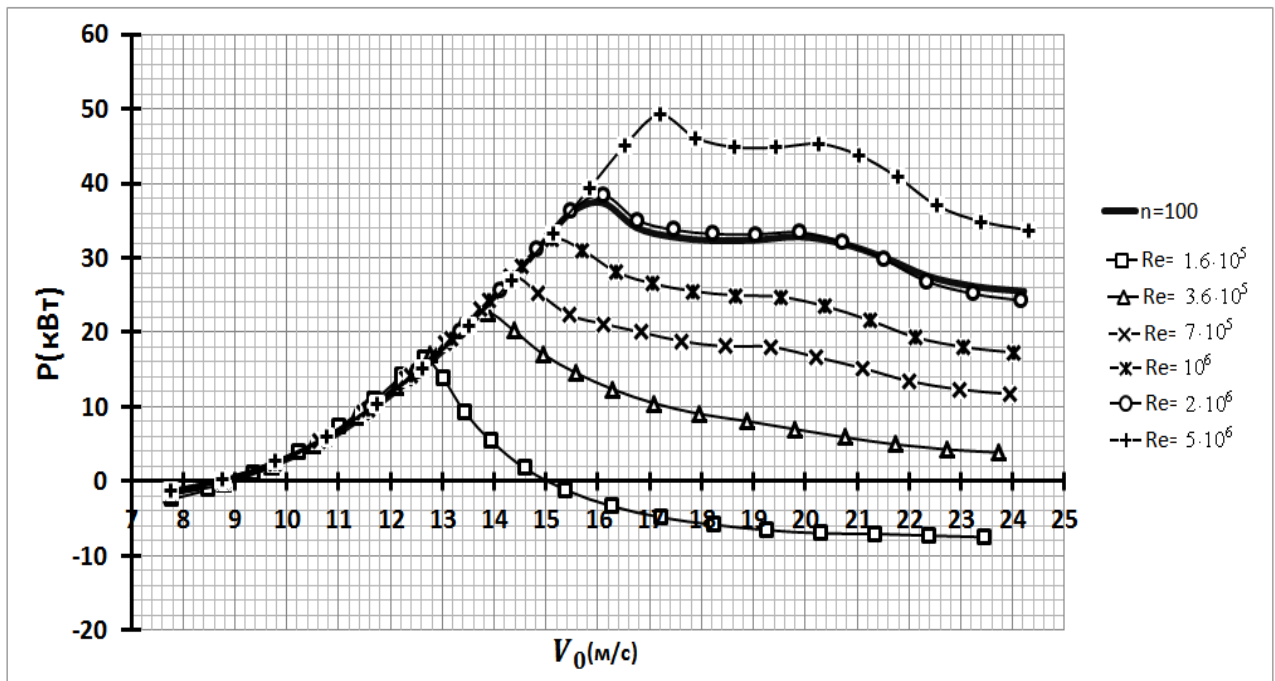


Рис. 3-58 – Залежність потужності від швидкості вітру при $n = 100$ при змінному числі Рейнольдса і від фіксованих чисел Рейнольдса

Також графік залежності потужності від швидкості вітру було побудовано і для $n = 100$ (рис.3-58). Розрахунок за змінним числом Рейнольдса при $n = 100$ при вказаних вище геометричних параметрах ротора дуже близько наближується до розрахунку при $Re = 2 \cdot 10^6$.

Отже, за графіками рис. 3-55 – рис. 3-58 маємо, що для початку розрахунку вітроагрегату не потрібно знати фіксоване число Рейнольдса, створений програмний модуль самостійно його розраховує в процесі розрахунку в залежності від положення лопаті у вітроколесі, значення швидкостей вітрових потоків V_1 та V_2 у навітряній та підвітряній частинах ометаємого об'єму. В залежності від значення місцевого числа Рейнольдса програма бере відповідні необхідні аеродинамічні коефіцієнти.

На рис.3-59 показано коефіцієнту потужності c_p при фіксованих і місцевому числах Рейнольдса ($n = 40$) в залежності від числа швидкохідності λ . При $n = 40$ за місцевим числом Рейнольдса коефіцієнт потужності досягається при $\lambda = 2.65$ і має значення $c_p = 0.4$. На рис. 3-59 крива $n = 40$ співпадає з кривою, розрахованою за фіксованим числом Рейнольдса $Re = 7 \cdot 10^5$.

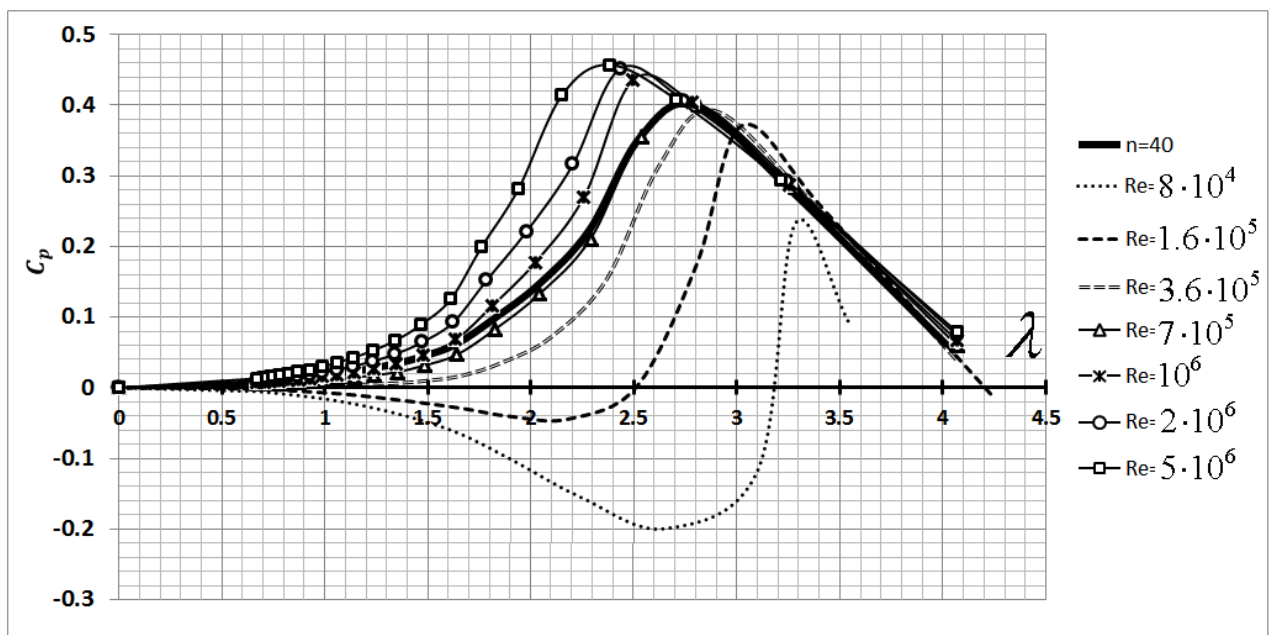


Рис. 3-59 – Залежність коефіцієнту потужності від швидкості вітру при $n = 40$ при змінному числі Рейнольдса і від фіксованих чисел Рейнольдса

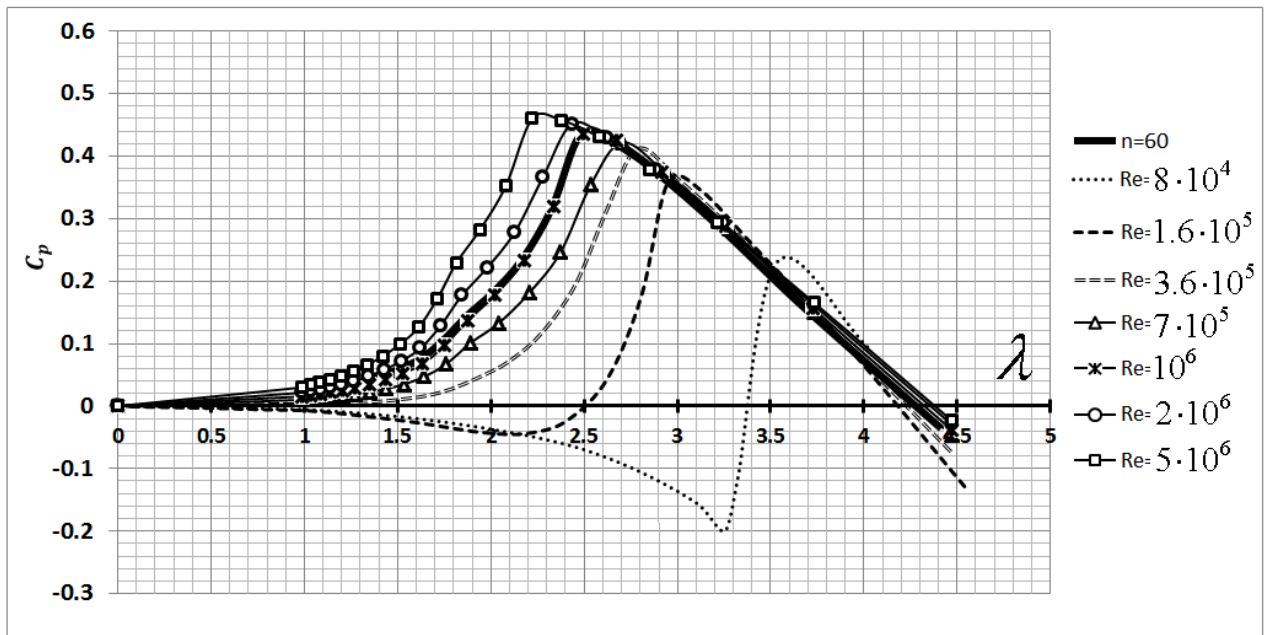


Рис. 3-60 – Залежність коефіцієнту потужності від швидкості вітру при $n = 60$ при змінному числі Рейнольдса і від фіксованих чисел Рейнольдса

Аналогічно графіку рис.3-59, у випадку $n = 60$ з графіку рис. 3-60 видно, що крива $n = 60$ співпадає з кривою, розрахованою за фіксованим числом $Re = 10^6$, у випадку $n = 80$ – крива наближається до $Re = 2 \cdot 10^6$.

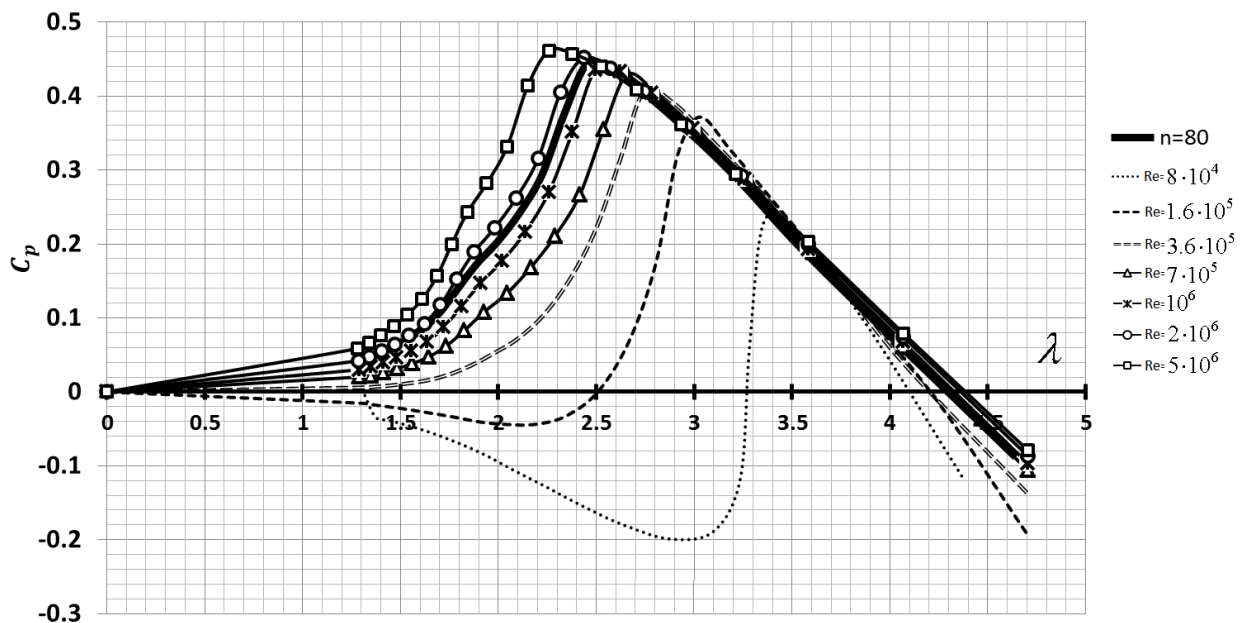


Рис. 3-61 – Залежність коефіцієнту потужності від швидкості вітру при $n = 80$ при змінному числі Рейнольдса і від фіксованих чисел Рейнольдса

З рис.3-59 – рис.3-61, видно, що при збільшенні числа Рейнольдса максимум значення коефіцієнта потужності збільшується і зміщується в сторону

зменшення числа швидкохідності. Для розглянутого вітроагрегату робочий діапазон за числом швидкохідності коливається в межах $0 < \lambda \leq 4.2$.

Надалі усі графіки представлені та розраховані за змінним числом Рейнольдса.

На рис.3-11 – рис.3-13 показано залежність потужності від швидкості вітрового потоку V_0 та кількості обертів n .

Так, наприклад, при $n = 60$ потужність досягає максимального значення $P = 7.1 \text{ кВт}$, при $n = 80$ – $P = 12 \text{ кВт}$. При швидкості вітру $V_0 = 6 \text{ м/с}$ потужність, яка може бути отримана з даної вітроустановки, коливається у значеннях від 0.75 кВт до 1.6 кВт .

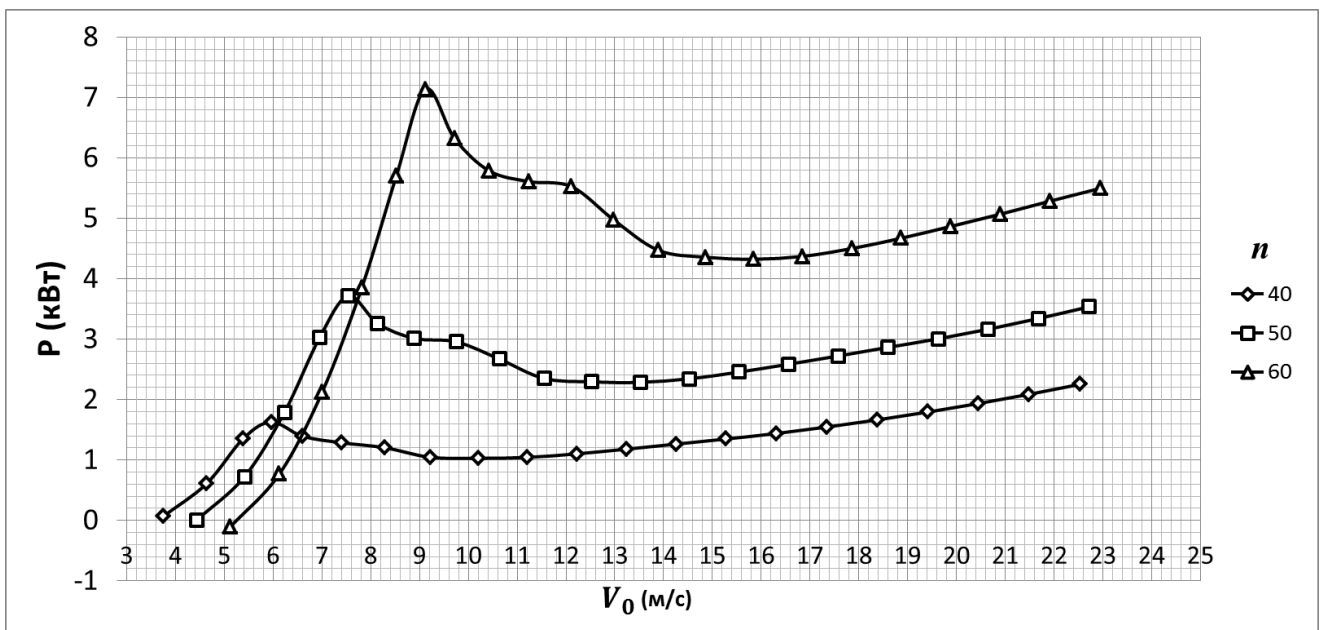


Рис. 3-62 – Залежність потужності від швидкості вітрового потоку V_0 при $n = 40, 50, 60$

При швидкості вітру $V_0 = 10 \text{ м/с}$ потужність, яка може бути отримана з даної вітроустановки, коливається у значеннях від 5 кВт до 10 кВт , якщо забезпечити діапазон чисел обертів $n = 70 - 90$.

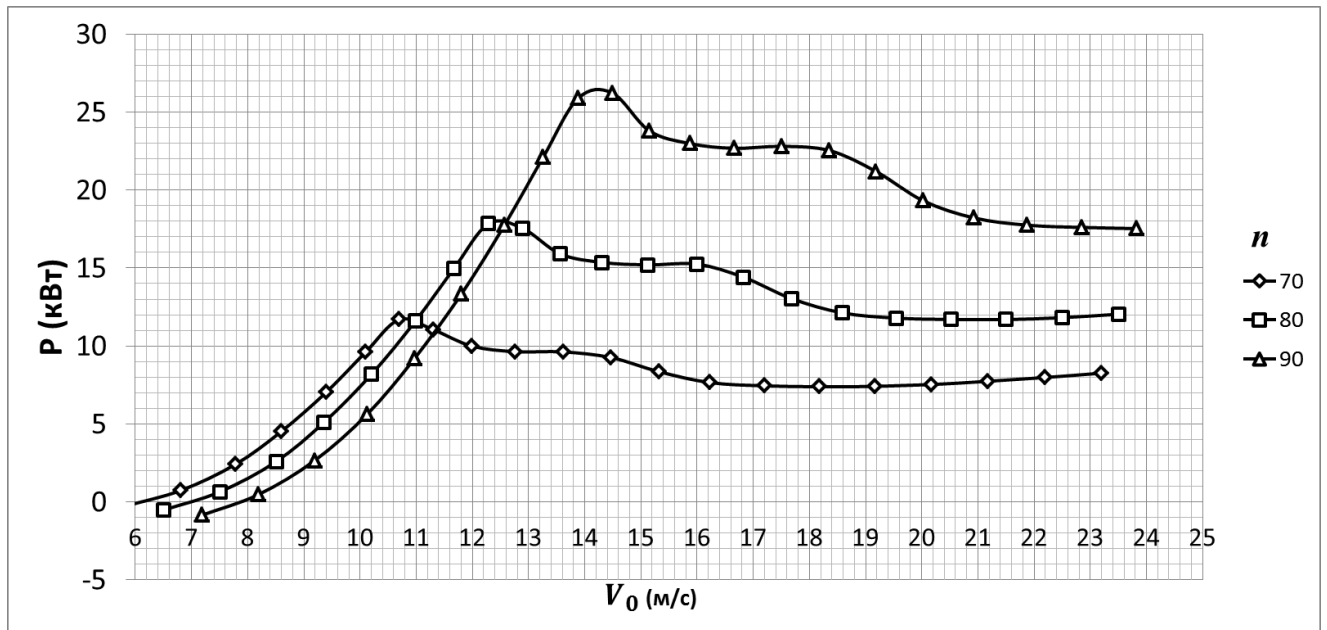


Рис. 3-63 – Залежність потужності від швидкості вітрового потоку V_0 при $n = 70, 80, 90$

При швидкості вітру $V_0 = 13 \text{ м/с}$ потужність коливається у значеннях від 10 кВт до 20 кВт у діапазоні чисел обертів $n = 100 - 120$.

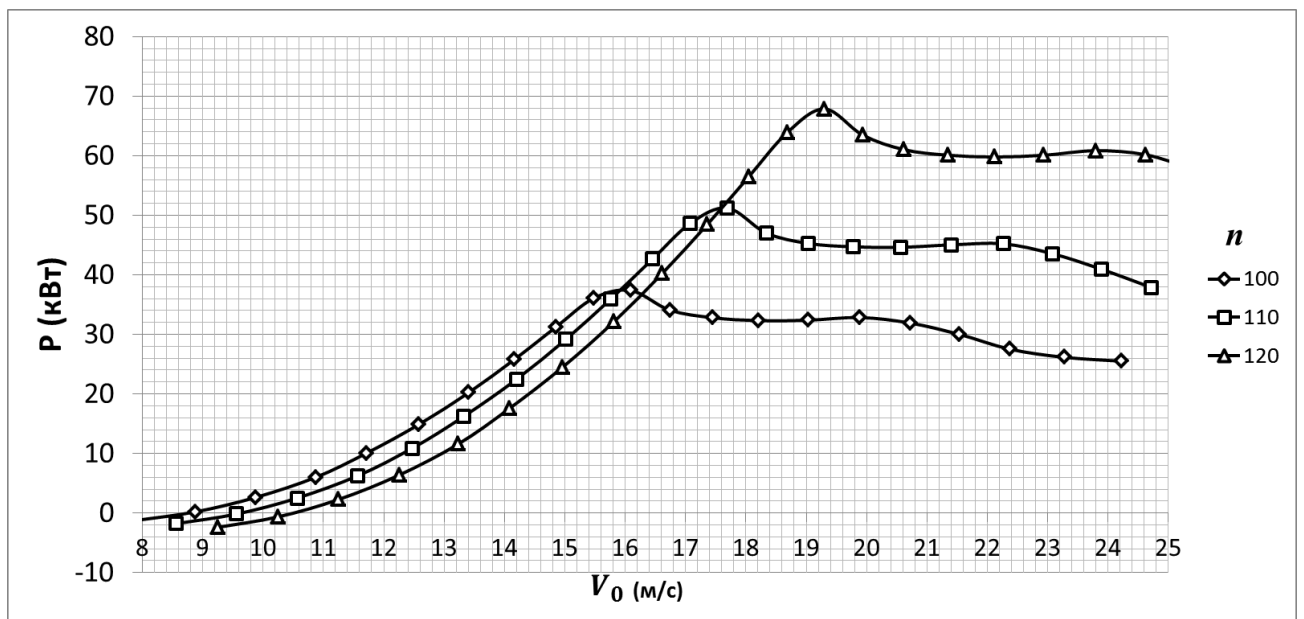


Рис. 3-64 – Залежність потужності від швидкості вітрового потоку V_0 при $n = 100, 110, 120$

При великій швидкості вітру, наприклад, $V_0 = 18 \text{ м/с}$ потужність коливається у значеннях від 31 кВт до 52 кВт у діапазоні чисел обертів $n = 100 - 120$.

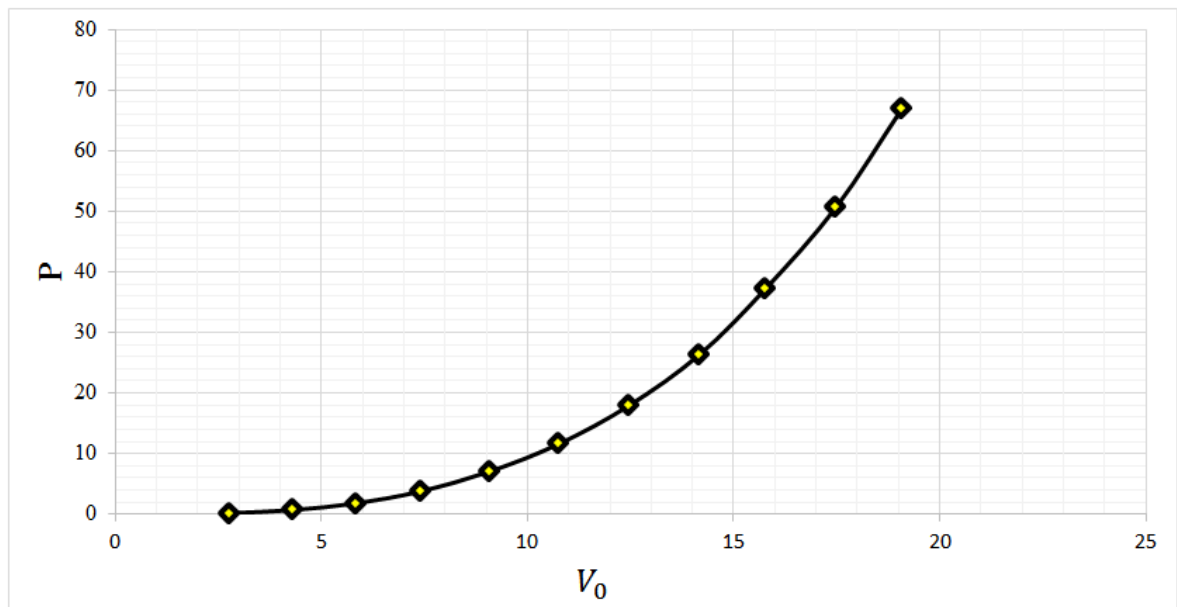


Рис. 3-65 – Залежність максимальної потужності від швидкості вітрового потоку V_0

На рис.3-65 показана залежність максимальної потужності від швидкості вітрового потоку V_0 . Рівняння кривої графіку рис.3-65 має вигляд:

$$P = 0.0081 \cdot (V_0)^{3.0585},$$

де P – в кВт, V_0 – в м/с.

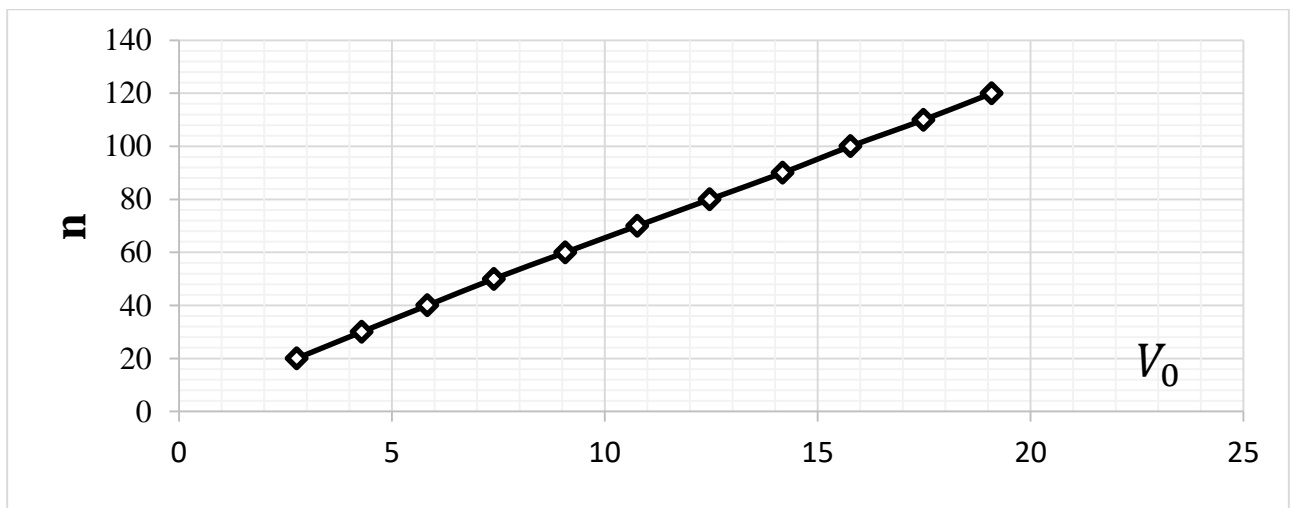


Рис. 3-66 – Залежність кількості обертів n від швидкості вітрового потоку V_0 , при якій досягається максимум коефіцієнту потужності

Крива, котра зображена на рис.3-66, показує залежність кількості обертів n від швидкості вітрового потоку V_0 , при якій досягається максимум коефіцієнту потужності.

Рівняння цієї кривої має вигляд:

$$n = 6.0696 \cdot V_0 + 4.275,$$

де n – в об/хв, V_0 – в м/с.

3.3. Висновки до розділу 3

Основні результати до третього розділу можна сформулювати таким чином:

- Розрахунок енергетичних характеристик вітроустановки в залежності від основних геометричних параметрів вітродвигуна показав, що найкраще ВЕУ працює при кількості лопатей $N = 2$ та $N = 3$;
- При безрозмірному параметрі $\gamma = l/R$ найбільш оптимальним є параметр $\gamma = 0.2$. При збільшенні цього параметру вітроустановка значно менше отримує енергії через збільшення довжини хорди лопаті, що у свою чергу зменшує кількість об'єму потоку повітря, яке проходить через навітряну частину вітроколеса;
- При варіюванні куту установки лопаті при деяких додатніх кутах установки спостерігається значне збільшення коефіцієнту потужності, кут α_0 вважається додатнім, якщо передня кромка профілю відхиляється всередину вітроколеса, і від'ємним, якщо – назовні. За отриманими графіками, варіювання куту установки лопаті є ефективним інструментом збільшення отримання енергії з вітроагрегату. Результати розрахунків показали, що передня кромка профілю повинна бути відхилена всередину вітроколеса, так, наприклад, при швидкості набігаючого потоку вітру $V_0 = 7$ м/с, оптимальний діапазон зміни кута установки лопаті повинен знаходитися в межах $3^\circ \leq \alpha_0 \leq 5^\circ$, при інших кутах коефіцієнт потужності зменшується.
- Для початкового розрахунку вітроагрегату не потрібно знати фіксоване число Рейнольдса, створений програмний модуль самостійно його розраховує в процесі розрахунку в залежності від положення лопаті у

вітроколесі, значення швидкостей вітрових потоків V_1 та V_2 у навітряній та підвітряній частинах ометаємого об'єму. В залежності від значення місцевого числа Рейнольдса програма бере відповідні необхідні аеродинамічні коефіцієнти. При заданих геометричних параметрах вітрустановки $R = 3.6 \text{ м}$, $l = 0.5 \text{ м}$, $N = 3$, $H = 3 \text{ м}$ при профілі NASA 0018 було отримані значення коефіцієнту потужності при різній кількості обертів n та швидкості вітрового потоку V_0

ВИСНОВКИ

У даній роботі розроблено нову вдосконалену методику розрахунку ротору Дар'є, яка враховує змінність числа Рейнольдса в залежності від положення елемента лопаті у вітроколесі та швидкості набіжного потоку вітру.

В розглянутій автором математичній моделі закон про зміну кількості руху застосовується окремо для *навітряної* і *підвітряної* частин вітроколеса. Таким чином, вітроколесо, як механічний об'єкт, до якого застосовується теорема про зміну кількості руху, замінюється двома умовними активними перерізами – умовними “дисками” (перший переріз – у навітряній частині вітроколеса, другий, відповідно, – у підвітряній частині), на яких, в інтегральному сенсі, враховується взаємодія потоку з лопатями.

У класичних дводисковій чи однодисковій схемах розрахунку ВОВД не враховується той факт, що окремі елементи лопаті обтікаються кожен зі своєю відносною швидкістю набіжного потоку, тому кожен елемент лопаті має своє особисте локальне місцеве число Рейнольдса. Це число є заздалегідь невідомим, оскільки заздалегідь нам невідомі швидкості V_1 та V_2 (при дводисковій моделі), чи V_1 (при однодисковій моделі), тому що вітровий потік в окресленому об'ємі вже є дещо “пом'ятим”, він втрачає деяку частку своєї незбуреної швидкості за рахунок роботи по переміщенню лопатей ВЕУ і передачі їм частини своєї кінетичної енергії.

У математичному плані реалізація дводискової імпульсної теорії зводиться до наступного алгоритму: сили, що діють на лопаті та траверси, з одного боку, виражаються через аеродинамічні коефіцієнти профілів лопаті та траверс (розраховуються за місцевими кутами атаки та місцевими відносними швидкостями, які заздалегідь невідомі); з іншого боку – ці ж самі сили виражаються за допомогою теореми імпульсів. Прирівнюючи вирази для сил, отриманих вказаними двома способами, для кожного з активних перерізів, отримуємо систему двох трансцендентних рівнянь, з якої знаходяться величини так званих індукованих швидкостей потоку в навітряній та підвітряній частинах

охоплюваного об'єму вітроенергетичної установки. При цьому рівняння для навітряної частини вдається розв'язати незалежно від рівняння для підвітряної частини, а це останнє рівняння залежить від розв'язку рівняння для навітряної частини (однодискова теорія).

У системі рівнянь дводискової імпульсної теорії вперше було ураховано елемент траверси. Траверса дає певний внесок в загальну аеродинамічну силу опору ВЕУ, тому траверсу бажано застосовувати у вигляді профільованого крила для зменшення вкладу в силу опору, причому профіль траверси бажано вибирати симетричним, щоб не виникала додаткова сила, направлена вздовж осі обертання, направлена або вгору, або вниз. Саме для таких траверс у вигляді симетричного профільованого крила розглядається дана методика врахування впливу траверс на момент та енергетичну характеристику ВЕУ.

Отримані аналітичні вирази та програмні коди допомогли дослідити вплив різних геометричних параметрів на роботу моделі вітроустановки. Отримані теоретичні та аналітичні дані можуть бути взяті за основу при проведенні подальших експериментальних досліджень у галузі вітроенергетики.

Автором створено програмний модуль для розрахунку вітрогенератора типу Дар'є, котрий дозволяє задавати геометричні параметри вітроустановки та обрати профіль із вже опрацьованих: NASA 0012, 0015, 0018, 0021, а також додати нові – шляхом вносу аеродинамічних коефіцієнтів у вже створену створену базу аеродинамічних профілів.

Для початку розрахунку вітроагрегату не потрібно знати фіксоване число Рейнольдса, створений програмний модуль самостійно його розраховує в процесі розрахунку в залежності від положення лопаті у вітроколесі, значення швидкостей вітрових потоків V_1 та V_2 у навітряній та підвітряній частинах окресленого об'єму. В залежності від значення місцевого числа Рейнольдса програма вибирає відповідні необхідні аеродинамічні коефіцієнти. При заданих геометричних параметрах вітроустановки $R = 3.6 \text{ м}$, $l = 0.5 \text{ м}$, $N = 3$, $H = 3 \text{ м}$ при профілі NASA 0018 було отримано значення коефіцієнтів потужності при різній кількості обертів n та швидкості вітрового потоку V_0 .

При варіюванні кута установки лопаті (при деяких додатніх кутах установки) спостерігається значне збільшення коефіцієнта потужності, (кут α_0 вважається додатнім, якщо передня кромка профілю відхиляється всередину вітроколеса, і від'ємним, якщо – назовні. За отриманими графіками, варіювання куту установки лопаті є ефективним інструментом збільшення отримання енергії з вітроагрегату.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abramovsky Yev.R. Aerodynamic theory of wind turbines. Study guide. Dnipro: Nauka i osvita, 2008.242 pp.
2. Golloy E. J., Honra J. Performance evaluation of a forward swept blade for vertical axis wind turbine through CFD simulation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 897.1. 2021. 012002.
3. Goman O. G., Semenov Y. A. Oblique entry of a wedge into an ideal incompressible fluid. *Fluid Dynamics*. 42(4). 2007. pp: 581-590.
4. Hernandez J., Crespo A. Aerodynamic calculation of the perfomance of horizontal–axis wind turbines and comparision with experimental results. *Wind Engineering*. V.II №4. 1987. p. 177–187.
5. Jang H., Hwang Y., Paek I. Performance Evaluation and Validation of H–Darrieus Small Vertical Axis Wind Turbine. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf–Green Tech*. 8. 2021. pp.1687–1697.
6. Kudria S., Ivanchenko I., Tuchynskiy B., Petrenko K., Karmazin O., Riepin O. Resource potential for wind-hydrogen power in Ukraine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 46.1. 2021: pp:157–168.
7. Kurbatova T., Khlyap H. State and economic prospects of developing potential of non-renewable and renewable energy resources in Ukraine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 52. 2015. pp: 217–226.
8. Lyulyov O., Pimonenko T., Kwilinski A., Dzwigol H., Dzwigol-Barosz M., Pavlyk V., Barosz P. The impact of the government policy on the energy efficient gap: The evidence from Ukraine. *Energies*. 14(2). 2021. p.373.
9. Möllerström Erik, Paul Gipe, Jos Beurskens, Fredric Ottermo. A historical review of vertical axis wind turbines rated 100 kW and above. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 105. 2019. pp.113.
10. Oleg Goman, Andrii Dreus, Anton Rozhkevych, Krystyna Heti, Volodymyr Karplyuk. Improving the efficiency of Darier rotor by controlling the aerodynamic design of blades. *Energy Reports*. 2022. Volume 8. P. 788-794.

11. Oleg Goman, Andrii Dreus, Anton Rozhkevych, Krystyna Heti. Aerodynamic improvement of Darrieus wind turbine. 4th International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering 27-30 August 2021, Florence, Italy (Virtual). *Aerodynamic improvement of Darrieus wind turbine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Sci. 897. 012001.
12. Oleg Goman, Andrii Dreus, Anton Rozhkevych, Krystyna Heti. Improving the efficiency of Darier rotor by controlling the aerodynamic design of blades. *The 5th International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering (REEE 2022)*, 24–26 August, 2022, Brest, France.
13. Paraschivoiu I. Aerodynamic analysis of the Darrieus rotor including secondary effects. *Journal of Energy*. 1983. Vol. 7. p.116.
14. Paraschivoiu I. Aerodynamic loads and rotor performance Darrieus wind turbines. *AIAA PAP*. 1981. №2582. 9pp.
15. Paraschivoiu I. Double - multiple streamtube model for Darrieus wind turbines. The Second DOE/NASA Wind Turbine Dynamics Workshop. Cleveland. Ohio. 1981.
16. Paraschivoiu I. Predicted and experimental aerodynamic forces on the Darrieus rotor. *J. Energy*. №6. 1983. p. 610–615.
17. Preuss R.O., Susssiu E.O., Morino M. Potential Aerodynamic analysis of horizontal-axis windmills. *FIFF Paper*. №132. 1977. p.1132-1140.
18. Rozhkevych A.O., Goman O.G., Tsvetaeva O.V. The use of a double-disk impulse theory to calculate the vertical – axis wind turbine. *МАТЕРІАЛИ ІХ Регіональної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Сучасні науково – технічні дослідження у контексті мовного простору» (іноземними мовами). Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара*. м. Дніпро. 23-24 квітня 2020 року. С.55–57.
19. Sheldahl, Robert E., Klimas, Paul C.. Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines. *Sandia National laboratories. Energy report*. 1981. 120 p.

20. Wilson R.E., Lissaman R. B.S., Walker S.N. Aerodynamic performance for wind turbines. Washington. 1976. p.194.
21. Zhenzhou Zhao, Dingding Wang, Tongguang Wang, Wenzhong Shen, Huiwen Liu, Ming Chen. Approaches for aerodynamic performance improvement of lift-type vertical axis wind turbine. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 49. 2022. 101789.
22. Абрамовский Е. Р. Методика последовательных приближений в расчетах аэродинамических параметров ветродвигателей. *Вісник Дніпропетр. ун-ту, Механіка. Вип.3, Т.1*. 2000. С.5 – 11.
23. Абрамовский Е. Р., Лычагин Н.Н. Некоторые алгоритмы оптимизации ветродвигателей разного типа. Диференціальні рівняння та їх застосування. *Зб. наукових праць*. Дніпро. 2003. С. 149 –157.
24. Абрамовский Е.Р., Городько С.В., Свиридов Н.В. Аэродинамика ветродвигателей: Учебное пособие. Днепропетровск. 1987. С. 220
25. Абрамовский Е.Р. Некоторые особенности оптимизации проектных параметров ортогональных ветродвигателей / Е.Р. Абрамовский, Н.Н. Лычагин // *Вісник Дніпропетровського ун-ту, Механіка*, – 2006. №2/1. – С. 42–50.
26. Абрамовский Е.Р., Лычагин Н.Н. О проектных расчетах вертикально-осевых ветродвигателей, оптимально приспособленных к локальным метеорологическим условиям. *Вісник Дніпропетровського ун-ту. Механіка. Вип.6. Т.1*. 2002. С.16–22.
27. Абрамовський Є.Р. Посібник до виконання практичних робіт із дисципліни "Проектування і розрахунок вітродвигунів" – Є.Р. Абрамовський, Ф.І. Аврахов, М.М. Личагін / Дн-ськ: РВВДНУ. 2005.–28с.
28. Абрамовський Є.Р., Личагін М.М.. Проблеми оптимізації параметрів вітряних двигунів. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2014. – 273с.
29. Бабенко Г.О. Вітроенергетичний комплекс України – досягнення проблеми, перспективи / Г. О. Бабенко, В.М. Богма, Ю.В. Жабський та інші. – К.: Новини енергетики. Спецвипуск, серпень – 2003 р. – 25с.

30. Безруких П.П. Ветроэнергетика Европы: факты и комментарии *Ж. "Энергия". №8. 1996. С. 24–30.*

31. Белопольский В.П. Энергетическая теория и аэродинамический расчет горизонтально – осевых ветротурбин. 2-е изд. Испр. и доп. Харьков, – 2008. 497с.

32. Белоцерковский С.М., Васин В.А., Локтев Б.Е. К построению нестационарной нелинейной теории воздушного винта // Изв. АН СССР. МЖГ.1979. №5.–С.97–101.

33. Бетц А. Энергия ветра и ее использование посредством ветряных двигателей: Пер. с нем. – Под ред. Д.М. Беленького. Харьков, 1933. 53 с.

34. Будзяк В. Становление ветроэнергетики в Украине. *Энергетика Украины. №3. 1992. С. 13–17.*

35. Бураго С.Г. Влияние нестационарности обтекания лопастей на аэродинамические характеристики ветродвигателя Дарье / С.Г. Бураго, А.С. Неграш // Исследование актуальных вопросов аэродинамики корпуса и крыла. – М.,–1987. С.12 – 22.

36. Васько П.В., Брыль А.А., Пекур П.П. Определение технических показателей эффективности использования ветроэлектрических агрегатов в Украине // *Энергетика и электрификация. – 1995. №2 (166). – С. 48 – 50.*

37. Васько П.Ф. Аналіз результатів вимірювань швидкості вітру в південних регіонах України за 1992 – 2000 роки відповідно до задач вітроенергетики. *Технічна електродинаміка. №1. 2002. С. 56 – 60.*

38. Васько П.Ф. Питомі характеристики енергетичного потенціалу вітру на території України. *Ж. «Энергетика и электрификация». №4. 1997. С. 53 – 55.*

39. Вашкевич К.П., Самсонов В.В. Расчет аэродинамических характеристик ветроколес вертикально - осевого типа с использованием метода дискретных вихрей. *Промышленная аэродинамика. Вып.3 (35). 1988. С. 159 – 171.*

40. Вашкевич К.П., Самсонов В.В. Расчет аэродинамических характеристик ветроколес вертикально – осевого типа с использованием метода дискретных вихрей. *Пром. Аэродинамика. № 3/35. М. 1998. С. 159 – 170.*

41. Вашкевич К.П. Численные методы расчета на ЭВМ аэродинамических характеристик ветроколес вертикально - осевого типа / К.П. Вашкевич, В.В. Самсонов // Возобновляемые источники энергии. Тез. Докл. 2-й Всесоюз. Конф., Ереван, 28-31 мая 1985, Т.2. – с. 157.

42. Ветроэлектрическая установка ВЭУ-500. – Днепропетровск: Изд-во ГКБ "Южное", 1999. –24с.

43. Волков М.І. Аеродинамічний розрахунок лопаті, що складається з передкрилка і крила. Сборник научных статей. Часть 1. Харьков. ХАИ. 1997. С. 116 – 121.

44. Волков Н.И. Вихревая модель ортогонального ветродвигателя, учитывающая торможение поток. Ж. "Вісник Сумського державного університету". №3. Суми. 1995. С. 33 – 35.

45. Глауэрт Г. Основы теории крыльев и винта. М.; Л.: Гостехиздат, - 1931.

46. Глауэрт Г. Теория воздушного винта // Аэродинамика / Под ред. В.Ф. Дюренда. М.: Оборонгиз, 1940, т.4.

47. Голубенко Н.С. Опыт разработки, создания и экспериментальной обработки ветроэлектрических агрегатов средней мощности в ГКБ "ЮЖНОЕ" / Н.С. Голубенко, В.А. Цыганов // Нетрадиционные источники, передающие системы и преобразователи энергии. – Х. – 1997, Ч.1. – с.23 – 24.

48. Гоман О.Г., Карплюк В.И. Аэродинамическая оптимизация лопасти ветроэнергетической установки с горизонтальной осью вращения. *Вісник Дніпропетр. ун-ту. Механіка. Вип. 1.Т.1.* 1998. С. 104 – 111.

49. Гоман О.Г., Ткачук Т.Е. Расчет геометрических параметров лопастей ветроэнергетических агрегатов. *Вісник Дніпропетр. ун-ту. Механіка. Вип.2, Т.1.* 1999. С.17 – 21.

50. Гоман О.Г., Рожкевич А.О. Аеродинамічний розрахунок вітрової турбіни Дар'є в залежності від різних типів профілів та місцевого числа Рейнольдса. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій.* 2023. В.36. С.40–48.

51. Гоман О.Г., Рожкевич А.О., К.В. Геті. Розрахунок ротору Дар'є в залежності від змінного числа Рейнольдса. *Вісн. Дніпр. ун-ту. Сер.: Механіка. Вип. 24. 2020. С. 69 – 79.*

52. Гончаренко С.В. Численное моделирование работы ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения. *Сб. науч.тр. Днепропетровского госуниверситета, «Математические методы расчета гидрогазодинамических течений».* Днепропетровск. 1990. С. 54 – 62.

53. Горелов Д.Н. Кузьменко Ю.Н. Экспериментальная оценка предельной мощности вектроколеса с вертикальной осью вращения. *Теплофизика и аэромеханика. Т.8. №2. 2001. С.329 – 334.*

54. Грищенко В.А. Аэродинамическая оптимизация масштабной трехлопастной двухтраверсной модели вертикально-осевого ветродвигателя / В.А. Грищенко, П.Н. Соляник, М.Л. Сургайло, В.В. Чмовж // *Вісник Харківського Національного університету.* Харків. 2002. № 551, Ч.1. - С. 114 – 118.

55. Денисенко Г.И. Проектирование и расчет ветроэлектрических электростанций: Учеб. Пособие / Г. И. Денисенко, Л. П. Федосенко, Г.А. Козловский. – К.: Издательство КПИ, – 1986. 64с.

56. Жовмір М.М., Шульга С.В. До питання про доцільність будівництва вітрових електростанцій в Україні. *Енергетика і електрифікація. №4. 2000. С.36 – 41.*

57. Карплюк В.І. Посібник до вивчення дисципліни «Аеродинаміка вітроенергетичних установок» / Карплюк В.І., М.М.Личагін. –Д.: РВВ ДНУ, 2008. – 56с.

58. Кошиенко И.Н. Анализ и разработка систем регулирования вертикально - осевых ветроэнергетических установок малой мощности. *Вестник Национального технического университета Украины "КПИ". Машиностроение. Т.35. 1999. С.175 – 178.*

59. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия: Учебник / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А. И. Яковлев – Харьков, Севастополь, Севастопольский нац. Технич. Ун-т, 2004, – Кн.2: Ветроэнергетика. – 519 с.

60. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия: Учебник / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А. И. Яковлев – Харьков, Севастополь: Нац. Аэрокосм ун-т «ХАИ», – 2003. – Кн.1: Ветроэлектрогенераторы. 400с.
61. Кудря С.А. Ветроэнергетика в Украине и в Крыму. *Устойчивый Крым. Энергетическая стратегия XXI века*. Симферополь, 2001. С.294 – 300.
62. Лойцянский Л.Г., Механика жидкости и газа. Изд. 5–е, перераб. М.:Наука, –1978. – 736 с.
63. Ляхтер В.М., Милитеев А.Н., Милитеев Д.Н. Аэродинамические нагрузки на элементы ветроагрегатов с вертикальной осью вращения // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1986, №4. – с. 138 – 146.
64. Милитеев Д.Н. Численный метод расчета нормальных нагрузок на лопасти ортогональных ветроагрегатов // Сб. науч. тр. гидропроекта, – 1988. вып. 129, –с. 113-127.
65. Приходько А.А. Редчиц Д.А. Математическое моделирование динамики и аэродинамики вертикальных осевых ветроагрегатов. *Вестник Харьковського Національного університету. Вып.5*. 2005. С. 178 - 197.
66. Редчиц Д.М., Приходько А.А. Численное моделирование связанной задачи динамики и аэродинамики ротора агрегатов. *Космическая наука и технология. Т.11.№1*. 2005. С.27 – 35.
67. Рожкевич А. О., О.Г. Гоман, Л.І. Книш. Оцінка впливу кількості лопатей на енергетичні показники вітроагрегату з вертикальною віссю оберту. *Вісн. Дніпр. ун-ту. Сер.: Механіка. Вип. 26. т.5*. 2018. С. 16 – 24.
68. Рожкевич А.О. Моделювання аеродинаміки ротора Дар'є. *VIII Міжнар. конф. «Комп'ютерна гідромеханіка». Інститут гідромеханіки Національної академії наук. м. Київ, 27-28 вересня 2022*. С.66–68.
69. Рожкевич А.О., Л.И. Кныш. Использование двухдисковой импульсной теории для расчёта вертикально-осевого ветрогенератора. *Матеріали XIX Міжнародної молодіжної конференції «Людина і космос»*. м. Дніпро. 2017. С.123.

70. Рожкова Л.Г. Прогнозируемые эксплуатационные характеристики ротора вертикально – осевой ветроэнергетической установки с лопастями, снабженными предкрылками. *Вестник Национального технического университета Украины "КПИ". Машиностроение. Т.35. 1999. С. 164 – 174.*

71. Сабинин Г.Х. Теория и аэродинамический расчет ветряных двигателей / Г.Х. Сабинин // Труды ЦАГИ. – 1931. Вып. 104. – с.59 – 60.

72. Сабинин Г.Х. Теория регулирования быстроходных ветродвигателей поворотом лопастей центробежным регулятором/ Г.Х. Сабинин // Труды ЦАГИ. – 1957.– №8 –с. 5 – 77.

73. Сабинин Г.Х. Теория стабилизаторного ветряка ЦАГИ. М.: ЦАГИ, - 1953. – 120с.

74. Самсонов В.В. Усовершенствованный метод расчета аэродинамических характеристик ветроколес вертикально – осевого типа, основанный на импульсной теории. *Пром. Аэродинам.* – М.: –1988, №3/35, с. 171 – 182.

75. Тарасов С.В. Вычислительная гидродинамика на службе ветроэнергетики / С.В. Тарасов, Д.А. Редчиц, О.Б. Полевой, И.Б. Чашина, С.В. Моисеенко // *Вісник Дніпропетровського університету. Серія Механіка.* – 2016. – №5, Т. 24 (Вип.20) – С. 38 – 47.

76. Турчак Л.И. Основы численных методов: Учеб. пособие. – М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит., 1987. – 320 с.

77. Фатеев Е.М. Методика определения параметров ветроэнергетических расчетов ветросиловых установок. М.: Изд-во АН СССР, -1957.-342с.

78. Холявко В.И. Аэродинамические исследования модели ветродвигателя с вертикальной осью вращения и с тремя вариантами лопастей / В.И. Холявко, Ю. Ф. Усик, И.Д. Еремеев, В.В. Чмовж // Отчет о НИР ХАИ, Харьков: ХАИ. 1991. – 51с.

79. Яковлев А.И. Расчет ветротурбин с вертикальной осью вращения: Учеб.пособие / А.И.Яковлев, М.А.Затучная. – Х.: Нац.аэрокосм. ун-т. «ХАИ». – 2002. – 56с.

80. Яковлев А.И. Суммарные энергетические характеристики ветроколеса с вертикальной осью вращения и различными аэродинамическими профилями рабочих лопастей / А. И. Яковлев, М.А. Затучная, И.Г. Головчинер, А.А. Зайкин // Нетрадиционные источники, передающие системы и преобразование энергии. – Х.: ХАИ, – 1997. – с. 111 – 115.

81. Яхно О.М. Ветроэнергетика: Конструирование и расчет ВЭУ: Учеб. Пособие / О.М. Яхно, Т.Г. Таурит, Н.Г. Грабар // НТУ Киевский политехнический институт. Житомирский гос. Ун-т. –2003. – 256 с.

ДОДАТОК 1

- Лістинг програми зі змінним числом Рейнольдса

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.IO;
using Excel = Microsoft.Office.Interop.Excel;
using Microsoft.Office.Interop.Excel;

namespace Diplom_6_kurs
{
    class Program
    {
        const double R = 3.6, c = 0.7 , alph0 = 0, H=5;
        const double nu = 0.0000151;
        const int N = 2, n = 50, m =100;
        const int pp = 100;
        // а и b - диапазон чисел V1
        const double a = 1, b = 21;
        // k и l - диапазон чисел omega
        const double k =2.0944 , l =12.56638 ;

        static void Main(string[] args)
        {
            double[] omega = new double [n+1];
            double[] V1= new double [m+1];
            double [,] V0 = new double [n+1,m+1];
            double[,] Cp = new double[n + 1,m+1];
            double[,] P = new double[n + 1, m + 1];
            int[] n_ob = new int[n + 1];
            double[] V_isk = {1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22};
            double h1 = Math.Abs(b - a) / m,h2 = Math.Abs( l - k) / n;
            for (int i = 0; i <= m; i++)
                V1[i] = a + h1 * i;
            for (int i = 0; i <= n; i++)
                omega[i]=k+i*h2;
            Console.WriteLine(k_lopastey());
            for (int i = 0; i <= n; i++)
            {
                for (int j = 0; j <= m; j++)
                    V0[i, j] = Uravnenie(V1[j], omega[i]);
                Console.WriteLine(i);
            }
            for (int i = 0; i <= n; i++)
            {
                for (int j = 0; j <= m; j++)
                {
                    Cp[i, j] = Uravnenie1(V1[j], omega[i], V0[i, j]) * omega[i] * R /
V0[i, j];
                    P[i, j] = 0.5 * 1.2041 * Math.Pow(V0[i, j], 3) * Cp[i,
j]/1000*2*R*H;
                    n_ob[i] = Convert.ToInt32(Math.Round(30 * omega[i]/Math.PI));
                } Console.WriteLine("расчет Cp "+i);
            }
            double[] maxP = new double[n + 1];
            double[] maxV = new double[n + 1];
            for (int i = 0; i <= n; i++)
            {
                maxP[i] = P[i, 0];

```



```

        for (int j = 1; j <= m-1; j++)
        {
            if (maxP[i] <= P[i, j] && P[i, j + 1] < P[i, j]) { maxP[i] = P[i,
j]; maxV[i] = V0[i, j]; break; }
        } Console.WriteLine("расчет Vmax and Pmax " + i);
    }
    // Vivod1(V0, V1, omega, Cp, P);
    Interpol_V(V_isk, Cp, V0, omega, maxP, maxV, n_ob);
}
private static void Interpol_V(double [] V_isk, double [,] Cp, double [,] V0,
double [] omega, double[] maxP, double[] maxV, int[] n_ob)
{
    double[,] Cp_V = new double[V_isk.Length, n+1];
    double[,] z = new double[V_isk.Length, n + 1];
    for (int gg = 0; gg <= V_isk.Length - 1; gg++)
    {
        for (int i = 0; i <= n; i++)
        {
            for (int j = 1; j <= m; j++)
            {
                if (V_isk[gg] == V0[i, j] || V_isk[gg] >= V0[i, j - 1]
&& V_isk[gg] <= V0[i, j])
                {
                    z[gg, i] = omega[i] * R / V_isk[gg];
                    Cp_V[gg, i] = Polinom_not_log(V_isk[gg], Cp[i, j],
Cp[i, j - 1], V0[i, j], V0[i, j - 1]);
                }
            }
        }
    }
    Vivod_mosh(z, Cp_V, V_isk, maxP, maxV, n_ob);
}
private static double Uravnenie(double V1, double omega)
{
    return ( V1*(1+mu()*Integral(V1, omega)));
}
private static double mu()
{
    return N * c / (16*k_lopastey() * Math.PI * R);
}
private static double Integral(double V1, double omega){
    double h, sum, sum1;
    double[] bet = new double[pp + 1];
    sum = 0; sum1 = 0;
    h = 2*Math.PI / (pp+1);
    for (int i = 0; i <= pp; i++)
        bet[i] = 0 + h * i;
    sum = (h / 2) * (func_trap(bet[0], V1, alph0 + Psi(bet[0], V1, omega),
omega) + func_trap(bet[pp], V1, alph0 + Psi(bet[pp], V1, omega), omega));
    for (int i = 1; i <= pp-1; i++)
        sum1 += h * func_trap(bet[i], V1, alph0 + Psi(bet[i], V1, omega),
omega);
    return (sum + sum1);
}
private static double func_trap(double bet, double V1, double alph, double omega)
{
    double Re=Math.Sqrt(V1*V1+omega*omega*R*R+2*R*omega*V1*Math.Sin(bet))*c/nu;

    return ((1+2*omega*R*Math.Sin(bet)/V1+omega*omega*R*R/V1/V1)) * (Cx(alph, Re)
* Math.Sin(bet - Psi(bet, V1, omega)) - Cy(alph, Re) * Math.Cos(bet - Psi(bet, V1,
omega)));
}
private static double Psi(double bet, double V1, double omega)
{

```

```

double x, y, a=0 ;
y = -V1*Math.Cos(bet);
x = R*omega + V1*Math.Sin(bet);
if (x > 0) a = Math.Atan(y /x);
else
if (x < 0)
{
    if (y >= 0) a = Math.Atan(y / x) + Math.PI;
    else
    if (y < 0) a = Math.Atan(y / x) - Math.PI;
}
else
if (x ==0)
{
    if (y > 0) a = Math.PI/2;else
    if (y < 0) a = -Math.PI/2;
}
/* */
return a;
}
private static double Cx(double alph,double Re){
    double a = 0;
    // Console.WriteLine("-----Cx-----");
    // Console.WriteLine("Re= " + Re);
    // Console.WriteLine("Rad= "+alph);
    alph = alph * 180 / Math.PI;
    // Console.WriteLine("Degree= " + alph);
    perevod:
    if (alph < 0)
        alph += 360;
    if (alph > 360)
        alph -= 360;
    if (alph<0||alph>360) goto perevod;
    // Console.WriteLine("Perevod Degree= " + alph);

    if (Re <= 10000)
    {
        double[] Cx =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/10000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/10000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCx = new Lin(ugol, Cx);
        a=linCx.Polynomial(alph);
    }
    if (Re > 10000 && Re<=20000)
    {
        double[] Cx1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/10000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/10000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] Cx2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/20000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/20000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCx1 = new Lin(ugol1, Cx1);
        Lin linCx2 = new Lin(ugol2, Cx2);
        a = Polinom(Re, linCx2.Polynomial(alph), linCx1.Polynomial(alph), 20000,
10000);
    }
}

```

```

        if (Re > 20000 && Re <= 40000)
        {
            double[] Cx1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/20000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
            double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/20000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
            double[] Cx2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/40000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
            double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/40000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
            Lin linCx1 = new Lin(ugol1, Cx1);
            Lin linCx2 = new Lin(ugol2, Cx2);
            a = Polinom(Re, linCx2.Polynomial(alph), linCx1.Polynomial(alph), 40000,
20000);
        }
        if (Re > 40000 && Re <= 80000)
        {
            double[] Cx1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/40000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
            double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/40000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
            double[] Cx2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/80000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
            double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/80000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
            Lin linCx1 = new Lin(ugol1, Cx1);
            Lin linCx2 = new Lin(ugol2, Cx2);
            a = Polinom(Re, linCx2.Polynomial(alph), linCx1.Polynomial(alph), 80000,
40000);
        }
        if (Re > 80000 && Re <= 160000)
        {
            double[] Cx1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/80000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
            double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/80000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
            double[] Cx2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/160000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
            double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/160000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
            Lin linCx1 = new Lin(ugol1, Cx1);
            Lin linCx2 = new Lin(ugol2, Cx2);
            a = Polinom(Re, linCx2.Polynomial(alph), linCx1.Polynomial(alph),
160000, 80000);
        }
        if (Re > 160000 && Re <= 360000)
        {
            double[] Cx1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/160000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
            double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/160000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();

```

```

        double[] Cx2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/360000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/360000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCx1 = new Lin(ugol1, Cx1);
        Lin linCx2 = new Lin(ugol2, Cx2);
        a = Polinom(Re, linCx2.Polynomial(alph), linCx1.Polynomial(alph),
360000, 160000);
    }
    if (Re > 360000 && Re <= 700000)
    {
        double[] Cx1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/360000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/360000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] Cx2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/700000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/700000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCx1 = new Lin(ugol1, Cx1);
        Lin linCx2 = new Lin(ugol2, Cx2);
        a = Polinom(Re, linCx2.Polynomial(alph), linCx1.Polynomial(alph),
700000, 360000);
    }
    if (Re > 700000 && Re <= 1000000)
    {
        double[] Cx1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/700000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/700000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] Cx2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/1000000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/1000000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCx1 = new Lin(ugol1, Cx1);
        Lin linCx2 = new Lin(ugol2, Cx2);
        a = Polinom(Re, linCx2.Polynomial(alph), linCx1.Polynomial(alph),
1000000, 700000);
    }
    if (Re > 1000000 && Re <= 2000000)
    {
        double[] Cx1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/1000000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/1000000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] Cx2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/2000000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/2000000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCx1 = new Lin(ugol1, Cx1);
        Lin linCx2 = new Lin(ugol2, Cx2);

```

```

        a = Polinom(Re, linCx2.Polynomial(alph), linCx1.Polynomial(alph),
2000000, 1000000);
    }
    if (Re > 2000000 && Re <= 5000000)
    {
        double[] Cx1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/2000000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/2000000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] Cx2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/5000000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/5000000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCx1 = new Lin(ugol1, Cx1);
        Lin linCx2 = new Lin(ugol2, Cx2);
        a = Polinom(Re, linCx2.Polynomial(alph), linCx1.Polynomial(alph),
5000000, 2000000);
    }
    if (Re >= 5000000)
    {
        double[] Cx1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/5000000_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/5000000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCx1 = new Lin(ugol1, Cx1);
        a = linCx1.Polynomial(alph);
    }
    // Console.WriteLine("Cx= " + a);
    // Console.WriteLine("-----Cx-----");
    // Console.ReadKey();
    return a;
}
private static double Cy(double alph, double Re)
{
    //Console.WriteLine("-----Cy-----");
    //Console.WriteLine("Re= " + Re);
    //Console.WriteLine("alph= " + alph);
    double a = 0;
    alph = alph * 180 / Math.PI;
perevod:
    if (alph < 0)
        alph += 360;
    if (alph > 360)
        alph -= 360;
    if (alph < 0 || alph > 360) goto perevod;
    //Console.WriteLine("Perevod Degree= " + alph);
    if (Re <= 10000)
    {
        double[] Cy =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/10000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/10000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCx = new Lin(ugol, Cy);
        a = linCx.Polynomial(alph);
    }
    if (Re > 10000 && Re <= 20000)
    {

```

```

        double[] Cy1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/10000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/10000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] Cy2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/20000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/20000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCy1 = new Lin(ugol1, Cy1);
        Lin linCy2 = new Lin(ugol2, Cy2);
        a = Polinom(Re, linCy2.Polynomial(alph), linCy1.Polynomial(alph), 20000,
10000);
    }
    if (Re > 20000 && Re <= 40000)
    {
        double[] Cy1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/20000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/20000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] Cy2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/40000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/40000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCy1 = new Lin(ugol1, Cy1);
        Lin linCy2 = new Lin(ugol2, Cy2);
        a = Polinom(Re, linCy2.Polynomial(alph), linCy1.Polynomial(alph), 40000,
20000);
    }
    if (Re > 40000 && Re <= 80000)
    {
        double[] Cy1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/40000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/40000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] Cy2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/80000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/80000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCy1 = new Lin(ugol1, Cy1);
        Lin linCy2 = new Lin(ugol2, Cy2);
        a = Polinom(Re, linCy2.Polynomial(alph), linCy1.Polynomial(alph), 80000,
40000);
    }
    if (Re > 80000 && Re <= 160000)
    {
        double[] Cy1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/80000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/80000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();

```

```

        double[] Cy2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/160000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/160000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCy1 = new Lin(ugol1, Cy1);
        Lin linCy2 = new Lin(ugol2, Cy2);
        a = Polinom(Re, linCy2.Polynomial(alph), linCy1.Polynomial(alph),
160000, 80000);
    }
    if (Re > 160000 && Re <= 360000)
    {
        double[] Cy1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/160000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/160000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] Cy2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/360000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/360000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCy1 = new Lin(ugol1, Cy1);
        Lin linCy2 = new Lin(ugol2, Cy2);
        // Console.WriteLine(linCy2.Polynomial(alph));
        // Console.WriteLine(linCy1.Polynomial(alph));

        a = Polinom(Re, linCy2.Polynomial(alph), linCy1.Polynomial(alph),
360000, 160000);
    }
    if (Re > 360000 && Re <= 700000)
    {
        double[] Cy1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/360000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/360000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] Cy2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/700000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/700000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCy1 = new Lin(ugol1, Cy1);
        Lin linCy2 = new Lin(ugol2, Cy2);
        a = Polinom(Re, linCy2.Polynomial(alph), linCy1.Polynomial(alph),
700000, 360000);
    }
    if (Re > 700000 && Re <= 1000000)
    {
        double[] Cy1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/700000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/700000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] Cy2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/1000000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();

```

```

        double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/1000000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCy1 = new Lin(ugol1, Cy1);
        Lin linCy2 = new Lin(ugol2, Cy2);
        a = Polinom(Re, linCy2.Polynomial(alpha), linCy1.Polynomial(alpha),
1000000, 700000);
    }
    if (Re > 1000000 && Re <= 2000000)
    {
        double[] Cy1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/1000000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/1000000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] Cy2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/2000000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/2000000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCy1 = new Lin(ugol1, Cy1);
        Lin linCy2 = new Lin(ugol2, Cy2);
        a = Polinom(Re, linCy2.Polynomial(alpha), linCy1.Polynomial(alpha),
2000000, 1000000);
    }
    if (Re > 2000000 && Re <= 5000000)
    {
        double[] Cy1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/2000000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/2000000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] Cy2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/5000000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol2 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/5000000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCy1 = new Lin(ugol1, Cy1);
        Lin linCy2 = new Lin(ugol2, Cy2);
        a = Polinom(Re, linCy2.Polynomial(alpha), linCy1.Polynomial(alpha),
5000000, 2000000);
    }
    if (Re > 5000000)
    {
        double[] Cy1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/5000000_18/Cy.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol1 =
File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/5000000_18/ugol.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCy1 = new Lin(ugol1, Cy1);
        a = linCy1.Polynomial(alpha);
    }
    //Console.WriteLine("Cy="+a);
    //Console.WriteLine("-----Cy-----");
    //Console.ReadKey();
    return a;
}
private static double k_lopastey()
{

```



```

        return ((Math.PI - 2 * 2 * Math.Atan(c / 2 / R) + 1 + Math.Sin(2 *
Math.Atan(c / 2 / R)) - Math.Cos(2 * Math.Atan(c / 2 / R))) / (Math.PI + 2 * 2 *
Math.Atan(c / 2 / R)));
    }
    private static void Vivod1(double[,] V0, double[] V1, double[] omega, double[,]
Cp, double[,] P)
    {
        Excel.Application ExcellApp = new Excel.Application();
        Excel.Workbook ObjWorkBook;
        ObjWorkBook = ExcellApp.Workbooks.Open(@"C:\Результат_диплом_6.xlsx",
Type.Missing, Type.Missing, Type.Missing, Type.Missing);
        Excel.Worksheet ObjWorkSheet;
        ObjWorkSheet = (Worksheet)ObjWorkBook.Sheets[1];
        ObjWorkSheet.Cells[1, 1] = "V0";
        ObjWorkSheet.Cells[2, 1] = "n";
        ObjWorkSheet.Cells[1, 5] = "V1";
        ObjWorkSheet.Cells[n+5, 1] = "Cp";
        ObjWorkSheet.Cells[2*n + 8, 1] = "P";
        ObjWorkSheet.Cells[3 * n + 11, 1] = "Z";
        ObjWorkSheet.Cells[2, m+5] = " w*R ";
        ObjWorkSheet.Cells[2, m + 6] = " w ";
        for (int i = 0; i < m + 1; i++)
            ObjWorkSheet.Cells[2, i + 2] = V1[i] ;
        for (int j = 0; j < n + 1; j++)
        {
            ObjWorkSheet.Cells[j + 3, 1] = Convert.ToInt32(Math.Round(30 * omega[j]
/ Math.PI));
            ObjWorkSheet.Cells[n+6+j, 1] = Convert.ToInt32(Math.Round(30 * omega[j]
/ Math.PI));
            ObjWorkSheet.Cells[2*n + j + 9, 1] = Convert.ToInt32(Math.Round(30 *
omega[j] / Math.PI));
            ObjWorkSheet.Cells[3*n+j+12, 1] = Convert.ToInt32(Math.Round(30 *
omega[j] / Math.PI));
            ObjWorkSheet.Cells[3+j, m+5] = omega[j]*R;
            ObjWorkSheet.Cells[3 + j, m + 6] = omega[j];
        }
        for (int i = 0; i < n + 1; i++)
        {
            for (int j = 0; j < m + 1; j++)
            {
                ObjWorkSheet.Cells[i + 3, j + 2] = V0[i, j];
                ObjWorkSheet.Cells[n+i +6, j + 2] = Cp[i, j];
                ObjWorkSheet.Cells[2*n + i + 9, j + 2] = P[i, j];
                ObjWorkSheet.Cells[3 * n + i + 12, j + 2] = omega[i]*R/V0[i,j];
            }
        }
        ExcellApp.Visible = true;
    }
    private static void Vivod_mosh(double[,] z, double[,] Cp_V, double[] V_isk,
double[] maxP, double[] maxV, int[] n_ob)
    {
        Excel.Application ExcellApp = new Excel.Application();
        Excel.Workbook ObjWorkBook;
        ObjWorkBook = ExcellApp.Workbooks.Open(@"C:\Moshnost.xlsx", Type.Missing,
Type.Missing, Type.Missing, Type.Missing);
        Excel.Worksheet ObjWorkSheet;
        ObjWorkSheet = (Worksheet)ObjWorkBook.Sheets[1];

        for (int j = 0; j < V_isk.Length; j++)
        {
            ObjWorkSheet.Cells[j + 3, 1] = V_isk[j] ;
            ObjWorkSheet.Cells[n + 6 + j, 1] = V_isk[j];
        }
        for (int i = 0; i < V_isk.Length; i++)
        {

```

```

        for (int j = 0; j < n+1; j++)
        {
            if (z[i, j] != 0 && Cp_V[i, j] != 0)
            {
                ObjWorkSheet.Cells[i + 3, j + 2] = z[i, j];
                ObjWorkSheet.Cells[n + i + 6, j + 2] = Cp_V[i, j];
            }
            else
            {
                ObjWorkSheet.Cells[i + 3, j + 2] = " ";
                ObjWorkSheet.Cells[n + i + 6, j + 2] = " ";
            }
        }
    }
    ObjWorkSheet.Cells[2 * V_isk.Length + 8, 1] = "n";
    ObjWorkSheet.Cells[2 * V_isk.Length + 7, 1] = "maxV";
    ObjWorkSheet.Cells[2 * V_isk.Length + 9, 1] = "maxP";
    for (int j = 0; j <= n; j++)
    {
        ObjWorkSheet.Cells[2 * V_isk.Length + 7, j + 2] = maxV[j];
        ObjWorkSheet.Cells[2 * V_isk.Length + 8, j + 2] = n_ob[j];
        ObjWorkSheet.Cells[2 * V_isk.Length + 9, j + 2] = maxP[j];
    }
    ExcellApp.Visible = true;
}
private static double Polinom (double Re, double y_1, double y, double x_1, double
x)
{
    return ((y_1 - y) / (Math.Log10(x_1) - Math.Log10(x)) * Math.Log10(Re) + y -
(y_1 - y) / (Math.Log10(x_1) - Math.Log10(x)) * Math.Log10(x));
}
private static double Polinom_not_log(double Re, double y_1, double y, double
x_1, double x)
{
    return ((y_1 - y) / (x_1 - x) * Re + y - (y_1 - y) / (x_1 - x) * x);
}
private static double Uravnenie1(double V1, double omega, double V0)
{
    return (N * c / (4 * Math.PI) * (1 / (V0 * V0 * R * R)) * R *
Integral_momenta(V1, omega));
}
private static double Integral_momenta(double V1, double omega)
{
    double h, sum, sum1;
    double[] bet = new double[pp + 1];
    sum = 0; sum1 = 0;
    h = 2 * Math.PI / (pp+1);
    for (int i = 0; i <= pp; i++)
        bet[i] = 0 + h * i;
    sum = h / 2 * (func_trap_momenta(bet[0], V1, alph0 + Psi(bet[0], V1, omega),
omega) + func_trap_momenta(bet[pp], V1, alph0 + Psi(bet[pp], V1, omega), omega));
    for (int i = 1; i <= pp-1; i++)
        sum1 = sum1 + h * func_trap_momenta(bet[i], V1, alph0 + Psi(bet[i], V1,
omega), omega);
    return (sum + sum1);
}
private static double func_trap_momenta(double bet, double V1, double alph,
double omega)
{
    double Re = Math.Sqrt(V1 * V1 + omega * omega * R * R + 2 * R * omega * V1 *
Math.Sin(bet)) * c / nu;
    return (V1 * V1 + omega * omega * R * R + 2 * R * omega * V1 *
Math.Sin(bet)) * (Cy(alph, Re) * Math.Sin(Psi(bet, V1, omega)) - Cx(alph, Re) *
Math.Cos(Psi(bet, V1, omega)));
}
}
}

```

ДОДАТОК 2

- Лістинг програми з фіксованим числом Рейнольдса

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.IO;
using Excel = Microsoft.Office.Interop.Excel;
using Microsoft.Office.Interop.Excel;

namespace Diplom_1_Reynolds
{
    class Program
    {
        const double R = 3.6, c = 0.7, alph0 = 0, H = 5;
        const double nu = 0.0000151;
        const int N = 2, n = 10, m = 20;
        const int pp = 100;
        // а и b - диапазон чисел V1
        const double a = 1, b = 21;
        // k и l - диапазон чисел omega
        const double k = 2.0944, l = 12.56638;
        const string re = "5000000";
        static void Main(string[] args)
        {
            double[] omega = new double[n + 1];
            double[] V1 = new double[m + 1];
            double[,] V0 = new double[n + 1, m + 1];
            double[,] Cp = new double[n + 1, m + 1];
            double[,] P = new double[n + 1, m + 1];
            int[] n_ob = new int[n + 1];
            double[] V_isk = { 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 };
            double h1 = Math.Abs(b - a) / m, h2 = Math.Abs(l - k) / n;
            for (int i = 0; i <= m; i++)
                V1[i] = a + h1 * i;
            for (int i = 0; i <= n; i++)
                omega[i] = k + i * h2;
            Console.WriteLine(k_lopastey());
            for (int i = 0; i <= n; i++)
            {
                for (int j = 0; j <= m; j++)
                    V0[i, j] = Uravnenie(V1[j], omega[i]);
                Console.WriteLine(i);
            }
            for (int i = 0; i <= n; i++)
            {
                for (int j = 0; j <= m; j++)
                {
                    Cp[i, j] = Uravnenie1(V1[j], omega[i], V0[i, j]) * omega[i] * R / V0[i,
j];
                    P[i, j] = 0.5 * 1.2041 * Math.Pow(V0[i, j], 3) * Cp[i, j] / 1000 * 2 * R
* H;
                    n_ob[i] = Convert.ToInt32(Math.Round(30 * omega[i] / Math.PI));
                } Console.WriteLine("расчет Cp " + i);
            }
            Vivod1(V0, V1, omega, Cp, P);
            // Interpol_V(V_isk, Cp, V0, omega);
        }
        private static void Interpol_V(double[] V_isk, double[,] Cp, double[,] V0, double[]
omega)
```

```

{
    double[,] Cp_V = new double[V_isk.Length, n + 1];
    double[,] z = new double[V_isk.Length, n + 1];
    for (int gg = 0; gg <= V_isk.Length - 1; gg++)
    {
        for (int i = 0; i <= n; i++)
        {
            for (int j = 1; j <= m; j++)
            {
                if (V_isk[gg] == V0[i, j] || V_isk[gg] >= V0[i, j - 1] && V_isk[gg]
<= V0[i, j])
                {
                    z[gg, i] = omega[i] * R / V_isk[gg];
                    Cp_V[gg, i] = Polinom_not_log(V_isk[gg], Cp[i, j], Cp[i, j - 1],
V0[i, j], V0[i, j - 1]);
                }
            }
        }
        Vivod_mosh(z, Cp_V, V_isk);
    }
    private static double Uravnenie(double V1, double omega)
    {
        return (V1 * (1 + mu() * Integral(V1, omega)));
    }
    private static double mu()
    {
        return N * c / (16 * k_lopastey() * Math.PI * R);
    }
    private static double Integral(double V1, double omega)
    {
        double h, sum, sum1;
        double[] bet = new double[pp + 1];
        sum = 0; sum1 = 0;
        h = 2 * Math.PI / (pp + 1);
        for (int i = 0; i <= pp; i++)
            bet[i] = 0 + h * i;
        sum = (h / 2) * (func_trap(bet[0], V1, alph0 + Psi(bet[0], V1, omega), omega) +
func_trap(bet[pp], V1, alph0 + Psi(bet[pp], V1, omega), omega));
        for (int i = 1; i <= pp - 1; i++)
            sum1 += h * func_trap(bet[i], V1, alph0 + Psi(bet[i], V1, omega), omega);
        return (sum + sum1);
    }
    private static double func_trap(double bet, double V1, double alph, double omega)
    {
        return ((1 + 2 * omega * R * Math.Sin(bet) / V1 + omega * omega * R * R / V1 /
V1)) * (Cx(alph) * Math.Sin(bet - Psi(bet, V1, omega)) - Cy(alph) * Math.Cos(bet - Psi(bet,
V1, omega)));
    }
    private static double Psi(double bet, double V1, double omega)
    {
        double x, y, a = 0;
        y = -V1 * Math.Cos(bet);
        x = R * omega + V1 * Math.Sin(bet);
        if (x > 0) a = Math.Atan(y / x);
        else
            if (x < 0)
            {
                if (y >= 0) a = Math.Atan(y / x) + Math.PI;
                else
                    if (y < 0) a = Math.Atan(y / x) - Math.PI;
            }
        else
            if (x == 0)

```

```

        {
            if (y > 0) a = Math.PI / 2;
            else
                if (y < 0) a = -Math.PI / 2;
        }
        return a;
    }
    private static double Cx(double alph)
    {
        // Console.WriteLine("-----Cx-----");
        // Console.WriteLine("Re= " + Re);
        // Console.WriteLine("Rad= "+alph);
        alph = alph * 180 / Math.PI;
        // Console.WriteLine("Degree= " + alph);
        perevod:
        if (alph < 0)
            alph += 360;
        if (alph > 360)
            alph -= 360;
        if (alph < 0 || alph > 360) goto perevod;
        // Console.WriteLine("Perevod Degree= " + alph);
        double[] Cx = File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/" + re + "_18/Cx.txt").Select(x =>
double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol = File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/" + re + "_18/ugol.txt").Select(x
=> double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCx = new Lin(ugol, Cx);
        return linCx.Polynomial(alph);
    }
    private static double Cy(double alph)
    {
        //Console.WriteLine("-----Cy-----");
        //Console.WriteLine("Re= " + Re);
        //Console.WriteLine("alph= " + alph);
        double a = 0;
        alph = alph * 180 / Math.PI;
        perevod:
        if (alph < 0)
            alph += 360;
        if (alph > 360)
            alph -= 360;
        if (alph < 0 || alph > 360) goto perevod;
        double[] Cy = File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/" + re + "_18/Cy.txt").Select(x
=> double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        double[] ugol = File.ReadAllLines("C:/NACA/Re_0018/" + re +
"_18/ugol.txt").Select(x => double.Parse(x.Replace(".", ","))).ToArray();
        Lin linCx = new Lin(ugol, Cy);
        a = linCx.Polynomial(alph);
        return a;
    }
    private static double k_lopастey()
    {
        return ((Math.PI - 2 * 2 * Math.Atan(c / 2 / R) + 1 + Math.Sin(2 * Math.Atan(c /
2 / R)) - Math.Cos(2 * Math.Atan(c / 2 / R))) / (Math.PI + 2 * 2 * Math.Atan(c / 2 / R)));
    }
    private static void Vivod1(double[,] V0, double[] V1, double[] omega, double[,] Cp,
double[,] P)
    {
        Excel.Application ExcellApp = new Excel.Application();
        Excel.Workbook ObjWorkBook;
        ObjWorkBook = ExcellApp.Workbooks.Open(@"C:\Результат_диплом_6.xlsx",
Type.Missing, Type.Missing, Type.Missing, Type.Missing);
        Excel.Worksheet ObjWorkSheet;
        ObjWorkSheet = (Worksheet)ObjWorkBook.Sheets[1];
        ObjWorkSheet.Cells[1, 1] = "V0";
        ObjWorkSheet.Cells[2, 1] = "n";
    }

```

```

ObjWorkSheet.Cells[1, 5] = "V1";
ObjWorkSheet.Cells[n + 5, 1] = "Cp";
ObjWorkSheet.Cells[2 * n + 8, 1] = "P";
ObjWorkSheet.Cells[3 * n + 11, 1] = "Z";
ObjWorkSheet.Cells[2, m + 5] = "w*R ";
ObjWorkSheet.Cells[2, m + 6] = "w ";
for (int i = 0; i < m + 1; i++)
    ObjWorkSheet.Cells[2, i + 2] = V1[i];
for (int j = 0; j < n + 1; j++)
{
    ObjWorkSheet.Cells[j + 3, 1] = Convert.ToInt32(Math.Round(30 * omega[j] /
Math.PI));
    ObjWorkSheet.Cells[n + 6 + j, 1] = Convert.ToInt32(Math.Round(30 * omega[j]
/ Math.PI));
    ObjWorkSheet.Cells[2 * n + j + 9, 1] = Convert.ToInt32(Math.Round(30 *
omega[j] / Math.PI));
    ObjWorkSheet.Cells[3 * n + j + 12, 1] = Convert.ToInt32(Math.Round(30 *
omega[j] / Math.PI));
    ObjWorkSheet.Cells[3 + j, m + 5] = omega[j] * R;
    ObjWorkSheet.Cells[3 + j, m + 6] = omega[j];
}
for (int i = 0; i < n + 1; i++)
{
    for (int j = 0; j < m + 1; j++)
    {
        ObjWorkSheet.Cells[i + 3, j + 2] = V0[i, j];
        ObjWorkSheet.Cells[n + i + 6, j + 2] = Cp[i, j];
        ObjWorkSheet.Cells[2 * n + i + 9, j + 2] = P[i, j];
        ObjWorkSheet.Cells[3 * n + i + 12, j + 2] = omega[i] * R / V0[i, j];
    }
}
ExcellApp.Visible = true;
}
private static void Vivod_mosh(double[,] z, double[,] Cp_V, double[] V_isk)
{
    Excel.Application ExcellApp = new Excel.Application();
    Excel.Workbook ObjWorkBook;
    ObjWorkBook = ExcellApp.Workbooks.Open(@"C:\Moshnost.xlsx", Type.Missing,
Type.Missing, Type.Missing, Type.Missing);
    Excel.Worksheet ObjWorkSheet;
    ObjWorkSheet = (Worksheet)ObjWorkBook.Sheets[1];

    for (int j = 0; j < V_isk.Length; j++)
    {
        ObjWorkSheet.Cells[j + 3, 1] = V_isk[j];
        ObjWorkSheet.Cells[n + 6 + j, 1] = V_isk[j];
    }
    for (int i = 0; i < V_isk.Length; i++)
    {
        for (int j = 0; j < n + 1; j++)
        {
            if (z[i, j] != 0 && Cp_V[i, j] != 0)
            {
                ObjWorkSheet.Cells[i + 3, j + 2] = z[i, j];
                ObjWorkSheet.Cells[n + i + 6, j + 2] = Cp_V[i, j];
            }
            else
            {
                ObjWorkSheet.Cells[i + 3, j + 2] = " ";
                ObjWorkSheet.Cells[n + i + 6, j + 2] = " ";
            }
        }
    }
}
ExcellApp.Visible = true;

```

```

    }
    private static double Polinom(double Re, double y_1, double y, double x_1, double x)
    {
        return ((y_1 - y) / (Math.Log10(x_1) - Math.Log10(x)) * Math.Log10(Re) + y -
(y_1 - y) / (Math.Log10(x_1) - Math.Log10(x)) * Math.Log10(x));
    }
    private static double Polinom_not_log(double Re, double y_1, double y, double x_1,
double x)
    {
        return ((y_1 - y) / (x_1 - x) * Re + y - (y_1 - y) / (x_1 - x) * x);
    }
    private static double Uravnenie1(double V1, double omega, double V0)
    {
        return (N * c / (4 * Math.PI) * (1 / (V0 * V0 * R * R)) * R *
Integral_momenta(V1, omega));
    }
    private static double Integral_momenta(double V1, double omega)
    {
        double h, sum, sum1;
        double[] bet = new double[pp + 1];
        sum = 0; sum1 = 0;
        h = 2 * Math.PI / (pp + 1);
        for (int i = 0; i <= pp; i++)
            bet[i] = 0 + h * i;
        sum = h / 2 * (func_trap_momenta(bet[0], V1, alph0 + Psi(bet[0], V1, omega),
omega) + func_trap_momenta(bet[pp], V1, alph0 + Psi(bet[pp], V1, omega), omega));
        for (int i = 1; i <= pp - 1; i++)
            sum1 = sum1 + h * func_trap_momenta(bet[i], V1, alph0 + Psi(bet[i], V1,
omega), omega);
        return (sum + sum1);
    }
    private static double func_trap_momenta(double bet, double V1, double alph, double
omega)
    {
        return (V1 * V1 + omega * omega * R * R + 2 * R * omega * V1 * Math.Sin(bet)) *
(Cy(alph) * Math.Sin(Psi(bet, V1, omega)) - Cx(alph) * Math.Cos(Psi(bet, V1, omega)));
    }
}
}
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;

namespace Diplom_1_Reynolds
{
    class Lin
    {
        public double[] X { get; set; }
        public double[] Y { get; set; }

        public Lin(double[] x, double[] y)
        {
            if (x.Length != y.Length) throw new ArgumentException("Размерность массивов x и
y не совпадают");
            X = new double[x.Length];
            Y = new double[y.Length];
            for (int i = 0; i < x.Length; i++)
            {
                X[i] = x[i];
                Y[i] = y[i];
            }
        }
        public double Polynomial(double m)
        {

```

```

    int k = 0;
    double a = 0, b = 0;
    for (int i = 1; i < X.Length; i++)
        if (m <= X[i] && m >= X[i - 1]) { k = i; }
    a = (Y[k] - Y[k - 1]) / (X[k] - X[k - 1]);
    b = Y[k - 1] - a * X[k - 1];
    return (a * m + b);
}
}
}

```


ДОДАТОК 3

Основні наукові результати дисертації опубліковано у роботах

1. Oleg Goman, Andrii Dreus, Anton Rozhkevych, Krystyna Heti. Aerodynamic improvement of Darrieus wind turbine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Sci. 897. 012001.

Scopus

DOI: 10.1088/1755-1315/897/1/012001.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/897/1/012001>

2. Oleg Goman, Andrii Dreus, Anton Rozhkevych, Krystyna Heti, Volodymyr Karplyuk. Improving the efficiency of Darrieus rotor by controlling the aerodynamic design of blades. *Energy Reports*. 2022. Volume 8. P. 788 – 794.

Scopus, видання, віднесене до другого квартиля Q2 відповідно до класифікації SCImago Journal

<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.162>

3. Гоман О.Г., Рожкевич А.О. Аеродинамічний розрахунок вітрової турбіни Дар'є в залежності від різних типів профілів та місцевого числа Рейнольдса. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій*. 2023. В.36. С.40 – 48.

Видання категорії Б.

<https://doi.org/10.15421/4223104>

Тези наукових доповідей

1. Рожкевич А.О., Л.И. Кныш. Использование двухдисковой импульсной теории для расчёта вертикально-осевого ветрогенератора. *Матеріали XIX Міжнародної молодіжної конференції «Людина і космос»*. м. Дніпро. 2017. С.123.

2. Rozhkevych A.O., Goman O.G., Tsvetaeva O.V. The use of a double-disk impulse theory to calculate the vertical – axis wind turbine. *МАТЕРІАЛИ IX Регіональної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Сучасні*

науково – технічні дослідження у контексті мовного простору» (іноземними мовами). Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара. м.Дніпро. 23-24 квітня 2020 року. С.55–57.

3. Oleg Goman, Andrii Dreus, Anton Rozhkevych, Krystyna Heti. Aerodynamic improvement of Darrieus wind turbine. *4th International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering 27-30 August 2021, Florence, Italy (Virtual). Aerodynamic improvement of Darrieus wind turbine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Sci. 897. 012001.

4. Рожкевич А.О. Моделювання аеродинаміки ротора Дар'є. *VIII Міжнар. конф. «Комп'ютерна гідромеханіка»*. Інститут гідромеханіки Національної академії наук. м. Київ, 27-28 вересня 2022. С.66–68.

Статті у наукових виданнях України, що додатково відображають результати дисертації

1. Рожкевич А. О., О.Г. Гоман, Л.І. Книш. Оцінка впливу кількості лопатей на енергетичні показники вітроагрегату з вертикальною віссю обертут. *Вісн. Дніпр. ун-ту. Сер.: Механіка. Вип. 26. т.5*. 2018. С. 16 – 24.

2. Гоман О.Г., Рожкевич А.О., К.В. Геті. Розрахунок ротору Дар'є в залежності від змінного числа Рейнольдса. *Вісн. Дніпр. ун-ту. Сер.: Механіка.2020. Вип. 24.С. 69–79*.

ДОДАТОК 4

Аеродинамічні коефіцієнти профілю НАСА 0012 в залежності від кута атаки α та числа Рейнольдса

α	Re=10 ⁴	
	C _y	C _x
0	0.0000	0.0337
1	0.0830	0.0338
2	0.1534	0.0343
3	0.2009	0.0351
4	0.2003	0.0359
5	0.0328	0.0351
6	-0.1413	0.0460
7	-0.1142	0.0580
8	-0.0703	0.0720
9	-0.0215	0.0860
10	0.0311	0.1010
11	0.0848	0.1170
12	0.1387	0.1340
13	0.1928	0.1520
14	0.2468	0.1710
15	0.3008	0.1900
16	0.3548	0.2100
17	0.4079	0.2310

18	0.4606	0.2520
19	0.5121	0.2740
20	0.5838	0.2970
21	0.6161	0.3200
22	0.6687	0.3440
23	0.7216	0.3690
24	0.7744	0.3940
25	0.8276	0.4200
26	0.8810	0.4460
27	0.9345	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800

85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	Re= 2 · 10 ⁴	
	C _y	C _x
0	0.0000	0.0245
1	0.1057	0.0247
2	0.2072	0.0251
3	0.3032	0.0259
4	0.3929	0.0270
5	0.4781	0.0282
6	-0.0298	0.0460
7	-0.1089	0.0580
8	-0.0699	0.0720
9	-0.0198	0.0860
10	0.0320	0.1010
11	0.0856	0.1170
12	0.1894	0.1340

13	0.1934	0.1520
14	0.2474	0.1710
15	0.3014	0.1910
16	0.3554	0.2100
17	0.4089	0.2300
18	0.4620	0.2520
19	0.5147	0.2740
20	0.5663	0.2970
21	0.6184	0.3200
22	0.6709	0.3440
23	0.7238	0.3690
24	0.7765	0.3940
25	0.8297	0.4200
26	0.8831	0.4460
27	0.9365	0.4730

30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800
85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500

105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250

135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200

165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 4 \cdot 10^4$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0175
1	0.1100	0.0177
2	0.2200	0.0181
3	0.3376	0.0189
4	0.4464	0.0199
5	0.5276	0.0218
6	0.6115	0.0232
7	-0.0212	0.0580
8	-0.0615	0.0720
9	-0.0160	0.0860
10	0.0344	0.1010
11	0.0869	0.1170
12	0.1406	0.1340
13	0.1945	0.1520
14	0.2484	0.1710
15	0.3024	0.1910
16	0.3563	0.2100
17	0.4107	0.2300

18	0.4644	0.2520
19	0.5178	0.2740
20	0.5708	0.2970
21	0.6232	0.3200
22	0.6755	0.3440
23	0.7283	0.3690
24	0.7809	0.3940
25	0.8340	0.4200
26	0.8873	0.4460
27	0.9407	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800

85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 8 \cdot 10^4$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0133
1	0.1100	0.0134
2	0.2200	0.0138
3	0.3300	0.0145
4	0.4400	0.0155
5	0.5500	0.0170
6	0.6384	0.0189
7	0.7227	0.0204
8	0.6930	0.0222
9	-0.0010	0.0600
10	0.0413	0.0600
11	0.0911	0.1170

12	0.1430	0.1340
13	0.1966	0.1520
14	0.2504	0.1710
15	0.3043	0.1900
16	0.3582	0.2100
17	0.4139	0.2310
18	0.4689	0.2520
19	0.5232	0.2740
20	0.5770	0.2970
21	0.6305	0.3200
22	0.6839	0.3440
23	0.7373	0.3690
24	0.7902	0.3940
25	0.8432	0.4200
26	0.8963	0.4460

27	0.9496	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800
85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800

100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500

130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200

160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 1.6 \cdot 10^5$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0103
1	0.1100	0.0104
2	0.2200	0.0108
3	0.3300	0.0114
4	0.4400	0.0124
5	0.5500	0.0140
6	0.6600	0.0152
7	0.7460	0.0170
8	0.8274	0.0185
9	0.8527	0.0203
10	0.1325	0.0188
11	0.1095	0.0760
12	0.1533	0.1340
13	0.2030	0.1520
14	0.2546	0.1710
15	0.3082	0.1900
16	0.3620	0.2100
17	0.4200	0.2310

18	0.4768	0.2520
19	0.5322	0.2740
20	0.5870	0.2970
21	0.6414	0.3200
22	0.6956	0.3440
23	0.7497	0.3690
24	0.8034	0.3940
25	0.8572	0.4200
26	0.9109	0.4460
27	0.9646	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800

85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 3.6 \cdot 10^5$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0079
1	0.1100	0.0080
2	0.2200	0.0084
3	0.3300	0.0089
4	0.4400	0.0098
5	0.5500	0.0113
6	0.6500	0.0125
7	0.7700	0.0135
8	0.8542	0.0153
9	0.9352	0.0167
10	0.9811	0.0184
11	0.9132	0.0204

12	0.4832	0.0217
13	0.2759	0.0222
14	0.2893	0.1060
15	0.3305	0.1900
16	0.3792	0.2100
17	0.4455	0.2310
18	0.5047	0.2520
19	0.5591	0.2740
20	0.6120	0.2970
21	0.6643	0.3200
22	0.7179	0.3444
23	0.7715	0.3690
24	0.8246	0.3940
25	0.8780	0.4200

26	0.9313	0.4460
27	0.9846	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800
85	0.2200	1.8000

90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650

125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200

160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 7 \cdot 10^5$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0067
1	0.1100	0.0068
2	0.2200	0.0070
3	0.3300	0.0075
4	0.4400	0.0083
5	0.5500	0.0097
6	0.6600	0.0108
7	0.7700	0.0118
8	0.8800	0.0128
9	0.9598	0.0144
10	1.0343	0.0159
11	1.0749	0.0175
12	1.0390	0.0195
13	0.8737	0.0216
14	0.6284	0.0236
15	0.4907	0.1170
16	0.4696	0.2100
17	0.5115	0.2310

18	0.5584	0.2520
19	0.6032	0.2740
20	0.6474	0.2970
21	0.6949	0.3200
22	0.7446	0.3444
23	0.7948	0.3690
24	0.8462	0.3940
25	0.8984	0.4200
26	0.9506	0.4460
27	1.0029	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800

85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 10^6$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0065
1	0.1100	0.0066
2	0.2200	0.0068
3	0.3300	0.0071
4	0.4400	0.0078
5	0.5500	0.0091
6	0.6600	0.0101
7	0.7700	0.0110
8	0.8800	0.0119
9	0.9661	0.0134
10	1.0512	0.0147

11	1.1097	0.0162
12	1.1212	0.0180
13	1.0487	0.0200
14	0.8846	0.0222
15	0.7108	0.0245
16	0.6060	0.1280
17	0.5906	0.2310
18	0.6030	0.2520
19	0.6334	0.2740
20	0.6716	0.2970
21	0.7162	0.3200
22	0.7613	0.3440
23	0.8097	0.3690
24	0.8589	0.3940

25	0.9093	0.4200
26	0.9618	0.4460
27	1.0144	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800

85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
α	$Re = 2 \cdot 10^6$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0064
1	0.1100	0.0064
2	0.2200	0.0066
3	0.3300	0.0069
4	0.4400	0.0073
5	0.5500	0.0081
6	0.6600	0.0090
7	0.7700	0.0097
8	0.8800	0.0105
9	0.9900	0.0113
10	1.0727	0.0128
11	1.1539	0.0110
12	1.2072	0.0155
13	1.2169	0.0172
14	1.1614	0.0191
15	1.0478	0.0213
16	0.9221	0.0237
17	0.7826	0.1380

130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
18	0.7163	0.2520
19	0.7091	0.2740
20	0.7269	0.2970
21	0.7595	0.3200
22	0.7981	0.3400
23	0.8429	0.3690
24	0.8882	0.3940
25	0.9352	0.4200
26	0.9842	0.4460
27	1.0355	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800

175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 5 \cdot 10^6$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0064
1	0.1100	0.0064
2	0.2200	0.0066
3	0.3300	0.0068
4	0.4400	0.0072
5	0.5500	0.0076
6	0.6600	0.0081
7	0.7700	0.0086
8	0.8800	0.0092
9	0.9900	0.0098
10	1.1000	0.0106
11	1.1842	0.0118

12	1.2673	0.0130
13	1.3242	0.0143
14	1.3423	0.0159
15	1.3093	0.0177
16	1.2195	0.0198
17	1.0365	0.0229
18	0.9054	0.1480
19	0.8412	0.2740
20	0.8233	0.2970
21	0.8327	0.3200
22	0.8563	0.3400
23	0.8903	0.3690
24	0.9295	0.3940
25	0.9718	0.4200
26	1.0193	0.4460

27	1.0680	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800
85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800

100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500

130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200

160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

Аеродинамічні коефіцієнти профілю НАСА 0015 в залежності від кута атаки α та числа Рейнольдса

α	Re=10 ⁴	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0360
1	0.0434	0.0362
2	0.0715	0.0366
3	0.0725	0.0373
4	0.0581	0.0383
5	0.0162	0.0393
6	-0.0781	0.0400
7	-0.1517	0.0510
8	-0.1484	0.0640
9	-0.1194	0.0770
10	-0.0791	0.0910
11	-0.0348	0.1070
12	0.0138	0.1230
13	0.0649	0.1400
14	0.1172	0.1580
15	0.1706	0.1770
16	0.2242	0.1960
17	0.2780	0.2170

18	0.3319	0.2380
19	0.3859	0.2600
20	0.4399	0.2820
21	0.4939	0.3050
22	0.5479	0.3290
23	0.6019	0.3540
24	0.6559	0.3790
25	0.7099	0.4050
26	0.7639	0.4320
27	0.8174	0.4600
30	0.8550	0.5700
35	0.9800	0.7450
40	1.0350	0.9200
45	1.0500	1.0750
50	1.0200	1.2150
55	0.9550	1.3430
60	0.8750	1.4700
65	0.7600	1.5720
70	0.6300	1.6650
75	0.5000	1.7350
80	0.3650	1.7800

85	0.2300	1.8000
90	0.0900	1.8000
95	-0.0500	1.7800
100	-0.1850	1.7500
105	-0.3200	1.7000
110	-0.4500	1.6350
115	-0.5750	1.5550
120	-0.6700	1.4650
125	-0.7600	1.3500
130	-0.8500	1.2250
135	-0.9300	1.0850
140	-0.9800	0.9250
150	-0.9000	0.7550
150	-0.7700	0.5750
155	-0.6700	0.4200
160	-0.6350	0.3200
165	-0.6800	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6600	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	Re= 2 · 10 ⁴	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0265
1	0.0891	0.0267
2	0.1740	0.0271
3	0.2452	0.0279
4	0.3041	0.0290
5	0.3359	0.0303
6	0.3001	0.0410
7	0.0570	0.0510
8	-0.1104	0.0640

9	-0.1050	0.0770
10	-0.0728	0.0910
11	-0.0300	0.1070
12	0.0173	0.1230
13	0.0678	0.1400
14	0.1193	0.1580
15	0.1721	0.1770
16	0.2256	0.1960
17	0.2792	0.2170
18	0.3331	0.2380
19	0.3869	0.2600

20	0.4409	0.2820
21	0.4949	0.3050
22	0.5489	0.3290
23	0.6029	0.3540
24	0.6569	0.3790
25	0.7109	0.4050
26	0.7649	0.4320
27	0.8191	0.4600
30	0.8550	0.5700
35	0.9800	0.7450
40	1.0350	0.9200

45	1.0500	1.0750
50	1.0200	1.2150
55	0.9550	1.3430
60	0.8750	1.4700
65	0.7600	1.5720
70	0.6300	1.6650
75	0.5000	1.7350
80	0.3650	1.7800
85	0.2300	1.8000
90	0.0900	1.8000

95	-0.0500	1.7800
100	-0.1850	1.7500
105	-0.3200	1.7000
110	-0.4500	1.6350
115	-0.5750	1.5550
120	-0.6700	1.4650
125	-0.7600	1.3500
130	-0.8500	1.2250
135	-0.9300	1.0850
140	-0.9800	0.9250

150	-0.9000	0.7550
150	-0.7700	0.5750
155	-0.6700	0.4200
160	-0.6350	0.3200
165	-0.6800	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6600	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 4 \cdot 10^4$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0196
1	0.1054	0.0198
2	0.2099	0.0202
3	0.3078	0.0209
4	0.4017	0.0219
5	0.4871	0.0232
6	0.5551	0.0249
7	0.5730	0.0267
8	0.4663	0.0520
9	0.0433	0.0770
10	-0.0413	0.0910
11	-0.0144	0.1070
12	0.0261	0.1230
13	0.0741	0.1400
14	0.1244	0.1580
15	0.1756	0.1770
16	0.2280	0.1960
17	0.2815	0.2170

18	0.3351	0.2380
19	0.3889	0.2600
20	0.4427	0.2820
21	0.4966	0.3050
22	0.5506	0.3290
23	0.6045	0.3540
24	0.6585	0.3790
25	0.7125	0.4050
26	0.7666	0.4320
27	0.8222	0.4600
30	0.8550	0.5700
35	0.9800	0.7450
40	1.0350	0.9200
45	1.0500	1.0750
50	1.0200	1.2150
55	0.9550	1.3430
60	0.8750	1.4700
65	0.7600	1.5720
70	0.6300	1.6650
75	0.5000	1.7350
80	0.3650	1.7800

85	0.2300	1.8000
90	0.0900	1.8000
95	-0.0500	1.7800
100	-0.1850	1.7500
105	-0.3200	1.7000
110	-0.4500	1.6350
115	-0.5750	1.5550
120	-0.6700	1.4650
125	-0.7600	1.3500
130	-0.8500	1.2250
135	-0.9300	1.0850
140	-0.9800	0.9250
150	-0.9000	0.7550
150	-0.7700	0.5750
155	-0.6700	0.4200
160	-0.6350	0.3200
165	-0.6800	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6600	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 8 \cdot 10^4$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0147
1	0.1100	0.0148
2	0.2200	0.0151
3	0.3300	0.0156
4	0.4186	0.0168
5	0.5180	0.0181
6	0.5048	0.0197
7	0.6760	0.0214

8	0.7189	0.0234
9	0.6969	0.0255
10	0.5122	0.0277
11	0.1642	0.0760
12	0.0749	0.1230
13	0.0967	0.1400
14	0.1382	0.1580
15	0.1861	0.1770
16	0.2364	0.1960
17	0.2873	0.2170
18	0.3393	0.2380

19	0.3927	0.2600
20	0.4463	0.2820
21	0.5001	0.3050
22	0.5539	0.3290
23	0.6078	0.3540
24	0.6617	0.3790
25	0.7156	0.4050
26	0.7700	0.4320
27	0.8277	0.4600
30	0.8550	0.5700
35	0.9800	0.7450

40	1.0350	0.9200
45	1.0500	1.0750
50	1.0200	1.2150
55	0.9550	1.3430
60	0.8750	1.4700
65	0.7600	1.5720
70	0.6300	1.6650
75	0.5000	1.7350
80	0.3650	1.7800
85	0.2300	1.8000

90	0.0900	1.8000
95	-0.0500	1.7800
100	-0.1850	1.7500
105	-0.3200	1.7000
110	-0.4500	1.6350
115	-0.5750	1.5550
120	-0.6700	1.4650
125	-0.7600	1.3500
130	-0.8500	1.2250
135	-0.9300	1.0850

140	-0.9800	0.9250
150	-0.9000	0.7550
150	-0.7700	0.5750
155	-0.6700	0.4200
160	-0.6350	0.3200
165	-0.6800	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6600	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 1.6 \cdot 10^5$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0115
1	0.1100	0.0117
2	0.2200	0.0120
3	0.3300	0.0124
4	0.4400	0.0132
5	0.5300	0.0142
6	0.6299	0.0160
7	0.7150	0.0176
8	0.7851	0.0133
9	0.8311	0.0212
10	0.8322	0.0233
11	0.7623	0.0256
12	0.5936	0.0281
13	0.3548	0.0302
14	0.2371	0.1040
15	0.2376	0.1770
16	0.2665	0.1970
17	0.3098	0.2170

18	0.3567	0.2380
19	0.4066	0.2600
20	0.4575	0.2820
21	0.5087	0.3050
22	0.5611	0.3290
23	0.6148	0.3540
24	0.6685	0.3790
25	0.7224	0.4050
26	0.7771	0.4320
27	0.8382	0.4600
30	0.8550	0.5700
35	0.9800	0.7450
40	1.0350	0.9200
45	1.0500	1.0750
50	1.0200	1.2150
55	0.9550	1.3430
60	0.8750	1.4700
65	0.7600	1.5720
70	0.6300	1.6650
75	0.5000	1.7350
80	0.3650	1.7800

85	0.2300	1.8000
90	0.0900	1.8000
95	-0.0500	1.7800
100	-0.1850	1.7500
105	-0.3200	1.7000
110	-0.4500	1.6350
115	-0.5750	1.5550
120	-0.6700	1.4650
125	-0.7600	1.3500
130	-0.8500	1.2250
135	-0.9300	1.0850
140	-0.9800	0.9250
150	-0.9000	0.7550
150	-0.7700	0.5750
155	-0.6700	0.4200
160	-0.6350	0.3200
165	-0.6800	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6600	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 3.6 \cdot 10^5$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0091
1	0.1100	0.0092
2	0.2200	0.0094
3	0.3300	0.0098
4	0.4400	0.0105
5	0.5500	0.0114
6	0.6600	0.0126
7	0.7390	0.0143

8	0.8240	0.0157
9	0.8946	0.0173
10	0.9440	0.0191
11	0.9572	0.0211
12	0.9285	0.0233
13	0.8562	0.0257
14	0.7483	0.0283
15	0.6350	0.0312
16	0.5384	0.1240
17	0.4851	0.2170

18	0.4782	0.2380
19	0.4908	0.2600
20	0.5247	0.2820
21	0.5616	0.3050
22	0.6045	0.3290
23	0.6528	0.3540
24	0.7015	0.3790
25	0.7511	0.4050
26	0.8055	0.4320
27	0.8788	0.4600

30	0.8550	0.5700
35	0.9800	0.7450
40	1.0350	0.9200
45	1.0500	1.0750
50	1.0200	1.2150
55	0.9550	1.3430
60	0.8750	1.4700
65	0.7600	1.5720
70	0.6300	1.6650
75	0.5000	1.7350
80	0.3650	1.7800
α	$Re = 7 \cdot 10^5$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0077
1	0.1100	0.0078
2	0.2200	0.0080
3	0.3300	0.0083
4	0.4400	0.0089
5	0.5500	0.0098
6	0.6600	0.0108
7	0.7483	0.0122
8	0.8442	0.0135
9	0.9260	0.0149
10	0.9937	0.0164
11	1.0363	0.0182
12	1.0508	0.0200
13	1.0362	0.0221
14	0.9801	0.0244
15	0.9119	0.0269
16	0.8401	0.0297
17	0.7799	0.1340

85	0.2300	1.8000
90	0.0900	1.8000
95	-0.0500	1.7800
100	-0.1850	1.7500
105	-0.3200	1.7000
110	-0.4500	1.6350
115	-0.5750	1.5550
120	-0.6700	1.4650
125	-0.7600	1.3500
130	-0.8500	1.2250
135	-0.9300	1.0850
18	0.7305	0.2380
19	0.7041	0.2600
20	0.6990	0.2820
21	0.7097	0.3050
22	0.7298	0.3290
23	0.7593	0.3540
24	0.7961	0.3790
25	0.8353	0.4050
26	0.8838	0.4320
27	0.9473	0.4600
30	0.8550	0.5700
35	0.9800	0.7450
40	1.0350	0.9200
45	1.0500	1.0750
50	1.0200	1.2150
55	0.9550	1.3430
60	0.8750	1.4700
65	0.7600	1.5720
70	0.6300	1.6650
75	0.5000	1.7350
80	0.3650	1.7800

140	-0.9800	0.9250
150	-0.9000	0.7550
150	-0.7700	0.5750
155	-0.6700	0.4200
160	-0.6350	0.3200
165	-0.6800	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6600	0.0550
180	0.0000	0.0250

85	0.2300	1.8000
90	0.0900	1.8000
95	-0.0500	1.7800
100	-0.1850	1.7500
105	-0.3200	1.7000
110	-0.4500	1.6350
115	-0.5750	1.5550
120	-0.6700	1.4650
125	-0.7600	1.3500
130	-0.8500	1.2250
135	-0.9300	1.0850
140	-0.9800	0.9250
150	-0.9000	0.7550
150	-0.7700	0.5750
155	-0.6700	0.4200
160	-0.6350	0.3200
165	-0.6800	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6600	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 10^6$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0074
1	0.1100	0.0075
2	0.2200	0.0076
3	0.3300	0.0079
4	0.4400	0.0083
5	0.5500	0.0091
6	0.6600	0.0101
7	0.7700	0.0111
8	0.8504	0.0126

9	0.9387	0.0138
10	1.0141	0.0152
11	1.0686	0.0168
12	1.0971	0.0186
13	1.0957	0.0205
14	1.0656	0.0225
15	1.0145	0.0249
16	0.9567	0.0275
17	0.8996	0.0303
18	0.8566	0.2380
19	0.8226	0.2600
20	0.8089	0.2820

21	0.8063	0.3050
22	0.8189	0.3290
23	0.8408	0.3540
24	0.8668	0.3790
25	0.9023	0.4050
26	0.9406	0.4320
27	0.9912	0.4600
30	0.8550	0.5700
35	0.9800	0.7450
40	1.0350	0.9200
45	1.0500	1.0750
50	1.0200	1.2150

55	0.9550	1.3430
60	0.8750	1.4700
65	0.7600	1.5720
70	0.6300	1.6650
75	0.5000	1.7350
80	0.3650	1.7800
85	0.2300	1.8000
90	0.0900	1.8000
95	-0.0500	1.7800

100	-0.1850	1.7500
105	-0.3200	1.7000
110	-0.4500	1.6350
115	-0.5750	1.5550
120	-0.6700	1.4650
125	-0.7600	1.3500
130	-0.8500	1.2250
135	-0.9300	1.0850
140	-0.9800	0.9250

150	-0.9000	0.7550
150	-0.7700	0.5750
155	-0.6700	0.4200
160	-0.6350	0.3200
165	-0.6800	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6600	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 2 \cdot 10^6$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0070
1	0.1100	0.0071
2	0.2200	0.0072
3	0.3300	0.0075
4	0.4400	0.0078
5	0.5500	0.0083
6	0.6600	0.0090
7	0.7700	0.0098
8	0.8800	0.0108
9	0.9574	0.0121
10	1.0433	0.0133
11	1.1138	0.0146
12	1.1667	0.0161
13	1.1948	0.0177
14	1.1962	0.0195
15	1.1744	0.0215
16	1.1356	0.0237
17	1.0921	0.0261

18	1.0510	0.0288
19	1.0173	0.1550
20	0.9954	0.2820
21	0.9837	0.3050
22	0.9827	0.3290
23	0.9910	0.3540
24	1.0078	0.3790
25	1.0317	0.4050
26	1.0591	0.4320
27	1.0810	0.4600
30	0.8550	0.5700
35	0.9800	0.7450
40	1.0350	0.9200
45	1.0500	1.0750
50	1.0200	1.2150
55	0.9550	1.3430
60	0.8750	1.4700
65	0.7600	1.5720
70	0.6300	1.6650
75	0.5000	1.7350
80	0.3650	1.7800

85	0.2300	1.8000
90	0.0900	1.8000
95	-0.0500	1.7800
100	-0.1850	1.7500
105	-0.3200	1.7000
110	-0.4500	1.6350
115	-0.5750	1.5550
120	-0.6700	1.4650
125	-0.7600	1.3500
130	-0.8500	1.2250
135	-0.9300	1.0850
140	-0.9800	0.9250
150	-0.9000	0.7550
150	-0.7700	0.5750
155	-0.6700	0.4200
160	-0.6350	0.3200
165	-0.6800	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6600	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 5 \cdot 10^6$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0068
1	0.1100	0.0069
2	0.2200	0.0070
3	0.3300	0.0073
4	0.4400	0.0075
5	0.5500	0.0080
6	0.6600	0.0084
7	0.7700	0.0089

8	0.8800	0.0095
9	0.9900	0.0102
10	1.0685	0.0113
11	1.1553	0.0124
12	1.2290	0.0136
13	1.2847	0.0149
14	1.2847	0.0164
15	1.3298	0.0180
16	1.3186	0.0198
17	1.2917	0.0218

18	1.2576	0.0240
19	1.2242	0.0265
20	1.1965	0.1660
21	1.1771	0.3050
22	1.1647	0.3290
23	1.1611	0.3540
24	1.1563	0.3790
25	1.1322	0.4050
26	1.1268	0.4320
27	1.1397	0.4600

30	0.8550	0.5700
35	0.9800	0.7450
40	1.0350	0.9200
45	1.0500	1.0750
50	1.0200	1.2150
55	0.9550	1.3430
60	0.8750	1.4700
65	0.7600	1.5720
70	0.6300	1.6650
75	0.5000	1.7350
80	0.3650	1.7800

85	0.2300	1.8000
90	0.0900	1.8000
95	-0.0500	1.7800
100	-0.1850	1.7500
105	-0.3200	1.7000
110	-0.4500	1.6350
115	-0.5750	1.5550
120	-0.6700	1.4650
125	-0.7600	1.3500
130	-0.8500	1.2250
135	-0.9300	1.0850

140	-0.9800	0.9250
150	-0.9000	0.7550
150	-0.7700	0.5750
155	-0.6700	0.4200
160	-0.6350	0.3200
165	-0.6800	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6600	0.0550
180	0.0000	0.0250

Аеродинамічні коефіцієнти профілю НАСА 0018 в залежності від кута атаки α та числа Рейнольдса

α	$Re=10^4$	
	C_y	C_x
0	0	0.0385
1	-0.0045	0.0387
2	-0.0154	0.0391
3	-0.0233	0.0399
4	-0.0368	0.041
5	-0.0577	0.0425
6	-0.0839	0.0443
7	-0.1182	0.0463
8	-0.1501	0.0489
9	-0.1584	0.0525
10	-0.1423	0.0574
11	-0.1125	0.08
12	-0.0767	0.123
14	0.0085	0.158
16	0.1051	0.196
18	0.207	0.238
20	0.3111	0.282
22	0.4172	0.329

α	$Re=2 \cdot 10^4$	
	C_y	C_x
0	0	0.0286
1	0.0607	0.0288
2	0.1135	0.0292
3	0.155	0.0299
4	0.1788	0.031
5	0.1788	0.0323

25	0.5775	0.405
30	0.855	0.57
35	0.98	0.745
40	1.035	0.92
45	1.05	1.075
50	1.02	1.215
55	0.955	1.345
60	0.875	1.47
65	0.76	1.575
70	0.63	1.665
75	0.5	1.735
80	0.365	1.78
85	0.23	1.8
90	0.09	1.8
95	-0.05	1.78
100	-0.185	1.75
105	-0.32	1.7
110	-0.45	1.63
115	-0.575	1.555
120	-0.67	1.465

6	0.1582	0.0339
7	0.1161	0.0358
8	0.0214	0.0376
9	-0.0682	0.0396
10	-0.1003	0.063
12	-0.0302	0.123
14	0.0172	0.158
16	0.1114	0.196
18	0.212	0.238

125	-0.76	1.35
130	-0.85	1.225
135	-0.93	1.085
140	-0.98	0.925
145	-0.9	0.755
150	-0.77	0.575
155	-0.67	0.42
160	-0.635	0.32
165	-0.68	0.23
170	-0.85	0.14
175	-0.66	0.055
180	0	0.025

20	0.3151	0.282
22	0.4198	0.329
25	0.5798	0.405
30	0.855	0.57
35	0.98	0.746
40	1.035	0.92
45	1.05	1.075
50	1.02	1.215
55	0.955	1.345

60	0.875	1.47
65	0.76	1.575
70	0.63	1.665
75	0.5	1.735
80	0.365	1.78
85	0.23	1.8
90	0.09	1.8
95	-0.05	1.78
100	-0.185	1.75

105	-0.32	1.7
110	-0.45	1.63
115	-0.57	1.55
120	-0.67	1.465
125	-0.76	1.35
130	-0.85	1.225
135	-0.93	1.085
140	-0.98	0.925
145	-0.9	0.755

150	-0.77	0.575
155	-0.67	0.42
160	-0.635	0.32
165	-0.68	0.23
170	-0.85	0.14
175	-0.66	0.055
180	0	0.25

α	$Re = 4 \cdot 10^4$	
	Cy	Cx
0	0	0.0214
1	0.0936	0.0215
2	0.1833	0.0219
3	0.2688	0.0225
4	0.3495	0.0235
5	0.4117	0.0247
6	0.4573	0.0263
7	0.4758	0.0282
8	0.4428	0.0303
9	0.3544	0.0327
10	0.2108	0.062
12	0.0139	0.123
14	0.0489	0.158
16	0.1287	0.196
18	0.2228	0.238

20	0.3236	0.282
22	0.4265	0.329
25	0.584	0.405
30	0.855	0.57
35	0.98	0.746
40	1.035	0.92
45	1.05	1.075
50	1.02	1.215
55	0.955	1.345
60	0.875	1.47
65	0.76	1.575
70	0.63	1.665
75	0.5	1.735
80	0.365	1.78
85	0.23	1.8
90	0.09	1.8
95	-0.05	1.78

100	-0.185	1.75
105	-0.32	1.7
110	-0.45	1.63
115	-0.57	1.55
120	-0.67	1.465
125	-0.76	1.35
130	-0.85	1.225
135	-0.93	1.085
140	-0.98	0.925
145	-0.9	0.755
150	-0.77	0.575
155	-0.67	0.42
160	-0.635	0.32
165	-0.68	0.23
170	-0.85	0.14
175	-0.66	0.055
180	0	0.25

α	$Re = 8 \cdot 10^4$	
	Cy	Cx
0	0	0.0162
1	0.0889	0.0163
2	0.1935	0.0167
3	0.2924	0.0172
4	0.388	0.0181
5	0.4753	0.0192
6	0.5615	0.0206
7	0.6224	0.0223
8	0.6589	0.0242
9	0.6606	0.0264
10	0.6248	0.0288
11	0.5531	0.0315
12	0.4408	0.08
14	0.2256	0.158
16	0.2027	0.196

18	0.2603	0.238
20	0.3472	0.282
22	0.443	0.329
25	0.5963	0.405
30	0.855	0.57
35	0.98	0.745
40	1.035	0.92
45	1.05	1.075
50	1.02	1.215
55	0.955	1.345
60	0.875	1.47
65	0.76	1.575
70	0.63	1.665
75	0.5	1.735
80	0.365	1.78
85	0.23	1.8
90	0.09	1.8
95	-0.05	1.78

100	-0.185	1.75
105	-0.32	1.7
110	-0.45	1.635
115	-0.575	1.555
120	-0.67	1.465
125	-0.76	1.35
130	-0.85	1.225
135	-0.93	1.085
140	-0.98	0.925
145	-0.9	0.755
150	-0.77	0.575
155	-0.67	0.42
160	-0.635	0.32
165	-0.68	0.23
170	-0.85	0.14
175	-0.66	0.055
180	0	0.025

α	$Re= 1.6 \cdot 10^5$	
	Cy	Cx
0	0.00000	0.01280
1	0.11000	0.01290
2	0.22000	0.01310
3	0.30880	0.01370
4	0.41140	0.01440
5	0.50680	0.01530
6	0.59600	0.01660
7	0.67240	0.01810
8	0.73730	0.01980
9	0.77810	0.02170
10	0.79490	0.02380
11	0.78520	0.02620
12	0.74880	0.02880
13	0.69230	0.07700
14	0.62370	0.15800
16	0.48960	0.19600

18	0.42020	0.23800
20	0.43820	0.28200
22	0.50260	0.32900
25	0.63210	0.40500
30	0.85500	0.57000
35	0.98000	0.74500
40	1.03500	0.92000
45	1.05000	1.07500
50	1.02000	1.21500
55	0.95500	1.34500
60	0.87500	1.47000
65	0.76000	1.57500
70	0.63000	1.66500
75	0.50000	1.73500
80	0.36500	1.78000
85	0.23000	1.80000
90	0.09000	1.80000
95	-0.05000	1.78000

100	-0.18500	1.75000
105	-0.32000	1.70000
110	-0.45000	1.63500
115	-0.57500	1.55500
120	-0.67000	1.46500
125	-0.76000	1.35000
130	-0.85000	1.22500
135	-0.93000	1.08500
140	-0.98000	0.92500
145	-0.90000	0.75500
150	-0.77000	0.57500
155	-0.67000	0.42000
160	-0.63500	0.32000
165	-0.68000	0.23000
170	-0.85000	0.14000
175	-0.66000	0.05500
180	0.00000	0.02500

α	$Re= 3.6 \cdot 10^5$	
	Cy	Cx
0	0.00000	0.01010
1	0.11000	0.01020
2	0.22000	0.01040
3	0.33000	0.01070
4	0.44000	0.01120
5	0.52400	0.01210
6	0.62280	0.01320
7	0.71000	0.01450
8	0.78790	0.01590
9	0.85260	0.01760
10	0.89830	0.01940
11	0.92490	0.02130
12	0.92790	0.02350
13	0.91040	0.02590
14	0.88030	0.09400
16	0.80070	0.19600

18	0.73190	0.23800
20	0.69970	0.28200
22	0.70500	0.32900
25	0.77240	0.40500
30	0.85500	0.57000
35	0.98000	0.74500
40	1.03500	0.92000
45	1.05000	1.07500
50	1.02000	1.21500
55	0.95500	1.34500
60	0.87500	1.47000
65	0.76000	1.57500
70	0.63000	1.66500
75	0.50000	1.73500
80	0.36500	1.78000
85	0.23000	1.80000
90	0.09000	1.80000
95	-0.05000	1.78000

100	-0.18500	1.75000
105	-0.32000	1.70000
110	-0.45000	1.63500
115	-0.57500	1.55500
120	-0.67000	1.46500
125	-0.76000	1.35000
130	-0.85000	1.22500
135	-0.93000	1.08500
140	-0.98000	0.92500
145	-0.90000	0.75500
150	-0.77000	0.57500
155	-0.67000	0.42000
160	-0.63500	0.32000
165	-0.68000	0.23000
170	-0.85000	0.14000
175	-0.66000	0.05500
180	0.00000	0.02500

α	$Re= 7 \cdot 10^5$	
	Cy	Cx
0	0	0.0085
1	0.11	0.0087
2	0.22	0.0088
3	0.33	0.0091
4	0.44	0.0096

5	0.55	0.0102
6	0.6328	0.0112
7	0.7291	0.0123
8	0.8156	0.0136
9	0.8904	0.015
10	0.9541	0.0166
11	0.9973	0.0183

12	1.0245	0.0202
13	1.0289	0.0223
14	1.0175	0.0245
15	0.9938	0.102
16	0.9648	0.196
18	0.915	0.238
20	0.8877	0.282

22	0.8867	0.329
25	0.9326	0.405
30	0.855	0.57
35	0.98	0.742
40	1.035	0.92
45	1.05	1.075
50	1.02	1.215
55	0.955	1.345
60	0.875	1.47
65	0.76	1.575
70	0.63	1.665

75	0.5	1.735
80	0.365	1.78
85	0.23	1.8
90	0.09	1.8
95	-0.05	1.78
100	-0.185	1.75
105	-0.32	1.7
110	-0.45	1.635
115	-0.575	1.555
120	-0.67	1.465
125	-0.76	1.35

130	-0.85	1.225
135	-0.93	1.085
140	-0.98	0.925
145	-0.9	0.755
150	-0.77	0.575
155	-0.67	0.42
160	-0.635	0.32
165	-0.68	0.23
170	-0.85	0.14
175	-0.66	0.055
180	0	0.025

α	$Re = 10^6$	
	Cy	Cx
0	0	0.0082
1	0.11	0.0082
2	0.22	0.0083
3	0.33	0.0086
4	0.44	0.0089
5	0.55	0.0095
6	0.66	0.0102
7	0.7362	0.0115
8	0.8256	0.0126
9	0.9067	0.0139
10	0.9751	0.0154
11	1.0284	0.017
12	1.0664	0.0187
13	1.0804	0.0206
14	1.0793	0.0227
15	1.0624	0.0251

16	1.0402	0.108
18	0.9959	0.238
20	0.9707	0.282
22	0.9696	0.329
25	1.0107	0.405
30	0.855	0.57
35	0.98	0.745
40	1.035	0.92
45	1.05	1.075
50	1.02	1.215
55	0.955	1.345
60	0.875	1.47
65	0.76	1.575
70	0.63	1.665
75	0.5	1.735
80	0.365	1.78
85	0.23	1.8
90	0.09	1.8

95	-0.05	1.78
100	-0.185	1.75
105	-0.32	1.7
110	-0.45	1.635
115	-0.575	1.555
120	-0.67	1.465
125	-0.76	1.35
130	-0.85	1.225
135	-0.93	1.085
140	-0.98	0.925
145	-0.9	0.755
150	-0.77	0.575
155	-0.67	0.42
160	-0.635	0.32
165	-0.68	0.23
170	-0.85	0.14
175	-0.66	0.055
180	0	0.025

α	$Re = 2 \cdot 10^6$	
	Cy	Cx
0	0	0.0077
1	0.11	0.0077
2	0.22	0.0078
3	0.33	0.008
4	0.44	0.0084
5	0.55	0.0087
6	0.66	0.0093
7	0.7449	0.0101
9	0.9314	0.0122
10	1.0111	0.0134

11	1.0772	0.0148
12	1.1296	0.0163
13	1.1662	0.0179
14	1.1813	0.0197
15	1.1813	0.0218
16	1.1695	0.024
17	1.155	0.12
18	1.1383	0.238
20	1.1172	0.282
22	1.1127	0.329
25	1.1468	0.405
30	0.855	0.57
35	0.98	0.745

40	1.035	0.92
45	1.05	1.075
50	1.02	1.215
55	0.955	1.345
60	0.875	1.47
65	0.76	1.575
70	0.63	1.665
75	0.5	1.735
80	0.365	1.78
85	0.23	1.8
90	0.09	1.8
95	-0.05	1.78
100	-0.185	1.75

105	-0.32	1.7
110	-0.45	1.635
115	-0.575	1.555
120	-0.67	1.465
125	-0.76	1.35
130	-0.85	1.225

135	-0.93	1.085
140	-0.98	0.925
145	-0.9	0.755
150	-0.77	0.575
155	-0.67	0.42
160	-0.635	0.32

165	-0.68	0.23
170	-0.85	0.14
175	-0.66	0.055
180	0	0.025

α	$Re = 5 \cdot 10^6$	
	C_y	C_x
0	0.00000	0.0073
1	0.11000	0.0073
2	0.22000	0.0075
3	0.33000	0.0077
4	0.44000	0.0079
5	0.55000	0.0083
6	0.66000	0.0087
7	0.77000	0.0093
8	0.85380	0.01
9	0.95250	0.0108
10	1.04040	0.0117
11	1.12110	0.0128
12	1.18840	0.014
13	1.24300	0.0153
14	1.28080	0.0168
15	1.30040	0.0185
16	1.30670	0.0203
17	1.30380	0.0223

18	1.29600	0.0244
19	1.28530	0.14
20	1.27680	0.282
22	1.27140	0.329
25	1.29250	0.405
30	0.85500	0.57
35	0.98000	0.746
40	1.03500	0.92
45	1.05000	1.075
50	1.02000	1.215
55	0.95500	1.345
60	0.87500	1.47
65	0.76000	1.575
70	0.63	1.665
75	0.5	1.735
80	0.365	1.78
85	0.23	1.8
90	0.09	1.8
95	-0.05	1.78
100	-0.185	1.75

105	-0.32	1.7
110	-0.45	1.63
115	-0.57	1.55
120	-0.67	1.465
125	-0.76	1.35
130	-0.85	1.225
135	-0.93	1.085
140	-0.98	0.925
145	-0.9	0.755
150	-0.77	0.575
155	-0.67	0.42
160	-0.635	0.32
165	-0.68	0.23
170	-0.85	0.14
175	-0.66	0.055
180	0	0.25

Аеродинамічні коефіцієнти профілю NACA 0021 в залежності від кута атаки α та числа Рейнольдса

α	$Re=10^4$	
	C_y	C_x
0	0.0000	0.0337
1	0.0830	0.0338
2	0.1534	0.0343
3	0.2009	0.0351
4	0.2003	0.0359
5	0.0328	0.0351
6	-0.1413	0.0460
7	-0.1142	0.0580
8	-0.0703	0.0720

9	-0.0215	0.0860
10	0.0311	0.1010
11	0.0848	0.1170
12	0.1387	0.1340
13	0.1928	0.1520
14	0.2468	0.1710
15	0.3008	0.1900
16	0.3548	0.2100
17	0.4079	0.2310
18	0.4606	0.2520
19	0.5121	0.2740
20	0.5838	0.2970

21	0.6161	0.3200
22	0.6687	0.3440
23	0.7216	0.3690
24	0.7744	0.3940
25	0.8276	0.4200
26	0.8810	0.4460
27	0.9345	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150

55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800
85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800

100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250

145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 2 \cdot 10^4$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0245
1	0.1057	0.0247
2	0.2072	0.0251
3	0.3032	0.0259
4	0.3929	0.0270
5	0.4781	0.0282
6	-0.0298	0.0460
7	-0.1089	0.0580
8	-0.0699	0.0720
9	-0.0198	0.0860
10	0.0320	0.1010
11	0.0856	0.1170
12	0.1894	0.1340
13	0.1934	0.1520
14	0.2474	0.1710
15	0.3014	0.1910
16	0.3554	0.2100
17	0.4089	0.2300

18	0.4620	0.2520
19	0.5147	0.2740
20	0.5663	0.2970
21	0.6184	0.3200
22	0.6709	0.3440
23	0.7238	0.3690
24	0.7765	0.3940
25	0.8297	0.4200
26	0.8831	0.4460
27	0.9365	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800

85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 4 \cdot 10^4$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0175
1	0.1100	0.0177
2	0.2200	0.0181
3	0.3376	0.0189
4	0.4464	0.0199
5	0.5276	0.0218
6	0.6115	0.0232
7	-0.0212	0.0580
8	-0.0615	0.0720

9	-0.0160	0.0860
10	0.0344	0.1010
11	0.0869	0.1170
12	0.1406	0.1340
13	0.1945	0.1520
14	0.2484	0.1710
15	0.3024	0.1910
16	0.3563	0.2100
17	0.4107	0.2300
18	0.4644	0.2520
19	0.5178	0.2740

20	0.5708	0.2970
21	0.6232	0.3200
22	0.6755	0.3440
23	0.7283	0.3690
24	0.7809	0.3940
25	0.8340	0.4200
26	0.8873	0.4460
27	0.9407	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200

45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800
85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000

95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250

145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 8 \cdot 10^4$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0133
1	0.1100	0.0134
2	0.2200	0.0138
3	0.3300	0.0145
4	0.4400	0.0155
5	0.5500	0.0170
6	0.6384	0.0189
7	0.7227	0.0204
8	0.6930	0.0222
9	-0.0010	0.0600
10	0.0413	0.0600
11	0.0911	0.1170
12	0.1430	0.1340
13	0.1966	0.1520
14	0.2504	0.1710
15	0.3043	0.1900
16	0.3582	0.2100
17	0.4139	0.2310

18	0.4689	0.2520
19	0.5232	0.2740
20	0.5770	0.2970
21	0.6305	0.3200
22	0.6839	0.3440
23	0.7373	0.3690
24	0.7902	0.3940
25	0.8432	0.4200
26	0.8963	0.4460
27	0.9496	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800

85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 1.6 \cdot 10^5$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0103
1	0.1100	0.0104
2	0.2200	0.0108
3	0.3300	0.0114
4	0.4400	0.0124
5	0.5500	0.0140
6	0.6600	0.0152
7	0.7460	0.0170

8	0.8274	0.0185
9	0.8527	0.0203
10	0.1325	0.0188
11	0.1095	0.0760
12	0.1533	0.1340
13	0.2030	0.1520
14	0.2546	0.1710
15	0.3082	0.1900
16	0.3620	0.2100
17	0.4200	0.2310
18	0.4768	0.2520

19	0.5322	0.2740
20	0.5870	0.2970
21	0.6414	0.3200
22	0.6956	0.3440
23	0.7497	0.3690
24	0.8034	0.3940
25	0.8572	0.4200
26	0.9109	0.4460
27	0.9646	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450

40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800
85	0.2200	1.8000

90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850

140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 3.6 \cdot 10^5$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0079
1	0.1100	0.0080
2	0.2200	0.0084
3	0.3300	0.0089
4	0.4400	0.0098
5	0.5500	0.0113
6	0.6500	0.0125
7	0.7700	0.0135
8	0.8542	0.0153
9	0.9352	0.0167
10	0.9811	0.0184
11	0.9132	0.0204
12	0.4832	0.0217
13	0.2759	0.0222
14	0.2893	0.1060
15	0.3305	0.1900
16	0.3792	0.2100
17	0.4455	0.2310

18	0.5047	0.2520
19	0.5591	0.2740
20	0.6120	0.2970
21	0.6643	0.3200
22	0.7179	0.3444
23	0.7715	0.3690
24	0.8246	0.3940
25	0.8780	0.4200
26	0.9313	0.4460
27	0.9846	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800

85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 7 \cdot 10^5$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0067
1	0.1100	0.0068
2	0.2200	0.0070
3	0.3300	0.0075
4	0.4400	0.0083
5	0.5500	0.0097
6	0.6600	0.0108
7	0.7700	0.0118

8	0.8800	0.0128
9	0.9598	0.0144
10	1.0343	0.0159
11	1.0749	0.0175
12	1.0390	0.0195
13	0.8737	0.0216
14	0.6284	0.0236
15	0.4907	0.1170
16	0.4696	0.2100
17	0.5115	0.2310

18	0.5584	0.2520
19	0.6032	0.2740
20	0.6474	0.2970
21	0.6949	0.3200
22	0.7446	0.3444
23	0.7948	0.3690
24	0.8462	0.3940
25	0.8984	0.4200
26	0.9506	0.4460
27	1.0029	0.4730

30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800

85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850

140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	Re=10 ⁶	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0065
1	0.1100	0.0066
2	0.2200	0.0068
3	0.3300	0.0071
4	0.4400	0.0078
5	0.5500	0.0091
6	0.6600	0.0101
7	0.7700	0.0110
8	0.8800	0.0119
9	0.9661	0.0134
10	1.0512	0.0147
11	1.1097	0.0162
12	1.1212	0.0180
13	1.0487	0.0200
14	0.8846	0.0222
15	0.7108	0.0245
16	0.6060	0.1280
17	0.5906	0.2310
18	0.6030	0.2520
19	0.6334	0.2740
20	0.6716	0.2970
α	Re= 2 · 10 ⁶	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0064
1	0.1100	0.0064
2	0.2200	0.0066
3	0.3300	0.0069
4	0.4400	0.0073
5	0.5500	0.0081
6	0.6600	0.0090
7	0.7700	0.0097

21	0.7162	0.3200
22	0.7613	0.3440
23	0.8097	0.3690
24	0.8589	0.3940
25	0.9093	0.4200
26	0.9618	0.4460
27	1.0144	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800
85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000

110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

8	0.8800	0.0105
9	0.9900	0.0113
10	1.0727	0.0128
11	1.1539	0.0110
12	1.2072	0.0155
13	1.2169	0.0172
14	1.1614	0.0191
15	1.0478	0.0213
16	0.9221	0.0237
17	0.7826	0.1380

18	0.7163	0.2520
19	0.7091	0.2740
20	0.7269	0.2970
21	0.7595	0.3200
22	0.7981	0.3400
23	0.8429	0.3690
24	0.8882	0.3940
25	0.9352	0.4200
26	0.9842	0.4460
27	1.0355	0.4730

30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800

85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850

140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250

α	$Re = 5 \cdot 10^6$	
	Cy	Cx
0	0.0000	0.0064
1	0.1100	0.0064
2	0.2200	0.0066
3	0.3300	0.0068
4	0.4400	0.0072
5	0.5500	0.0076
6	0.6600	0.0081
7	0.7700	0.0086
8	0.8800	0.0092
9	0.9900	0.0098
10	1.1000	0.0106
11	1.1842	0.0118
12	1.2673	0.0130
13	1.3242	0.0143
14	1.3423	0.0159
15	1.3093	0.0177
16	1.2195	0.0198
17	1.0365	0.0229

18	0.9054	0.1480
19	0.8412	0.2740
20	0.8233	0.2970
21	0.8327	0.3200
22	0.8563	0.3400
23	0.8903	0.3690
24	0.9295	0.3940
25	0.9718	0.4200
26	1.0193	0.4460
27	1.0680	0.4730
30	0.9150	0.5700
35	1.0200	0.7450
40	1.0750	0.9200
45	1.0850	1.0750
50	1.0400	1.2150
55	0.9650	1.3450
60	0.8750	1.4700
65	0.7650	1.5750
70	0.6500	1.6650
75	0.5150	1.7350
80	0.3700	1.7800

85	0.2200	1.8000
90	0.0700	1.8000
95	-0.0700	1.7800
100	-0.2200	1.7500
105	-0.3700	1.7000
110	-0.5100	1.6350
115	-0.6250	1.5550
120	-0.7350	1.4650
125	-0.8400	1.3500
130	-0.9100	1.2250
135	-0.9450	1.0850
140	-0.9450	0.9250
145	-0.9100	0.7550
150	-0.8500	0.5750
155	-0.7400	0.4200
160	-0.6600	0.3200
165	-0.6750	0.2300
170	-0.8500	0.1400
175	-0.6900	0.0550
180	0.0000	0.0250