

УДК 621.313.21.001.4(045)

В. М. Синєглазов, д-р техн. наук, проф.,
Б. І. Дмитренко, асп.,
А. В. Кульбака

ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАННЯ МАКЕТА ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

Інститут аерокосмічних систем управління НАУ, e-mail: iesy@nau.edu.ua

Розроблено вимірювальний комплекс для проведення випробування макета вітроенергетичної установки. Запропоновано підхід для вимірювання потужності макета вітроенергетичної установки залежно від швидкості вітру.

Вступ. Виробництво енергії на базі невідновлюваних джерел призводить до забруднення навколишнього середовища твердими частинками, перегріву поверхні Землі, утворення великої кількості вуглекислого газу, що загрожує глобальними порушеннями природної теплової рівноваги з усіма можливими наслідками для клімату і життя на планеті. Необхідність розвитку вітроенергетики в Україні зумовлено такими причинами: дефіцитом органічного палива, зростаючою вартістю енергоносіїв, стрімким погіршенням екології [32]. Крім того, можливість використання вітроенергетичних установок (ВЕУ) як автономних джерел енергії для споживачів, віддалених від ТЕС, і, як результат, корисний соціальний та економічний ефект від енергозабезпечення невеликих фермерських та інших сільських господарств є важливими з огляду на економічну ситуацію, що склалася в Україні.

Ефективність використання енергії вітру залежить від якості проектування ВЕУ, що, в свою чергу, пов'язано з необхідністю проведення продувок роторів обертання в аеродинамічній трубі.

Постановка завдання. Для проведення випробування макетів ВЕУ необхідний комплекс технічних засобів, який дозволить зняти характеристики вітроустановки в аеродинамічній трубі або в реальних умовах.

Комплекс має давати змогу автоматизувати збір даних вітроустановки, зняти характеристики потужності вітроколеса, швидкість його обертання та швидкість набіжного потоку повітря до і після ротора вітрогенератора для визначення оптимального режиму роботи вітрогенератора. Оскільки комплекс автоматизований, він має бути програмно-апаратним. Всі дані мають автоматично зберігатися в єдиній базі для розрахунків і виведення інформації користувачу. Програмна частина – це програмне забезпечення і база даних для роботи з отриманою інформацією в ході експерименту. Апаратна частина перетворює фізичні характеристики в електричні сигнали, з якими надалі працює програмна частина.

Склад комплексу. Цей комплекс складається з апаратного устаткування та програмного забезпечення, дозволяє зняти характеристики вітрогенератора й аналізувати їх за допомогою персонального комп'ютера. В результаті маємо повністю автоматизовану систему, яка дозволяє в реальному часі змінювати вхідні параметри, тобто швидкість вітрового потоку і одночасно спостерігати зміну вихідного параметра – потужності вітроустановки.

Апаратна частина являє собою набір датчиків і спосіб їх підключення для отримання цифрового сигналу, два аналогові датчики швидкості вітру, розосереджені у просторі, сигнал з яких поступає на АЦП. Використаємо чотириканальний АЦП, що являє собою перетворювач аналогового сигналу в цифровий, працює в режимі послідовного наближення з аналоговим мультиплексором 4 в 1. Паралельно на АЦП надходить сигнал з датчика потужності. Датчиком потужності слугує однофазний низькооборотний багатополісний генератор. Шістнадцять супермагнітів наводять ЕРС у восьми котушках, у результаті відповідний струм надходить на АЦП. Частота обертання ротора вітрогенератора знімається за

допомогою того ж самого генератора. Оскільки в генераторі використовується 8 полюсів, то один оберт буде відповідати восьми періодам синусоїди. Через перетворювач частоти в напругу отримуємо окремий сигнал, що надходить на четвертий канал АЦП. Для моніторингу випробування на персональному комп'ютері комплекс підключається за допомогою 1-Wire мережі.

Реалізація локально розподілених систем на базі 1-Wire-шини це натеper чи не найбільш оптимальне рішення для більшості практичних завдань автоматизації. Основою архітектури 1-Wire мереж є топологія спільної шини, коли кожен пристрій підключено безпосередньо до єдиної магістралі без будь-яких каскадних з'єднань і розгалужень. При цьому як базову використовують структуру мережі з одним ведучим або майстром (персональним комп'ютером або мікроконтролером) і багатьма підпорядкованими пристроями (датчиками температури, аналого-цифровим пристроєм, пам'яттю та ін.) Максимальна швидкість обміну інформацією в мережі становить 16, 3 кбіт/с і повністю задовольняє вимоги для використання в галузі автоматизації.

Програмна частина в розглядуваному випадку реалізована програмою TreeWorks для моніторингу даних, отриманих із АЦП з 1-Wire інтерфейсом фірми Dallas Semiconductor. Програма TreeWorks працює з розгалуженнями мережі автоматично. Вона сама визначає послідовність підключення і відключення гілок розгалуження, розташованих на різних рівнях, сама виконує пошук та ідентифікацію пристроїв в мережі, контролює правильність функціонування всіх компонентів у складі конфігурованої 1-Wire мережі.

Комплекс для проведення випробування. Цей комплекс призначено для проведення експериментального дослідження функціонування моделі вітрогенератора в аеродинамічній трубі, характеризується напрямленим потоком повітря з постійною швидкістю, тобто ламінарним потоком (рис. 1). Ааеродинамічна труба закритого профілю запобігає впливу будь-яких посторонніх факторів і дозволяє провести «чистий» експеримент. Це дозволить налаштувати лопаті вітроколеса на оптимальний кут атаки, визначити робочу частоту обертання. Важливо знати якості вітрогенератора, його номінальний ККД, що залежить від конструктивних рішень вітроколеса і аеродинамічних поверхонь.

Вимірювання швидкості повітряного потоку в аеродинамічній трубі. Виконують за допомогою пристрою, показаного на рис. 2, де до осі чашкового ротора прикріплено оптичний енкадер (рис. 3). Світлодіод слугує джерелом імпульсів, на який подається напруга живлення, а фотодіод – приймач; проходячи через енкадер на приймачі формуються імпульси з певним періодом (рис. 4). Залежно від зміни частоти обертання ротора, змінюється частота імпульсів на енкадері.

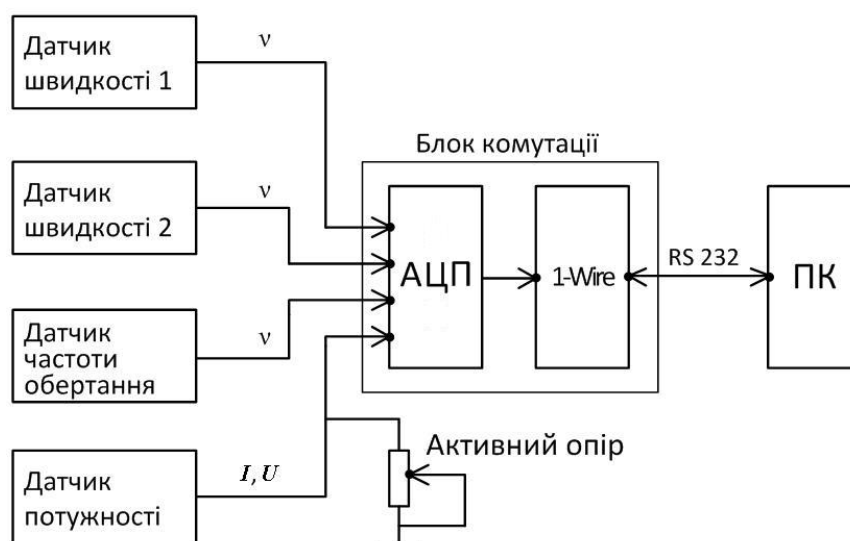


Рис. 1. Структурна схема комплексу для ВЕУ

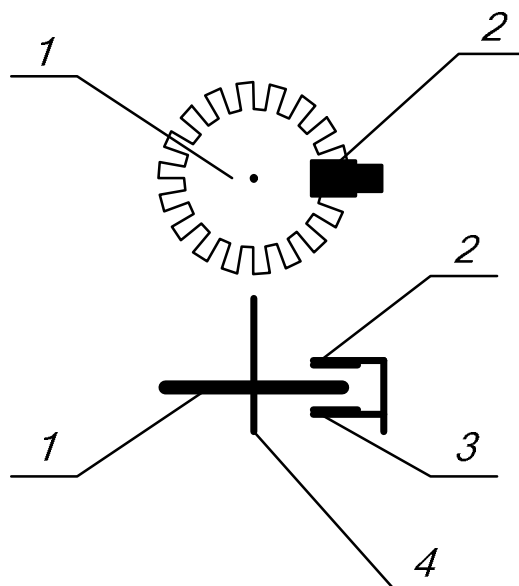


Рис. 2. Датчик: 1 – енкодер; 2 – світлодіод; 3 – фотодіод; 4 – вісь

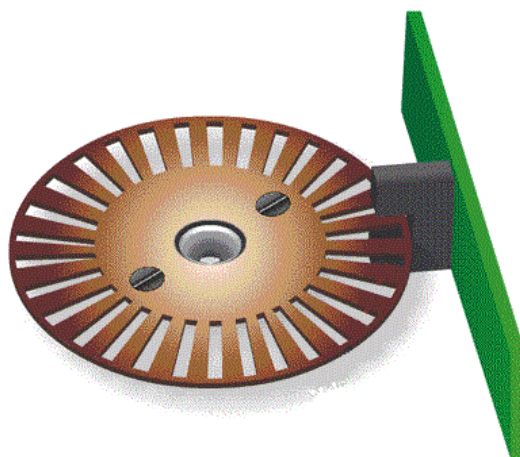


Рис. 3. Оптичний енкодер з фотоелементом

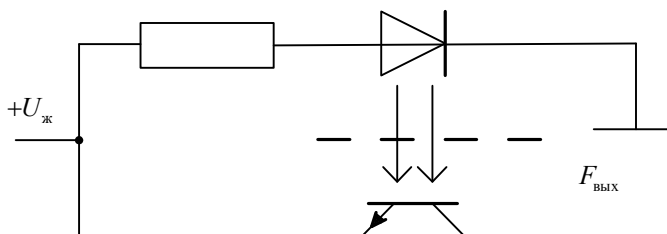


Рис. 4. Електрична схема оптопари

Для перетворення прямокутних імпульсів в напругу використовуємо перетворювач частоти в напругу LM 2917.

За допомогою перетворювача частоти отримуємо напругу прямопропорційну частоті обертання осі анемометра, що в свою чергу відповідає швидкості повітряного потоку. Для калібрування напруги використовуємо в схемі резистори змінного опору, опір яких змінюємо відносно фабричного датчика швидкості.

Розрахунок вихідної напруги електрогенератора на постійних магнітах. Для зняття характеристики потужності вітроустановки залежно від швидкості повітряного потоку використовуємо низькообертовий електричний генератор, вісь якого безпосередньо з'єднано з віссю вітродвигуна, оскільки застосування редукторів істотно зменшує коефіцієнт корисної дії, ускладнює конструкцію і знижує надійність. Для отримання досить високої вихідної напруги та підвищення електричної потужності необхідно використовувати багатополісний електричний генератор, ротор якого для спрощення і здешевлення конструкції може бути зроблений на постійних магнітах.

Низькообертовий багатополісний генератор можна сконструйовано за простою схемою (рис. 5).

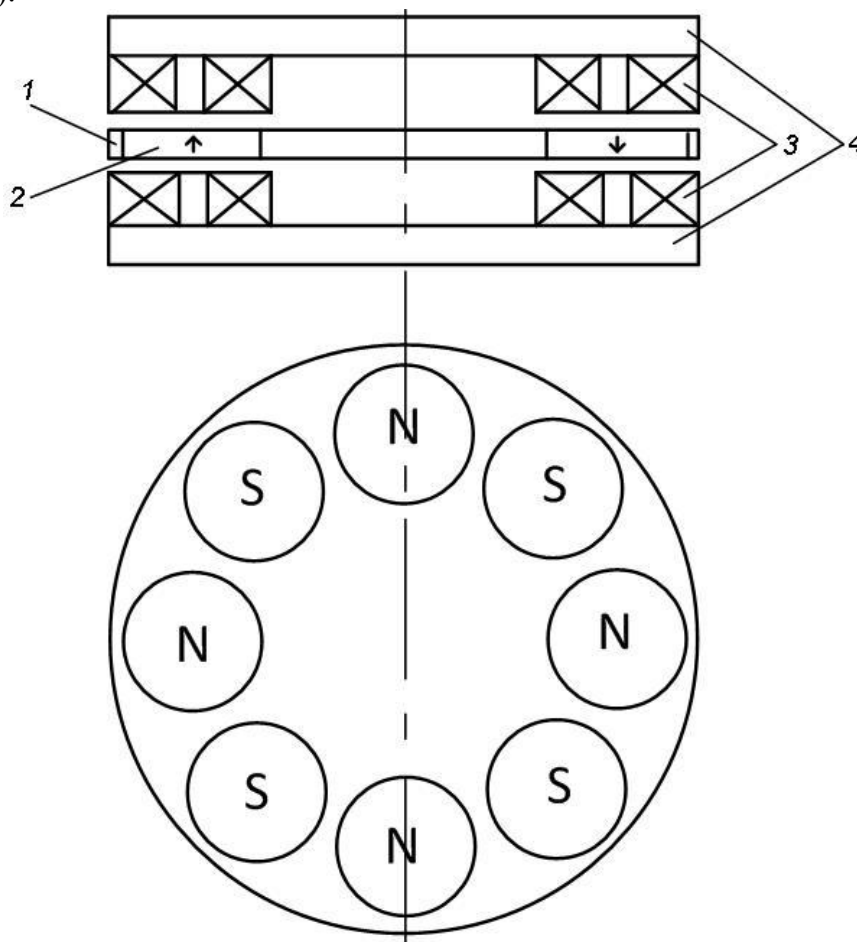


Рис. 5. Схема восьмипольного низькообертового генератора: 1 – основа ротора (оргскло); 2 – постійний магніт (в кількості 8 штук, аксіально намагнічені); 3 – обмотки котушок (мідний дріт в емальованій ізоляції); 4 – основа статора (ДВП)

Постійні аксіального намагнічені магніти кріпляться на рухомому роторі, спроможному обертатись відносно нерухомого статора. Постійні магніти складу неодим–залізо–бор (Nd–Fe–B) дискового типу в кількості 8 штук, діаметр яких становить 25 мм, товщина 4 мм. Звідси отримаємо восьмифазний генератор. Вибрана конструкція генератора передбачає використання статора з двома шарами котушок, між якими обертається ротор. Кількість котушок в кожному шарі відповідає кількості полюсів (магнітів), особливістю розміщення верхнього шару статора відносно нижнього – це радіальне зміщення магнітів на 22° , завдяки чому виключається явище злипання, що виникає під час обертання ротора навантаженого генератора. Котушки намотані шестижильним емальованим мідним дротом. Саме таке застосування дозволяє більш щільно укласти обмотку в котушку і отримати котушку з більшою допустимою пропускною величиною струму, оскільки струм

поширюється по периметру перерізу проводу, а не по всій площі. Використовуючи 6 жил, збільшуємо пропускну здатність обмотки. В результаті ці 6 жил паралельно замикаємо. Параметри котушки: мідний провід діаметром 0,1 мм, кількість витків 400 штук, зовнішній діаметр котушки 35 мм, висота 10, внутрішній діаметр 8 мм. Максимальна пропускну здатність такої котушки 2,5 А. Вісім котушок однієї площини статора з'єднуємо послідовно, тобто кінець попередньої з початком наступної. Така конструкція в ідеалі повинна дати вихідний сигнал синусоїда, піки якої змінюються залежно від того, що полюс магніту проходить над полюсами котушки, що чергуються.

Розрахунок вихідної напруги генератора залежить від параметрів конструкції: n – кількість полюсів; B_0 – максимальне значення (амплітуда) індукції в зазорі; S – площа потокощеплення (площа полюса); m – кількість котушок; N – кількість витків однієї котушки; f – частота обертання, T – період обертання (час одного оберту); ω – колова частота обертання (кутова швидкість).

Під час обертання магніту відносно котушок магнітний потік через котушки змінюється за законом $\Phi = \Phi_0 \cos(n\omega t/2)$, де $\Phi_0 = B_{\text{еф}} S$. Тут $B_{\text{еф}}$ – ефективне значення магнітної індукції в зазорі, отримане опосередкуванням по площі полюса. Відповідно до закону електромагнітної індукції Фарадея

$$E = \frac{d(N\Phi)}{dt},$$

отримуємо ЕРС котушки:

$$E = \frac{nN\omega\Phi_0 \sin(n\omega t/2)}{2} = \frac{1}{2} nN\omega B_{\text{еф}} S \sin(n\omega t/2).$$

Оскільки $f = \omega/(2\pi)$, отримуємо для амплітуди ЕРС однієї котушки вираз

$$E_0 = \pi f n N B_{\text{еф}} S = \frac{1}{2} \omega n N B_{\text{еф}} S.$$

За послідовного з'єднання котушок для вихідної діючої напруги отримуємо вираз (форма ЕРС – синусоїдна, $E_{\text{ген}} = nE_0 / 2^{\frac{1}{2}}$):

$$E_{\text{ген}} = \frac{\pi f n^2 N B_{\text{еф}} S}{\sqrt{2}} = \frac{\omega}{2\sqrt{2}} n^2 N B_{\text{еф}} S.$$

Ефективне значення магнітної індукції $B_{\text{еф}}$ може бути отримане опосередкуванням магнітної індукції в зазорі по площі полюса. Якщо розподіл магнітної індукції описується за законом синуса, то можна розрахувати $B_{\text{еф}} \sim (2/\pi) B_0$. Тоді вихідна діюча напруга

$$E_{\text{ген}} = \sqrt{2} f n^2 N B_{\text{еф}} S = \frac{\omega}{\pi\sqrt{2}} n^2 N B_0 S. \quad (1)$$

Випробування сконструйованого за схемою (рис. 6) генератора показали, що досить точно цей розрахунок відображає характеристики генератора: магнітний потік у зазорі і відповідно ЕРС генератора змінюються за законом синуса, вихідна діюча напруга генератора з досить високою точністю відповідає розрахованій за формулою.

Для розрахунку вихідної напруги генератора (діючої і амплітудної) можна використати програму PM_Generator (рис. 6).

Наприклад, виконуючи розрахунок для постійного магніту ($B_0 \sim 0,2$ Тл) за кількості полюсів $n = 8$, $N = 400$ витків, $S \sim 0,00049$ м² і частоти обертання $f = 2$ Гц (два оберти за секунду), отримуємо діючу напругу близько 7 В і амплітудну – близько 10 В (рис. 6). Оскільки для установки використано два шари обмоток, значення напруги буде більшим в два рази, а звичайний діодний міст випрямить напругу.

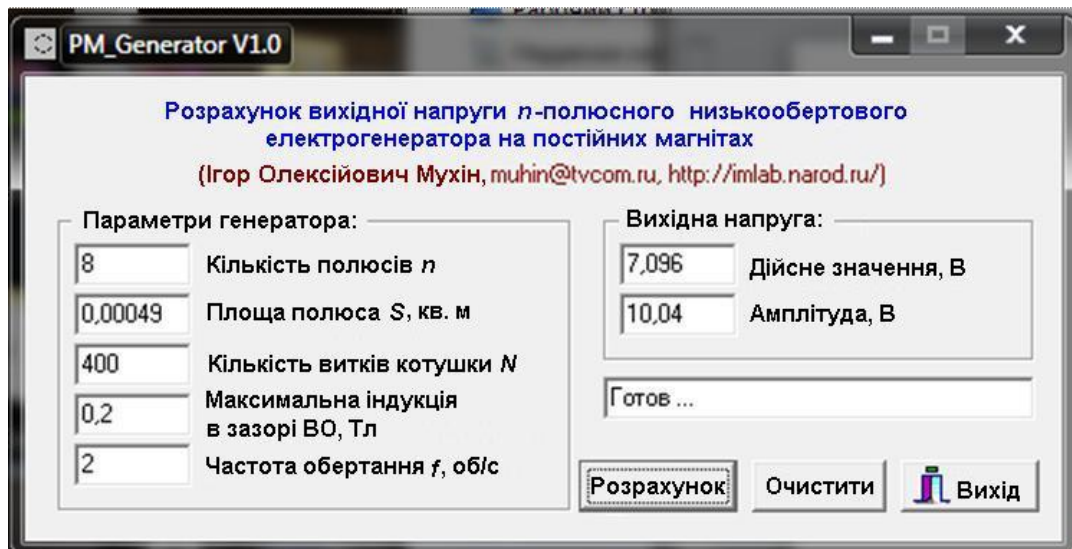


Рис. 6. Зовнішній вигляд вікна програми PM_Generator (версія 1.0)

Вихідну напругу генератора можна знайти за формулою (1):

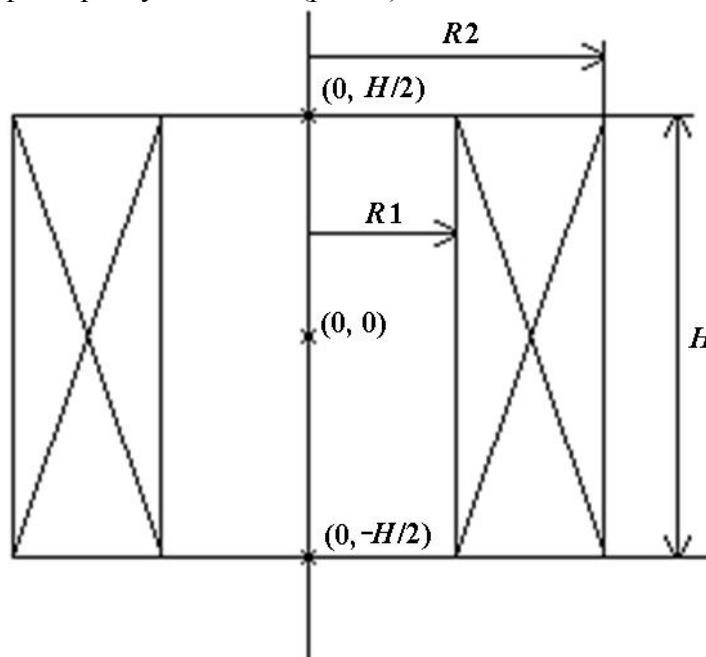
$$E_{\text{ген}} = \frac{\omega}{\pi\sqrt{2}} n^2 N B_0 S.$$

Тоді електрична потужність генератора в режимі короткого замикання

$$P_{\text{max}} = \frac{E_{\text{ген}}^2}{nR} = \frac{\omega^2}{2\pi^2} \frac{n^3 N^2 B_0^2 S^2}{R},$$

де R – активний опір однієї котушки генератора.

Знайдемо залежність вихідної напруги і електричної потужності від кількості полюсів. Будемо вважати, що кожна котушка є циліндричним соленоїдом, що має геометричні розміри: $R1$ – внутрішній радіус, $R2$ – зовнішній радіус, H – висота соленоїда, який намотано проводом діаметром d з фактором упаковки λ (рис. 7).

Рис. 7. Геометричні параметри циліндричного соленоїда: $R1$ – внутрішній радіус; $R2$ – зовнішній радіус; H – висота

Кількість витків циліндричного соленоїда може бути знайдена за формулою

$$N = \frac{4\lambda H(R2 - R1)}{\pi d^2}.$$

Активний опір

$$R = \frac{16\rho_e \lambda H(R2^2 - R1^2)}{\pi d^4}.$$

Тоді

$$P_{\max} = \frac{\omega^2}{2\pi^3 \rho_e} \frac{n^3 S^2 \lambda H \left(1 - \frac{R1}{R2}\right)}{1 + \frac{R1}{R2}}.$$

У першому наближенні маємо

$$S \sim 2R2\Delta;$$

$$n \sim \frac{\pi(D - \Delta)}{2R2};$$

$$S \sim \frac{\pi(D - \Delta)\Delta}{n},$$

де D – зовнішній діаметр кола, що утворюють магніти; Δ – ширина магнітного кола (діаметр магніту).

За цих наближень:

$$P_{\max} = \frac{\omega^2 B_0^2}{2\pi \rho_e} \frac{\lambda H \left(1 - \frac{R1}{R2}\right)}{1 + \frac{R1}{R2}} (D - \Delta)^2 \Delta^2 n. \quad (2)$$

Наприклад для генератора з восьмиполюсним магнітом з котушками, намотаними мідним проводом ($\rho_e = 1,67 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $R1/R2 = 0,2$, $H = 0,01$ м, $\lambda = 0,8$), електрична потужність в режимі короткого замикання відповідно до формули (2) буде дорівнювати приблизно 100 мВт за частоти обертання два оберти за секунду ($\omega = 6,28$ рад/с). Експериментальне значення становить приблизно 140 мВт. Відповідність досить задовільна з врахуванням похибок.

За зміною кількості полюсів можна вважати, що відносні розміри котушки ($R1/R2$) і її висота H не змінюються. Тоді електрична потужність генератора в режимі короткого замикання зростає прямопропорційно кількості полюсів, а також прямо пропорційно квадрату частоти обертання, квадрату індукції в зазорі і квадрату розмірів магнітного кільця (зовнішній діаметр, ширина магнітного кільця).

Діюче значення вихідної напруги генератора в режимі холостого ходу:

$$E_{\text{ген}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega B_0 N (D - \Delta) \Delta n,$$

або

$$E_{\text{ген}} = \sqrt{2} \omega B_0 \frac{\lambda H \left(1 - \frac{R1}{R2}\right)}{d^2} (D - \Delta)^2 \Delta. \quad (3)$$

Розрахункове значення вихідної напруги генератора за формулою (3) за частоти обертання два оберти за секунду – вище від виміряного (2,9 В). Якщо збільшити кількість

полісів генератора і відповідно зменшити розміри $R2$ котушки, зберігаючи незмінними її висоту H і відношення $R1/R2$, то при намотуванні котушок проводом одного діаметра вихідна напруга генератора буде залишатись майже постійною.

Висновки. Розроблений комплекс для проведення випробування вертикальної вітроустановки з виведенням та обчисленням результатів на ЕОМ дає змогу дослідити аеродинамічні й фізичні властивості макета вітроустановки, що тепер проектується на кафедрі авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів. Таке дослідження є обов'язковим етапом в проектуванні моделі ВЕУ, оскільки дозволяє враховувати фактори, які не були включені в процесі моделювання об'єкта. Як свідчить практика, одних теоретичних досліджень мало для вдалого проектування, оскільки не можливо врахувати всі нюанси реальної системи, особливо якщо вона взаємодіє з погодними явищами.

Пропонований комплекс структурно простий і водночас дає змогу зняти всі необхідні характеристики ВЕУ в автоматичному режимі. Подібних реалізацій для проведення випробування вітроколів не існує, тому цей комплекс просто необхідний для проектування вітроустановок. Отримання даних потужності вітроколеса за різних швидкостей набіжного потоку в аеродинамічній трубі, і відповідна частота обертання якісно характеризує вітроколесо і дозволяє оцінити параметри для проектування реальної вітроустановки, виходячи з даних карти вітрів певного регіону, де планується розміщення ВЕУ. Дуже важливою є економічна рентабельність вітростанції; вона має забезпечити хороший результат і окупити себе, давати «чисту» енергію, а згодом і здешевити витрати на енергію, оскільки природний потенціал вітрів невичерпний, якщо його правильно використовувати.

Список літератури

1. Бордюгов В. Н. Проектные решения и эффективность работы ветровых электростанций Украины / В. Н. Бордюгов, В. С. Подгуренко. // Мінпаливенерго та інших громадських об'єднань енергетиків. – К., 2005. – С. 146–147.
2. Кривцов В. С. Неисчерпаемая энергия: учеб. / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. // Кн. 2. Ветрогенераторы: – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2004. – С. 112–167; 500–513.
3. Кривцов В. С. Неисчерпаемая энергия: учеб. / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. // Кн. 1. Ветрогенераторы: – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. – С. 9–23; 243–267.
4. Яхно О. М. Ветроэнергетика: конструирование и расчет ВЭУ: учеб. пособие / О. М. Яхно, Т. Г. Таурит, И. Г. Грабар – Житомир: ЖГТУ, 2002. – 255 с.

В. М. Синеглазов, Б. И. Дмитренко, А. В. Кульбака

Измерительный комплекс для обеспечения проведения испытания макета ветроэнергетической установки

Разработан измерительный комплекс для обеспечения проведения испытания макета ветроэнергетической установки. Предложен подход для измерения мощности макета ветроэнергетической установки в зависимости от скорости ветра.

V. M. Sineglazov, B. I. Dmitrenko, A. V. Kulbaka

Measuring complex for the supplying of wind energy plant model testing

The measuring complex for the providing the testing wind energy plant of model of is developed. The approach for measuring the power of wind energy plant model, depending of wind speed is proposed.