

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КУЛЬБАКА АНТОН ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 681.5.001.63:519.711(043.3)

**АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З ВЕРТИКАЛЬНОЮ
ВІССЮ ОБЕРТАННЯ РОТОРА**

Спеціальність: 05.13.12 – системи автоматизації проектних робіт

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

На правах рукопису

Роботу виконано в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Синєглазов Віктор Михайлович,
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри авіаційних
комп'ютерно-інтегрованих комплексів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Просол Ігор Вікторович,
професор кафедри біомедичної інженерії
(Харківський Національний університет
радіоелектроніки).

кандидат технічних наук, доцент
Трегуб Микола Іларіонович,
завідувач кафедри механізації та ефект
рифікації сільськогосподарського вироб
ництва (Білоцерківський Національний
аграрний університет).

Захист відбудеться «12» січня 2017 р. о 15 год. 00 хв. На засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.062.08 Національного авіаційного університету за адресою: 03680, м. Київ, пр. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розіслано «___» грудня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор

В.М. Шутко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасна індустрія відрізняється підвищеною потребою в енергії. Сировинні ресурси, а саме: паливні, вуглеводні, стали головними джерелами енергії, а тому – найважливішою ланкою промисловості. Світові запаси, як нафти, так і природного газу вельми неоднозначні, оцінки експертів відрізняються одна від одної дуже істотно. Це в основному обумовлено тим, що обсяги запасів у багатьох країнах не є доведеними і часто виявляються недооціненими, або ж видобуток на нерентабельних родовищах стає можливим зважаючи на технологічний прогрес. Однією з основних причин енергетичної кризи в Україні є висока енергоємність валового внутрішнього продукту, що перевищує аналогічні показники розвинених країн у кілька разів.

Для повноцінного функціонування енергосистеми і виходу з кризи необхідно:

- нарощувати генеруючі потужності (створення резервного надлишку маневрених потужностей);
- зменшувати споживання електроенергії за рахунок впровадження новітніх енергозберігаючих технологій, що дозволить створити запас генеруючих потужностей, забезпечити можливість їх ремонту та модернізації.

Це стало об'єктивною передумовою прийняття в 1994 р. Закону України «Про енергозбереження» та інших законів з електропостачання, які передбачають цілий ряд законів інституційного, регулятивного і стимулюючого характеру по переходу економіки в режим ефективного споживання.

Практичну основу виконання цих законів складають державні програми енергозбереження, до складу яких входить «Програма державної підтримки розвитку нетрадиційних та відновлювальних джерел а також малої гідро- і теплоенергетики», затверджена Постановою Кабінету Міністрів №1505 від 31.12.1997 р. У цій програмі знайшли відображення основні напрями державної політики в галузі розвитку відновлюваної енергетики в Україні на найблищу перспективу, в тому числі поставлено завдання забезпечення близько 10% економії традиційних паливно-енергетичних ресурсів.

Сучасна вітроенергетика базується на застосуванні вітродвигунів (ВД) двох основних видів – горизонтально-осьові пропелерні ВД з горизонтальною віссю обертання і вертикально-осьові ВД з вертикальною віссю обертання.

Ротори останніх виконуються у вигляді вертикально розташованих лопатей. Вітроколесо ВЕУ з вертикальною віссю обертання внаслідок своєї геометрії за будь-якого напрямку вітру знаходить у довільному положенні, крім того, така схема дозволяє за рахунок тільки подовження вала встановити редуктор з генераторами в основі вежі.

До найбільш поширених типів вертикально-осьових установок відноситься ротор Дар'є. У ньому обертовий момент створюється підйомною силою, що виникає на двох або трьох тонких вигнутих несучих поверхнях, що мають аеродинамічний профіль. Підйомна сила максимальна в той момент, коли лопать з великою швидкістю перетинає набігаючий повітряний потік. Ротор Дар'є розкручується самостійно, як правило не може, тому для його запуску зазвичай використовується генератор, що працює в режимі двигуна, або статор, що носить назву ротора Савоніуса. Це колесо також обертається силою опору. Його лопаті виконані з тонких вигнутих листів прямокутної форми, відрізняються простотою і дешевизною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалася у Національному авіаційному університеті і є складовою частиною науково-дослідних робіт з розробки та створенню вітроенергетичних установок (ВЕУ) з вертикальною віссю обертання, зокрема: бюджетних НДР № 670 ДБ-10 «Малопотужна вітроенергетична установка для середовища слабких вітрів», № 786 «Енергетична установка для використання слабких вітрів та сонця», № 996-ДБ15 «Інтегрована система автоматизованого проектування енергетичних установок для використання енергії вітру та сонця».

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розроблення науково обґрунтованих методик, моделей, алгоритмів і процесів, спрямованих на вирішення проблем проектування вітроенергетичних установок (ВЕУ) і, таким чином, підвищення ефективності ВЕУ. Для досягнення поставленої мети у роботі було виділено і вирішено такі завдання:

- розробити методологію автоматизованого проектування ВЕУ з вертикальною віссю обертання комбінованого ротора, яка розбивається на етапи шляхом уведення ієрархії проектного опису по рівнях деталізації;
- розробити методику аеродинамічного розрахунку ротора ВЕУ з вертикальною віссю обертання комбінованого ротора;
- розробити методику розрахунку міцності ротора ВЕУ з вертикальною віссю обертання комбінованого ротора;
- розробити підхід до структурного та параметричного синтезу комбінованого ротора ВЕУ на основі розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації;
- розробити підхід до побудови інтегрованої САПР ВЕУ на основі інтегрування в структуру САПР як відомих систем, так і знов створених програмних блоків.

Об'єктом досліджень є процес проектування ВЕУ.

Предметом досліджень є методологія автоматизованого проектування ВЕУ, математичні моделі ВЕУ та його підсистем, структура САПР ВЕУ.

Методи досліджень для вирішення поставлених завдань, які використано у роботі: теорія диференційних рівнянь у частинних похідних, методи обчислювальної математики, теорія багатокритеріальної оптимізації.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробленні:

1) нової методології автоматизованого проектування ВЕУ з вертикальною віссю обертання комбінованого ротора, яка відрізняється тим, що для підвищення якості проектування та скорочення його часу вона побудована за ієрархічною схемою і включає розробку структури комбінованого ротора, а саме: вибір типів розгінних та основних роторів, визначення кількості розгінних роторів та місць їх розміщення по відношенню до основного, визначення кількості лопатей розгінних і основного роторів, оптимальний вибір профілів лопатей розгінних і основного роторів, оптимальний вибір конструкції лопатей з визначенням оптимального композиційного матеріалу, із якого вироблено лопать, визначення оптимальних геометричних параметрів комбінованого ротора на основі використання математичних моделей аеродинаміки та міцності і множини обґрунтованих критеріїв з урахуванням обмежень та розробки нового підходу до розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації.

2) нової методики аеродинамічного розрахунку комбінованого ротора з вертикальною віссю обертання, яка відрізняється тим, що для зниження часу розрахунку при збереженні точності виконується роздільний, але взаємозалежний розрахунок розгінних та основних роторів на основі використання спрощеного алгоритму - для розрахунку роторів Дар'є та алгоритму розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса – для ротора Савоніуса.

3) нового методу багатокритеріальної умовної оптимізації для знаходження оптимальної структури та оптимальних параметрів комбінованих роторів з вертикальною віссю обертання, який відрізняється тим, що для забезпечення ефективного пошуку парето оптимальних розв'язків використовуються багатокритеріальний генетичний алгоритм у поєднанні з алгоритмом паретовського локального пошуку.

4) методики розрахунку міцності ротора ВЕУ, яка відрізняється тим, що для забезпечення підвищення надійності спроектованої конструкції вона включає побудову розрахункової кінцево-елементної 3D моделі ротора для оцінки динамічних характеристик при механічних коливаннях і розрахунків напружено-деформованого стану при певних умовах, розрахунки напружено-деформованого стану конструкції на максимальні навантаження кожного виду (гравітаційні, інерційні, аеродинамічні) і на поєднання навантажень у випадку максимального вітрового впливу робочого стану, розрахунки динамічних характеристик конструкції (власних частот, форм коливань) і амплітудно-частотних характеристик у характерних вузлах моделі за прискореннями від змінних сил, розрахунки внутрішніх си-

лових факторів напружено-деформованого стану конструкції ротора ВЕУ на навантаження, що відповідають характерним точкам діаграми «швидкість вітру – число обертів ротора».

5) нового підходу до побудови САПР ВЕУ з вертикальною віссю обертання комбінованого ротора, який відрізняється тим, що для значного скорочення часових та матеріальних витрат, пропонується створення інтегрованої САПР на основі інтегрування в структуру як відомих систем, таких як Solid Work, Flow Vision, Компас, Ліра, так і знов створених програмних блоків, що дозволить значно скоротити часові та матеріальні витрати на створення САПР ВЕУ з вертикальною віссю обертання комбінованого ротора.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновані методи, моделі, алгоритми, що реалізують їх у процесі проектування і програмне забезпечення дозволяють в автоматизованому режимі:

- формувати зовнішній вигляд ротора, профілю лопатей;
- обчислювати геометричні параметри і відбирати раціональні варіанти схем ВЕУ;
- здійснювати попередню оцінку обраних варіантів структурних схем ВЕУ на відповідність проектному завданню;
- обчислювати значення критеріїв якості і функціональних обмежень ВЕУ.

Теоретичні й науково-методологічні положення, які розроблені в дисертації, впроваджені в навчальний процес у Національному авіаційному університеті на кафедрі авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів для викладання дисциплін «Технічні засоби автоматизації», «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів», «Проектування систем автоматизації», а також для проведення відповідних лабораторних робіт.

Особистий внесок здобувача

Наукову статтю [1] написано у співавторстві з В.М.Синеглазовим та Б.І. Дмитренко. Особистий внесок автора у цій статті полягає в обґрунтуванні структури комплексу технічних засобів метеостанції.

Наукову статтю [2] написано у співавторстві з В.М.Синеглазовим та С.С.Альошкіним. Особистий внесок автора у цій статті полягає в розробці алгоритма автоматизованого проектування вітроенергетичної установки з вертикальною віссю обертання ротора.

Наукову статтю [3] написано у співавторстві з В.М.Синеглазовим та С.С.Альошкіним. Особистий внесок автора у цій статті полягає в структурній декомпозиції процесу автоматизованого проектування ВЕУ.

Наукову статтю [4] написано у співавторстві з В.М.Синеглазовим та Б.І. Дмитренко. Особистий внесок автора у цій статті полягає в обґрунтуванні технічних засобів моніторингу вітру.

Наукову статтю [5] написано у співавторстві з В.М.Синеглазовим та В.М.Бойко. Особистий внесок автора у цій статті полягає в обґрунтуванні структури системи автоматизованого проектування ВЕУ.

Наукову статтю [6] написано у співавторстві з В.М.Синеглазовим та В.М.Бойко. Особистий внесок автора у цій статті полягає в розробці алгоритмічного забезпечення підсистеми аеродинамічного розрахунку САПР ВЕУ.

Наукову статтю [7] написано у співавторстві з В.М.Синеглазовим. Особистий внесок автора у цій статті полягає в розробці алгоритмічного забезпечення інтегрованої системи автоматизованого проектування ВЕУ.

Наукову статтю [8] написано особисто А.В.Кульбакою. У роботі проведено деталізацію структури САПР ВЕУ з вертикальною віссю обертання ротора.

Наукову статтю [9] написано у співавторстві з В.М.Синеглазовим та В.М.Бойко. Особистий внесок автора у цій статті полягає в розробці структури програмного забезпечення інтегрованої системи автоматизованого проектування ВЕУ.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідалися й обговорювалися на X Міжнародній науково-технічній конференції «Авіа-2011» (Київ, 19-21 квітня, 2011, Т. III), на XI Міжнародній науково-технічній конференції «Авіа-2013» (Київ, 21-23 травня, 2013), 2nd International Conference “Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments” Proceedings (October 15-17 2013).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 9 наукових статей у виданнях, перелік яких затверджено ВАК України з них 5 – у виданнях, зареєстрованих у наукометричних базах даних та 3 матеріалів доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 215 сторінок, з яких основну частину викладено на 137 сторінках друкованого тексту, включаючи 65 рисунків, 3 таблиці, список використаних джерел з 155 джерел на 16 сторінках, 7-м додатків на 62 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розглянуто перспективи розвитку відновлювальних джерел енергії у найбільш розвинутих країнах: США, Німеччині, Франції, Данії, Голландії та інших – в останні десятиріччя швидкими темпами розвивається енергетика з використанням альтернативних відновлювальних джерел енергії. В енергобалансі деяких з вищенаведених країн частка відновлювальних джерел енергії вже зараз суттєва, досягає 10-15%, а в

подальшому планується досягнення 30% частки альтернативної енергетики у світовому балансі. Велика роль в цьому відводиться вітроенергетиці.

Проектування є однією з найважливіших стадій життєвого циклу ВЕУ. Це пояснюється труднощами усунення проектних помилок на стадії виготовлення та застосування ВЕУ.

У першому розділі наведено аналіз енергетичного потенціалу вітрової енергетики України. Представлено типи ВЕУ та їх класифікацію, наведено порівняльний аналіз вертикально-осьових (ВО) та горизонтально-осьових (ГО) ВЕУ за такими критеріями як: орієнтація ВЕУ на вітер; різниця у алгоритмах роботи ВЕУ; розміщення генератора та мультиплікатора; самозапуску ротора ВЕУ; коефіцієнт використання енергії вітру; конструкція та ефективність лопаті; швидкохідність; розміщення лопатей; динаміка опорної вежі; вплив ВЕУ на навколишнє середовище. Доведено, що ВЕУ з вертикальною віссю обертання роторів мають переваги перед ВЕУ з горизонтальною віссю обертання.

Проблема ВЕУ з вертикальною віссю обертання ротору полягає у складності його запуску за умов слабого вітру. Враховуючи наведене, доцільною є побудова комбінованих роторів головною складовою яких є ротор Дар'є, який забезпечує максимальний відбір енергії вітру, а в якості пристроїв розгону використовуються ротори Савоніуса. Такий ротор має можливість стартувати та виробляти електричну енергію навіть при малих швидкостях вітру (2 м/с). Таким чином, комбінований ротор матиме більшу ефективність, ніж окремі ротори Дар'є чи Савоніуса.

У другому розділі розглянуто типовий комбінований ротор (рис. 1), який складається з основного ротора Дар'є та з одного або кількох розгінних роторів Савоніуса, насаджених на спільний вал обертання. За малої швидкості потоку вітру пусковий момент створюється роторами Савоніуса. Якщо значення швидкості потоку більші, то обертання комбінованого ротора відбувається завдяки ротору Дар'є.

Для розв'язання задачі оптимального проектування ВЕУ з комбінованим ротором запропоновано такі критерії: коефіцієнт потужності; маса; осьовий момент інерції; коефіцієнти підйомної сили та опору профілю; вартість виготовлення.

Задача проектування ВЕУ з комбінованим ротором розбивається на дві підзадачі оптимізації.

1) *Структурна оптимізація*. Це оптимальний вибір: взаємного розташування основного та розгінних роторів x_{11} ; типу основних x_{12} та розгінних x_{13} роторів; кількості основних x_{14} та розгінних x_{15} роторів; кількості лопатей основних x_{16} і розгінних x_{17} роторів; форми x_{18}

профілю лопатей основного ротора; типу x_{19} матеріалів виготовлення елементів.

Вище названі параметри можна визначити, як вектор:

$$\mathbf{X}_1 = \{x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}\}^T.$$

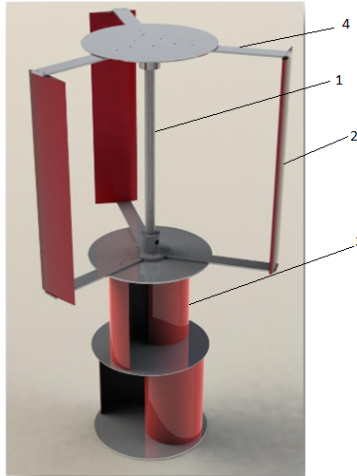


Рис. 1. Приклад конструктивної схеми комбінованого ротора з вертикальною віссю обертання: 1 – вал; 2 – ротор Дар'є з трьома прямими лопатями; 3 – стартер (двоступінчатий ротор Савоніуса з двома лопатями, рознесеними по фазі); 4 – траверси

2) *Параметрична оптимізація*. Це визначення оптимальних геометричних параметрів роторів:

$$\mathbf{X}_2 = \{x_{21}, x_{22}, x_{23}, \dots, x_{2n}\}^T.$$

До структури комбінованого ротора входять: взаємне розташування основного та розгінного роторів x_{11} , тип основних x_{12} та розгінних x_{13} роторів, кількості основних x_{14} та розгінних x_{15} роторів, кількості лопатей основних x_{16} і розгінних x_{17} роторів; форма x_{18} профілю лопатей основного ротора, тип x_{19} матеріалів виготовлення елементів. До параметрів комбінованого ротора відносять: для ротора Дар'є – $x_{21} = H$; $x_{22} = D$; $x_{23} = b$; $x_{24} = c$; $x_{25} = \beta$ відповідно висота лопаті, діаметр ротора, довжина хорди, товщина лопатей, кут установки лопатей; для ротора Савоніуса:

$x_{26} = H$; $x_{27} = D$; $x_{28} = d$; $x_{29} = e$; $x_{2,10} = a$, відповідно висота лопаті, діаметр ротора, довжина хорди, перекриття лопатей, проміжок між лопатями.

Постановка задачі оптимізації полягає у визначенні

$$\bar{x}^* = \underset{\bar{x} \in X}{\text{arg extr}} \mathbf{F}(\bar{x}^*), \quad \bar{x}^* \in X.$$

У роботі запропоновано методологію автоматизованого проектування ВО ВЕУ, яка полягає у поступовому розв'язанні наступних задач: розрахунків аеродинамічних параметрів, визначення напружено-деформованого стану елементів, визначення частот власних коливань елементів та характеристик вібрацій, розрахунків елементів на міцність, оптимального проектування силових елементів лопатей, розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації. Відповідно до методології розроблено структурну схему САПР (рис. 2).

Розрахунок аеродинамічних параметрів комбінованого ротора ВЕУ виконувався на основі використання рівнянь Наве–Стокса.

З метою підвищення обчислювальної ефективності аеродинамічних розрахунків комбінованого ротора доцільно провести декомпозицію поставленої задачі на: аеродинамічний розрахунок ротора Дар'є, результатом якого є $M_{об}$, $M_{пр}$, причому $M_{пр}$ ротора Дар'є буде визначати $M_{об}$ ротора Савоніуса.

Структурну схему підсистеми показано на рис. 3.

Числове рішення рівняння Нав'є–Стокса, для комбінованого ротора, є досить складною обчислювальною процедурою, через що в даній роботі пропонується ітераційна процедура, що полягає в почерговому аеродинамічному розрахунку роторів Дар'є і Савоніуса, які складають комбінований ротор.

У роботі задача обтікання для кожного ротора розв'язується окремо з урахуванням взаємного впливу роторів через граничні умови (ГУ) у перерізах I-I та II-II між роторами (рис. 3).

Можливі наступні підходи по розв'язанню задачі аеродинамічного розрахунку комбінованого ротора (см. рис. 1).

1. Розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса з для кожного ротора (Дар'є і Савоніуса) окремо з ГУ.

2. Проведення аеродинамічного розрахунку ротора Дар'є по спрощеній методиці (ротор Дар'є створює обертальний момент за рахунок підйомної сили лопатей. Оскільки кількість лопатей такого ротора змінюється від трьох до чотирьох, то їх взаємний вплив мінімальний і для аеродинамічного розрахунку замість розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса можна з достатнім ступенем точності використовувати дані по обтіканню профілів крил), а роторів Савоніуса – розв'язанням рівнянь Нав'є–Стокса з ГУ.

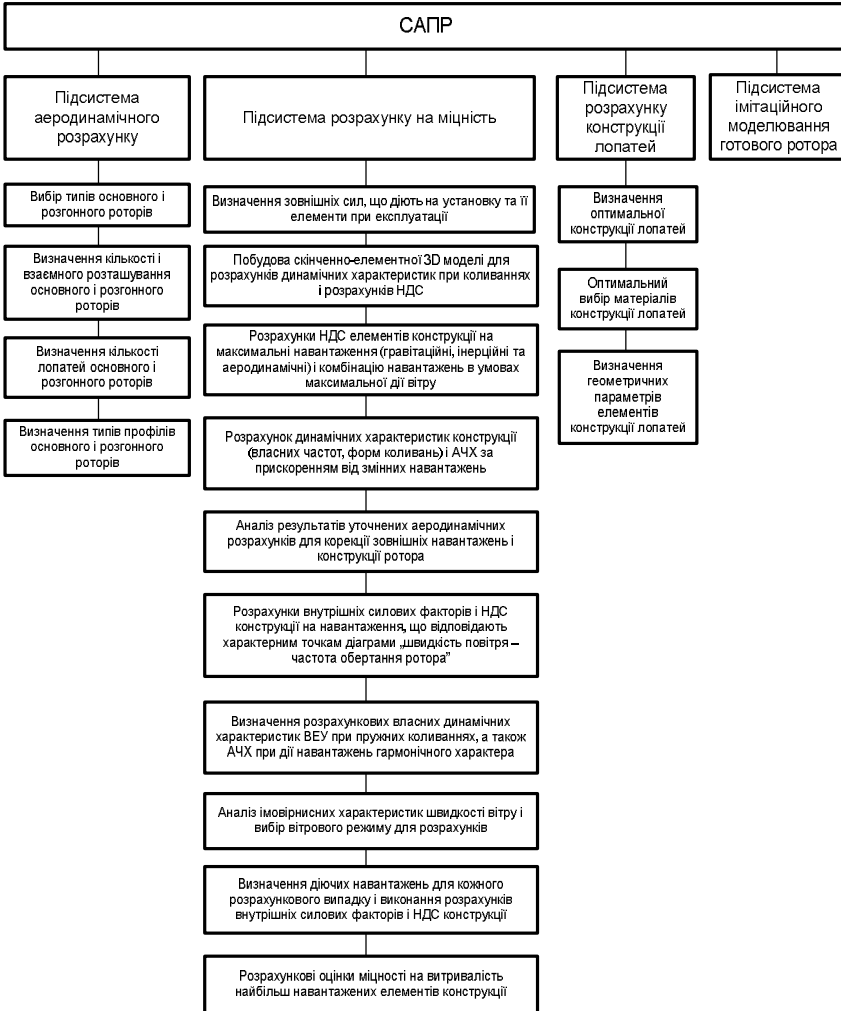


Рис. 2. Структурна схема САПР

Алгоритм аеродинамічного розрахунку обтікання комбінованого ротора має наступний вигляд.

1. Розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса для ізольованого ротора 1 (Дар'є) та визначення обертального моменту ротора з ГУ по зовнішній границі.
2. Розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса для ротора 2 (Савоніуса) з урахуванням обертального моменту, отриманого в пункті 1 від ротора Дар'є.

3. Повторне розв'язання Нав'є–Стокса для ротора 1 (Дар'є) з урахуванням ГУ у перерізах, що отримані у п. 2.

4. Розрахунки за пп. 2–3 повторюються до досягнення необхідної збіжності між результатами ітерацій.

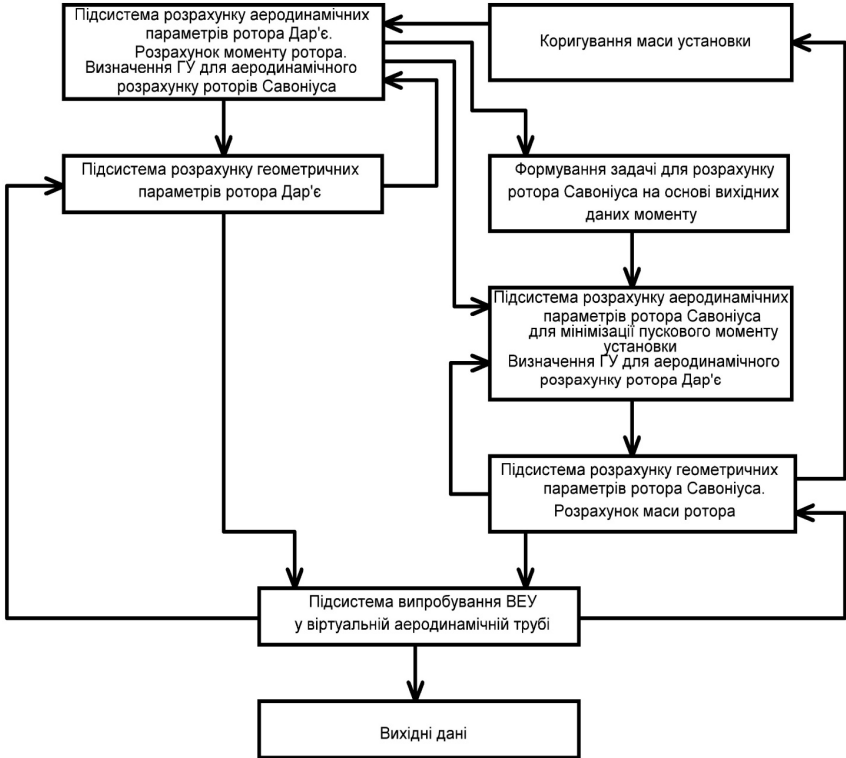


Рис. 3. Структурна схема підсистеми аеродинамічного розрахунку

У роботі запропоновано нову методику розрахунку комбінованого ротора на основі використання математичної моделі аеродинаміки крила для ротора Дар'є і рівнянь Нав'є–Стокса для аеродинаміки ротора Савоніуса. В результаті вихідна аеродинамічна задача розрахунку обтікання комбінованого ротора розпадається на дві незалежні задачі.

1. Фізична модель ротора Дар'є представляється у вигляді поліплана. Визначення аеродинамічних характеристик кожної лопаті здійснюється на основі методики для ізольованого крила великого розмаху. Для кожного кутового положення лопаті, в залежності від швидкості потоку повітря і швидкості обертання, визначаються:

- істинна швидкість набігаючого потоку та істинний кут атаки;
 - за характеристиками профілю: в залежності від істинних кутів атаки знаходимо коефіцієнт підйомної сили $C_y = f(\alpha)$ і коефіцієнт опору $C_x = f(\alpha)$;
 - обертальний момент і потужність ротора.
2. Ротори Савоніуса розглядаємо, як ізольовані з вільними границями. Розв'язуємо рівняння Нав'є–Стокса з ГУ.

Для чисельного розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса у роботі запропоновано використовувати метод скінченних об'ємів. Отримана блочно-матрична система алгебраїчних рівнянь розв'язується методом ітерацій Гаусса–Зейделя.

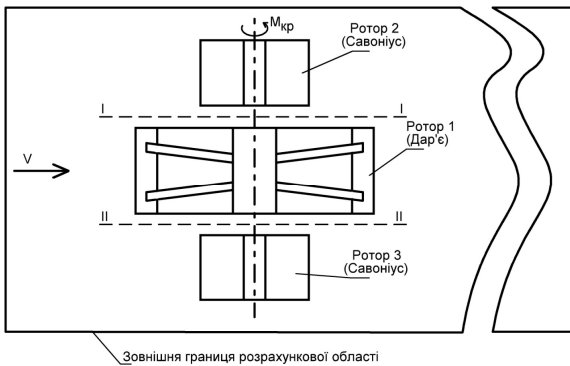


Рис. 3. Аеродинамічна схема комбінованого ротора в розрахунковій області

У роботі запропонована нова методика визначення оптимального профілю лопаті.

Подальшим етапом проектування ротору ВЕУ є розробка підсистем розрахунку міцності конструкції ВЕУ і конструювання лопаті ротора та оптимального вибору технології її виготовлення.

Підсистема розрахунку міцності включає розв'язання таких задач:

- визначення зовнішніх силових впливів на ВЕУ та її елементи при експлуатації;
- побудову розрахунково-кінцевої елементної тривимірної 3D моделі ротора для розрахунків динамічних характеристик при механічних коливаннях та розрахунків напружено-деформованого стану при визначених умовах;
- розрахунок напружено-деформованого стану конструкції на максимальні навантаження кожного виду (гравітаційні, інерційні, аеродинамічні) та на комбінацію навантажень у випадку максимального вітрового впливу.

- розрахунок динамічних характеристик конструкції (власних частот, форм коливань) та амплітудно-частотних характеристик у характерних вузлах моделі за прискореннями від перемінних сил;

- аналіз результатів уточнених аеродинамічних розрахунків, на основі якого уточнюються зовнішні механічні впливи на ВЕУ при її експлуатації;

- розрахунок внутрішніх силових факторів та напружено-деформованого конструкції ротора ВЕУ на навантаження, відповідні характерним точкам діаграми «швидкість вітру-число обертів ротора»;

- розрахунок власних динамічних характеристик ВЕУ при пружних коливаннях, амплітудно-частотних характеристик при дії навантажень вітрового гармонічного характеру на ротор;

- аналіз імовірнісних характеристик швидкості вітру і вибір вітрового режиму для розрахунків;

- розрахунок внутрішніх силових факторів та напружено-деформованого стану конструкції;

- розрахунок оцінки сталості міцності найбільш навантажених елементів конструкції.

У роботі розроблено алгоритм оптимального вибору параметрів конструкції лопаті, матеріалів для виготовлення. Лопать ротора являє собою крило лонжеронного типу. Основним силовим фактором, сприйманим лонжероном, є момент згинання. Крім того лонжерони беруть участь у сприйнятті сили перерізання. У роботі розроблено алгоритм оптимізації конструкції лопаті.

У третьому розділі розглянуто розв’язання багатокритеріальної задачі оптимізації у разі застосування автоматизованого проектування ВЕУ з комбінованим ротором. У нашому випадку маємо конфліктуючі (суперечливі) критерії, коли спроба покращити один з них призводить до погіршення інших. У такому випадку рішення можливе лише на основі компромісу. Математична модель компромісу в оптимізації зазвичай будується на рішення задачі оптимізації з багатьма критеріями доцільно обирати з множини Парето так, як будь-яке друге, очевидно, може бути покращене деякою точкою Парето як мінімум по одному критерію без погіршення інших критеріїв. З точки зору математики рішення із множини Парето не мають переваг один перед одним, тому після формування множини Парето задача може вважатись математично вирішеною. Для розв’язання поставленої задачі у роботі запропоновано використати генетичні алгоритми, які мають значні переваги перед класичними. Генетичний алгоритм імітує еволюцію популяції як циклічний процес схрещування і/або мутацію індивідумів, що в них входять, а також зміни поколінь. Модель відбору визначає, яким чином потрібно побудувати популяцію наступного покоління. В будь-якому випадку кожне наступне покоління в середньому буде

краще ніж попереднє. Коли пристосованість індивідів перестає помітно збільшуватись, процес зупиняють і в якості рішення задачі оптимізації беруть кращого з індивідів.

Для забезпечення ефективного пошуку парето оптимальних розв'язків використовуються багатокритеріальний генетичний алгоритм у поєднанні з алгоритмом паретовського локального пошуку.

Схему гібридного еволюційного алгоритму багатокритеріальної оптимізації можна представити у вигляді послідовності наступних кроків:

- рішення вихідної багатокритеріальної задачі генетичним алгоритмом;
- уточнення отриманих після зупинки генетичного алгоритму псевдодомінуючих точок підсумкової популяції за допомогою процедури паретовського локального пошуку;
- ліквідація можливих згустків точок, використовуючи кластерний аналіз.

У четвертому розділі показано, що з метою зниження витрат під час створення САПР ВЕУ з вертикальною віссю обертання доцільно частково використати вже існуючі САПР, які можуть вирішувати окремі задачі згідно структурної схеми, представленій на рис. 4. У результаті виникає задача розробки методів та засобів динамічної інтеграції даних.

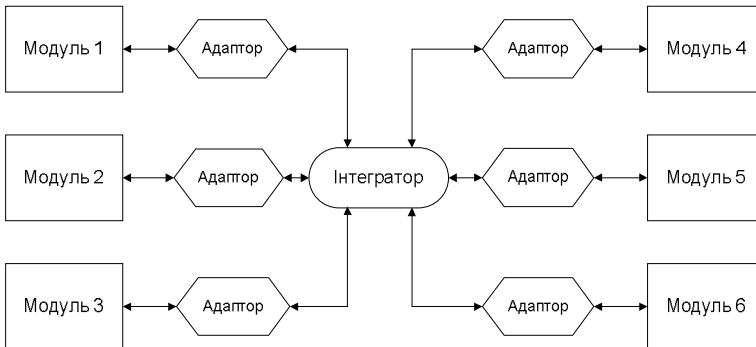


Рис. 4. Вирішення окремих задач згідно структурної схеми

Постановку задачі побудови інтегрованої САПР можна представити у наступному вигляді: із множини існуючих САПР A_i , $i = 1, n$, кожна i з них має множину функціональних властивостей B_{ij} , $j = 1, m$. Необхідно побудувати інтегровану САПР, яка включає крім оригінальних програмних модулів підмножину A_k , $k = 1, p$, A_k – оптимально вибраних САПР із своїми функціональними властивостями. Така система повинна відповідати наступному набору критеріїв:

- оптимальне використання обчислювальних ресурсів;
- мінімальний час обробки команд;

– інтерфейс користувача повинен бути зрозумілим і зручним у використанні.

У роботі запропоновано метод інтеграції за допомогою модуля інтегрування (сервісна шина додатку).

Запропонований підхід має на увазі наявність сполучної ланки між всіма модулями – сервісна шина додатка, яка виконує керування усіма доступними модулями системи, відповідає за взаємодію між модулями, конвертування даних (якщо це необхідне), контроль якості виконаної роботи.

Використання подібного підходу дозволяє мінімізувати витрати на додавання нових модулів і модернізацію поточних, знижує витрати на обслуговування системи в цілому, а також спрощує керування потоками даних у системі.

Запропоновано інформаційну модель середовища автоматизованого проектування, яка моделює поведінку у процесі проектування усіх програмних засобів, з яких складається середовище автоматизованого проектування. Для розв'язання поставленої задачі використано реляційний метод, за допомогою якого досягається динамічна інтеграція даних, різних аспектів представлення у середовищі автоматизованого проектування.

Розроблено структуру програмного забезпечення САПР ВЕУ, наведено опис інтерфейсу користувача. На основі розробленого програмного забезпечення спроектовано ВЕУ на основі комбінованого ротора з вертикальною віссю обертання.

У додатку 1 виконано порівняльний аналіз ВЕУ з горизонтальною та вертикальною віссю обертання.

У додатку 2 виконано огляд методів числового розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса.

У додатку 3 наведено спрощений розрахунок ротора Дар'є.

У додатку 4 представлено оптимальний вибір профілю лопаті.

У додатку 5 наведено алгоритми автоматизованого проектування лопаті.

У додатку 6 представлено результати роботи САПР ВО з комбінованим ротором з автоматизованого проектування елементів конструкції лопаті.

У додатку 7 представлено акт впровадження результатів роботи у навчальному процесі.

ВИСНОВКИ

1) Розроблено нову методологію автоматизованого проектування ВЕУ з вертикальною віссю обертання комбінованого ротора, яка побудована за ієрархічною схемою і включає розробку структури комбінованого ротора, а саме: вибір типів розгінних та основних роторів, визначення кількості

розгінних роторів та місць їх розміщення по відношенню до основного, визначення кількості лопатей розгінних і основного роторів, оптимальний вибір профілів лопатей розгінних і основного роторів, оптимальний вибір конструкції лопатей з визначенням оптимального композитного матеріалу, із якого вироблено лопать, визначення оптимальних геометричних параметрів комбінованого ротора на основі використання математичних моделей аеродинаміки та міцності і множини обґрунтованих критеріїв з урахуванням обмежень та розробки нового підходу до розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації, що дає можливість підвищити якість проектування та скоротити його час.

2) Розроблено нову методику аеродинамічного розрахунку комбінованого ротора з вертикальною віссю обертання, яка полягає у роздільному, але взаємозалежному розрахунку розгінних та основних роторів на основі використання спрощеного алгоритму для розрахунку роторів Дар'є та алгоритму розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса ротора Савоніуса, що дає можливість знизити час розрахунку при збереженні точності.

3) Розроблено новий метод багатокритеріальної умовної оптимізації для знаходження оптимальної структури та оптимальних параметрів комбінованих роторів з вертикальною віссю обертання, який оснований на використанні багатокритеріального генетичного алгоритму у поєднанні з алгоритмом паретовського локального пошуку, що забезпечує ефективний пошук парето оптимальних розв'язків.

4) Розроблено методику розрахунку міцності ротора ВЕУ, яка включає побудову розрахункової кінцево-елементної 3D моделі ротора для оцінки динамічних характеристик при механічних коливаннях і розрахунків напружено-деформованого стану при певних умовах, розрахунки напружено-деформованого стану конструкції на максимальні навантаження кожного виду (гравітаційні, інерційні, аеродинамічні) і на поєднання навантажень у випадку максимального вітрового впливу робочого стану, розрахунки динамічних характеристик конструкції (власних частот, форм коливань) і амплітудно-частотних характеристик у характерних вузлах моделі за прискореннями від змінних сил, розрахунки внутрішніх силових факторів напружено-деформованого стану конструкції ротора ВЕУ на навантаження, що відповідають характерним точкам діаграми «швидкість вітру – кількість обертів ротора», що забезпечує підвищення надійності спроектованої конструкції.

5) Розроблено новий підхід до побудови інтегрованої САПР ВЕУ на основі інтегрування в структуру САПР як відомих систем, таких як Solid Work, Flow Vision, Компас, Ліра, так і знов створених програмних блоків, що дозволить значно скоротити часові та матеріальні витрати на створення САПР ВЕУ з вертикальною віссю обертання комбінованого ротора.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Синеглазов В. М. Проектирование метеостанции как составной части ветроэнергетической установки. / В. М. Синеглазов, Б. И. Дмитренко, А. В. Кульбака // *Електроніка та системи управління*, № 2(28) – К.: НАУ, 2011. – С. 71 – 76.
2. Синеглазов В. М. Автоматизированное проектирование ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения. / В. М. Синеглазов, С. С. Алёшкин, А. В. Кульбака // *Електроніка та системи управління*, № 4(30) – К.: НАУ, 2011. – С. 84 – 89.
3. Синеглазов В. М. Анализ ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения. / В. М. Синеглазов, С. С. Алёшкин, А. В. Кульбака // *Електроніка та системи управління*, № 3(33) – К.: НАУ, 2012. – С. 67 – 74.
4. Синеглазов В. М. Технические средства мониторинга ветра на местности. / В. М. Синеглазов, Б. И. Дмитренко, А. В. Кульбака // *Електроніка та системи управління*, № 3(33) – К.: НАУ, 2012. – С. 75 – 80.
5. Sineglazov V. M. Computer-aided design system of combined wind power plants. / V. M. Sineglazov, A. V. Kulbaka, V. M. Boyko // *Electronics and Control Systems*, N 3(37) – Kyiv: NAU, 2013. – pp. 84 – 88.
6. Sineglazov V. M. Computer-aided design system of wind-power plant. / V. M. Sineglazov, A. V. Kulbaka, V. M. Boyko // *Electronics and Control Systems*, N 4(38) – Kyiv: NAU, 2013. – pp. 73 – 78.
7. Sineglazov V. M. Software integration at the computer-aided design of wind power plants. / V. M. Sineglazov, A. V. Kulbaka // *Electronics and Control Systems*, N 1(39) – Kyiv: NAU, 2014. – pp. 59–62.
8. Kulbaka A. V. Computer-aided design of vertical-axis wind turbines. / A. V. Kulbaka // *Electronics and Control Systems*, N 2(40) – Kyiv: NAU, 2014. – pp. 80–86.
9. Sineglazov V. M. Integrated computer-aided design system of wind-power plant. / V. M. Sineglazov, A. V. Kulbaka, V. M. Boyko // *Electronics and Control Systems*, N 3(41) – Kyiv: NAU, 2014. – pp. 53–64.
10. Синеглазов В. М. Автоматизоване проектування вітроенергетичних комплексів. / В. М. Синеглазов, Б. И. Дмитренко, А. В. Кульбака // *Матеріали Х Міжнар. наук.-техн. конф. «Авіа-2011» (19-21 квітня)* К.: НАУ. – 2011. – Т. III – С. 22.17– 22.21
11. Кульбака А. В. Автоматизированное проектирование ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения ротора. /

- А. В. Кульбака // Матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф. «Авіа-2013» (21-23 травня) К.: НАУ. – 2013. –Т. 4 – С. 22.17– 22.21
12. Sineglazov V. M Using PV/Wind Hybrid Systems in the Autonomous Power of Unmanned Aerial Control Center./ V.M. Sineglazov, B.I. Dmitrenko, A.V. Kulbaka// 2013 IEEE 2nd International Conference “Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments” Proceedings (October 15-17 2013) – Kyiv, Ukraine – P.137–141.

АНОТАЦІЯ

Кульбака А. В. Автоматизоване проектування вітроенергетичних установок з вертикальною віссю обертання ротора. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.13.12 – Системи автоматизації проектувальних робіт. – Національний авіаційний університет, Київ, 2017.

Дисертацію присвячено подальшому розвитку теорії автоматизованого проектування вітроенергетичних установок з вертикальною віссю обертання ротора.

Обґрунтовано необхідність проектування вітроенергетичних установок з вертикальною віссю обертання комбінованого ротора, що забезпечує їх роботу в середовищі слабких вітрів, характерному для більшості території України.

Визначено найбільш загальну декомпозицію задачі проектування ВЕУ.

У зв'язку з тим, що система ВЕУ описується дуже великою кількістю змінних параметрів, що ускладнює обчислення критеріїв і функціональних обмежень, то задача проектування ВЕУ розбивається на етапи шляхом уведення ієрархії проектного опису по рівнях деталізації. Таким чином, розв'язання загальної задачі оптимального проектування ВЕУ подається як процес послідовного розв'язання локальних взаємозалежних задач оптимізації, які розташовані на різних рівнях ієрархії: вибір типів розгінних та основних роторів, визначення кількості розгінних роторів та місць їх розміщення по відношенню до основного, визначення кількості лопатей розгінних і основного роторів, оптимальний вибір профілів лопатей розгінних і основного роторів, оптимальний вибір конструкції лопатей з визначенням оптимального композитного матеріалу, із якого вироблено лопать, визначення оптимальних геометричних параметрів комбінованого ротора на основі використання математичних моделей аеродинаміки та міцності і множини обґрунтованих критеріїв з урахуванням обмежень та розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації.

Показано, що з метою зниження витрат доцільно розробляти інтегровані САПР, частково використовуючи вже існуючі системи проектування, на основі застосування запропонованого метода інтеграції.

На основі розробленого програмного забезпечення спроектовано ВЕУ з комбінованим ротором та проведено її випробування у віртуальній аеродинамічній трубі.

Ключові слова: автоматизоване проектування, вітроенергетичні установки з вертикальною віссю обертання ротора.

АННОТАЦІЯ

Кульбака А.В. Автоматизированное проектирование ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения ротора. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – системы автоматизации проекторочных работ. Национальный авиационный университет, Киев, 2017.

Диссертация посвящена дальнейшему развитию теории автоматизированного проектирования ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения ротора.

Обоснована необходимость проектирования ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения комбинированного ротора, что обеспечивает их работу в среде слабых ветров, характерную для большей территории Украины.

Определена наиболее общая декомпозиция задачи проектирования ВЭУ.

В связи с тем, что система ВЭУ описывается очень большим количеством переменных параметров, что усложняет вычисление критериев и функциональных ограничений, то задача проектирования ВЭУ разбивается на этапы путем введения проектного описания по уровням детализации. Таким образом, решение общей задачи оптимального проектирования ВЭУ подается как процесс последовательного решения локальных взаимозависимых задач оптимизации, которые размещены на разных уровнях иерархии: выбор типов разгонных и основных роторов, определение количества разгонных роторов и мест их размещения по отношению к основному, определение количества лопастей разгонных и основного роторов, оптимальный выбор профилей лопастей разгонных и основного роторов, оптимальный выбор конструкции лопастей с определением оптимального композитного материала, из которого сделана лопасть, определение оптимальных геометрических параметров комбинированного ротора на основе использования математических моделей аэродинамики, прочности и множества обоснованных критериев с учетом ограничений и решения задачи многокритериальной оптимизации.

Показано, что с целью снижения затрат целесообразно разрабатывать интегрированные САПР, частично используя уже существующие системы проектирования, на основании применения предложенного метода оптимизации.

На основании разработанного программного обеспечения спроектировано ВЭУ с комбинированным ротором и произведено ее испытание в виртуальной аэродинамической трубе.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения ротора.

ABSTRACT

Kulbaka A.V. Computer aided design of wind- energy plant with vertical axis of rotor rotation. – *Manuscript.*

The thesis maintaining the academic degree of engineering science on speciality 05.13.12 – Computer aided designed systems – National aviation university – Kyiv, 2017.

The work is dedicated to the development of computer aided design theory of wind- energy plant (WEP) with vertical axis of rotor rotation.

It's substantiated the necessity the design of wind- energy plants with vertical axis of combined rotor rotation that provides their functioning at the presence of weak winds, that it's typically for the territory of Ukraine.

It's determined the more general decomposition of WEP design.

Due to that the system of WEP is described by very big quantity of variable parameters, that complicates the criteria and functional restrictions calculations then the problem of WEP design is divided at the stages by introduction of design description by levels of working out in detail. That's why, the solution of general task of WEP optimal design is given as the process of consecutive solution of optimization local interrelationship problems, which are located at the different levels of hierarchy: selection of type of acceleration and main rotors, determining the amount of acceleration rotors and their locations with respect to the core, determining the amount of acceleration and the main rotor blades, the optimum range of profiles of the blades accelerating and main rotors, the optimal choice of design of the blades with the determination of optimal composite material which is made blade, determining the optimal geometric parameters of the combination of the rotor based on the use of mathematical models of aerodynamics, strength-based criteria and a variety subject to the restrictions and solving the problem of multi-criteria optimization.

It is shown that in order to reduce costs it is advisable to develop integrated CAD, partially using the existing system design, based on the application of the proposed optimization method.

Підписано до друку 01.12.2016. Формат 60×84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,16. Обл. вид. арк. 1,25.
Наклад 100 прим. Замовлення № /13

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680, Київ–58, пр-т Космонавта Комарова, 1.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру серія ДК № 977 від 05.07.2002