

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка вітроенергоустановки для домашнього господарства

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Шифр, назва
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Шифр, назва
Спеціалізація «Електропобутова техніка»

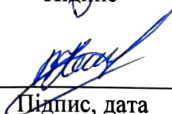
Шифр МРМА 22.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група ЕТм-21-1


Підпис

О. М. Дзюба
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

В. С. Неймак
Ініціали, прізвище

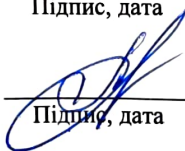
Нормоконтролер


Підпис, дата

Пунгун С. І.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

О. С. Поліщук
Ініціали, прізвище

_____ 2022 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Енергетики, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханіки та електричних апаратів
Освітній рівень магістр
Галузь знань "електричні машини"
Спеціальність 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"
Спеціалізація "Електрообудова техніки"
Освітня програма _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МАЕЕС

_____ 2022р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Дроба Олег Михайлович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка вітроенергоустановки для домогосподарства

керівник роботи Кеймак Віталій Степанович

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 1 02 2022 р. № РЗ

2. Строк подання студентом роботи на кафедру _____

3. Вихідні дані до роботи Витрати членів на виконання роботи

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Вступ
2. Розробка конструкції вітроенергоустановки
3. Розрахунок вітроенергоустановки

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Креслення конструкції вітроенергоустановки. Документальний опис
роботи. Розробка конструкції вітроенергоустановки, розрахунок
розмірностей машини, виробство енергії. Нормальний ший
на валу мотора, який має певну величину електричної структури,
вартість документації дослідження, витрати на виконання
роботи загальної та дослідницької енергетичної характеристики
системи абсолютного кваліфікації із вітроенергоустановки

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові Друба Олег Михайлович

2. Тема магістерської роботи Розробка вітроенергетичної
установки для приватного господарства

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 8 арк., сторінок записки 72

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки: _____

1. Вступ
2. Розробка конструкції вітроенергетичної
3. Розрахунки вітроенергетичної

Підпис студента Дуба

"20" 12 2022 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 2 від "27" 12 2022 р.

Оцінка проекту ЕК добре 4/5

Рекомендації ЕК у виробництво

Особливі відмітки _____

Технічний секретар А

"27" 12 2022 р.

ЗМІСТ

		с.
	Вступ	
1	Огляд та аналіз технічної літератури з тематики магістерської роботи	9
1.1	Стан питання розвитку вітроенергетики	9
1.2	Класифікація вітроустановок	17
1.3	Огляд генераторів	22
1.4	Аналіз існуючих технічних рішень	33
	Висновки до першого розділу	35
2	Розробка конструкції вітроенергоустановки	36
2.1	Вітроенергетична установка для генерування електроенергії з підвищеним використанням енергії вітру	36
2.2	Опис акумуляторної батареї	39
2.3	Опис генератора вітроенергоустановки	42
2.4	Опис електричної схеми вітроенергоустановки	43
2.5	Аналіз особливостей взаємодії вітропотoku у ВЕУ	44
	Висновки до другого розділу	52
3	Розрахунки вітроенергоустановки	53
3.1	Розрахунки параметрів вітроенергоустановки	53
3.2	Розрахунки на міцність елементів вітроенергоустановки	60
3.3	Дослідження енергетичних характеристик системи автономного живлення із вітрогенератором	60
	Висновки до третього розділу	66
	Висновки	68
	Перелік джерел посилання	69
	Додаток А	72

				МРМА 22.00.00.000 ПЗ			
№	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата			
зав.	Дзюба О.М.				Розробка вітроенергоустановки для домашнього господарства	Літера	
перевір.	Неймак В.С.					М	Аркиш
контр.	Пундик С.І.					4	Аркишів
підтвер.	Поліщук О.С.					70	
					ХНУ, гр.ЕТМ-21-1		

працює в умовах малих вітрів, розробка методів розрахунків ефективності ВЕУ з урахуванням динамічної взаємодії вітру з вітроколесом, моделювання цих процесів. Тому розробка нових типів ВЕУ, що мають високу ефективність, гарну працездатність і достатню надійність при енергопостачанні малоенергоємких споживачів є актуальним і перспективним завданням.

Дефіцит у країні традиційних джерел первинних енергоресурсів, фізичне спрацювання устаткування, що забезпечують їхню доставку, переорієнтація країни на ринкову економіку вимагає активного пошуку нових нетрадиційних засобів перетворення джерел енергії. Використання альтернативних джерел енергії є актуальною проблемою в усьому світі, розв'язок якої дозволить звільнитися від традиційних витрат на видобуток і переробку первинних енергоносіїв. Тому в цей час не тільки в Україні, але й в усьому світі величезна увага приділяється екологічно чистим поновлюваним джерелам енергії, що мають досить високий потенціал.

Підвищення технічного рівня виробництва безупинно пов'язане зі збільшенням споживання енергії. У цей час кількість вироблюваної енергії одержують шляхом використання традиційних енергоносіїв (вугілля, нафта, газ і т.д.), інтенсивне використання яких веде до забруднення навколишнього середовища і їх виснаженню. У роботах [11, 12, 14, 16] проводиться безліч оцінок запасів і строків виснаження традиційних джерел енергії. Бурхливий розвиток промисловості припускає досить відчутне зникнення не тільки запасів енергоресурсів, але й інших малопоширених у природі вихідних речовин і елементів, відходи яких переходять у нову якість, а їх кількість створює потенційну погрозу екології. При наявності достатньої кількості відходів їх можна регенерувати й повторно застосовувати, сама ж енергія регенерації не зазнає.

					<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		6

Енергія, зосереджена в природних джерелах не може використовуватися безпосередньо. Важливим етапом на шляху застосування енергії є її перетворення в доступну для використання форму. Серед безлічі видів поновлюваних енергоносіїв важливе місце займає вітрова енергія. У роботах [9, 16, 18] наведені методичні положення, оцінки, результати й рекомендації з використання енергії вітру, що представляють загальний характер і особливості їх використання. Дослідниками різних шкіл Я.І. Шефтер, Дж. Твайдел, Д. Рензо, Е.М. Фатєєв, Г.Х. Сабінін у свій час незалежно один від одного були показані невичерпність і перспективність використання ВЕУ для енергозабезпечення в тому числі й для автономних споживачів. Характерно, що дослідження проводилися в умовах рівнин і прибережних територій материків, де середньорічні швидкості вітрового потоку становлять 9-12 м/с. Потенціал вітрової енергії в країні попередньо досліджений, складена карта вітрового кадастру й зазначені особливості вітрового навантаження. Особливості використання цієї енергії полягають у тому, що більша частка потенціалу вітрового навантаження припадає на місця, де життєдіяльність людей обмежена гребневими зонами гірської місцевості, перевалами й ущелинами й потреба в електроенергії в зазначених районах відсутня.

Експлуатація вітроенергетичних установок (ВЕУ) середньої потужності в перерахованих районах не доцільна через більші втрати при передачі. Розробка й експлуатація потужних ВЕУ в Україні залишені на перспективу й вимагають більш глибоких досліджень вітрового кадастру.

Використання малопотужних ВЕУ, що випускаються промисловістю на території республіки малоефективне, оскільки для забезпечення їх роботи необхідні швидкості вітрового потоку 7 м/с і більш. Актуальність проблеми визначила завдання ефективного використання малих швидкостей вітру. Метою роботи є розробка й дослідження ВЕУ ефективно пра-

						<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	Арк. 7
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			

цюючої в діапазоні швидкостей вітру 2-6 м/с, що має малі масогабаритні розміри, що легко транспортується.

Задачі магістерської роботи наступні:

- аналіз існуючих технічних і технологічних рішень в галузі вітроенергетики;
- розробка конструкції вітроенергоустановки;
- розрахунок та вибір елементів конструкції вітроенергоустановки;
- дослідження елементів конструкції вітроенергоустановки.

					<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		8

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ З ТЕМАТИКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

1.1. Стан питання розвитку вітроенергетики

На сучасному етапі розвитку суспільства гостро встають проблеми енергоспоживання й питання збереження екології планети. Відомо, що рівень споживання енергії на душу населення й екологічні втрати, що наносяться від використання викопних джерел енергії, визначають місце розташування суспільства у світовому економічному просторі. Не всі регіони планети мають достатній ступінь природних копалин видів енергій, більшість із яких змушено імпортувати певні види, покриваючи, таким чином, дефіцит енергоспоживання, у тому числі й України, незважаючи на те, що має достатній потенціал гідроресурсів. Але відсутність окремих видів промислової бази й природних копалин роблять її поки енергозалежною по деяких категоріях. Тенденція розвитку енергоспоживання така, що пошук і розробка альтернативних видів енергії є важливим перспективним завданням по енергозбереженню. Останні роки усе більше приділяється уваги засобам перетворення екологічно чистим поновлюваним джерелам. Їхня природня поновлюваність, повсякчасність, а також необмежений потенціал роблять їх привабливими та перспективними. До одного з перспективних видів поновлюваної енергії відноситься вітрова. Невикористовувана енергія вітру даремно й безповоротно розсіюється в приземному шарі вітропотoku. Використання енергії вітру дозволяє здійснювати підняття води, аерацію заболочених водойм, меліорацію посівних площ, а також забезпечувати електроенергією автономних споживачів.

Визначення потенційних споживачів, розосереджених по територіальних зонах гористої місцевості, є немаловажним завданням. Необхідно вивчати характер їх діяльності у використанні похідної енергії ві-

					<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

тру і її якість і кількість. Виявлення локального споживача є лише частиною розв'язку комплексного питання по забезпеченню енергією. Немаловажним етапом у дослідженні є визначення потенційних запасів енергії вітру приземного шару за статистичним даними метеостанцій проведених за багаторічний період (10 років) стосовно до територій, на яких розташовані потенційні споживачі. Відомо, що ефективність використання вітроенергетичних установок в основному залежить від режиму вітропотoku, який характеризується мінливістю швидкості в часі. Збір статистичних даних з метеостанцій, їх обробка й аналіз характеру дії вітропотoku з метою визначення енергетичного потенціалу по регіонах суттєво полегшить завдання оптимального узгодження відбору вітропотoku з генерацією електричної потужності й навантаженням.

Однією із проблем розробки ВЕУ є підведення теоретичної бази створення систем технічного пристрою ефективно перетворюючого енергію вітру. Існує ряд труднощів на шляху розвитку й широкого застосування автономних установок. До них ставляться більші капітальні вкладення, експлуатація, економічна рентабельність різних типів генераторів, надійність, екологічна й суспільна прийнятність і т.д. [2].

У світовій практиці на сучасному етапі існує два підходи до використання енергії вітру. Перший - більша вітроенергетика, що використовує більші вітроенергетичні потужності до 1,5-2,0 МВт і мала вітроенергетика – до 100 кВт. Більша вітроенергетика використовується в країнах зі значними вітровими енергоресурсами, таких як Голландія, Данія, Австралія, Південна Америка й у великих розвинених країнах Франції, Німеччини, США і т.д. В таких країнах вітроенергетичні агрегати працюють паралельно з енергосистемою [4, 8].

					<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		10

перетворення й утилізації енергії вітру в різних цілях; обґрунтування оптимальних схем застосування установок залежно від вимог споживачів, особливостей експлуатації й зональних умов;

- розробка ефективних способів вирівнювання потужності й енергії вироблених ВЕУ. Завдання визначення оптимальних значень установленної потужності одиначної ВЗУ вимагає неоднозначних розв'язків і підходів, є багатофакторною й багатокритеріальною, але головними принципами оцінки є вартість виробленої енергії й питомі капвкладення.

Важливим показником ВЕУ, що впливають на величину критеріїв є питома потужність генератора:

$$P_{ген.пит.} = \frac{P_{ген.ном.}}{F_{БК}} \quad (1.1)$$

де $P_{ген.ном.}$ – номінальна потужність генератора, кВт;

$F_{БК}$ – площа поверхні, що обдувається лопастями вітроколеса, м².

У зв'язку з актуальністю було поставлено завдання пошукових робіт по створенню й обґрунтуванню ефективності використання вітросистем, доцільність і економічна рентабельність виробництва яких будуть обумовлені зниженням витрат на виготовлення вітроколес при збереженні їх геометричних розмірів, спрощенні конструкції ВЕУ за рахунок використання одного електричного генератора, підвищенні надійності роботи при низьких вітрових навантаженнях.

Огляд джерел, що описують теоретичні, конструкторські, експериментальні й експлуатаційні аспекти по дослідженню віротехнічних пристроїв вказує на те, що вітросистеми із двома вітроколесами досить відомі пристрої [11, 14, 15]. Але разом з тим їх широкому поширенню перешкоджають відсутність теоретичних основ і експериментальних даних закономірностей роботи таких пристроїв; аеродинамічних процесів, що

					МРМА 22.00.00.000 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виникають при обмітанні газовим середовищем двох вітроколiс, характеру зміни цих процесiв, визначення умов прiоритету того або iншого режиму обтiкання об'єкта й, вiдповiдно, оцiнка ефективностi, ККД i iн. Огляд науково-технiчних джерел показав, що методика визначення теоретичної потужностi ВЕУ iз двома вiтроколесами вiдсутня. У той же час у роботi [8] вказується на низький теоретичний коефiцiєнт використання потужностi повітряного потоку (усього 0,64) двоколiсної вiтроенергетичної установкi (ДВЕУ) i робиться висновок про недоцiльнiсть i неефективностi використання подiбних установок, а в роботi [29] напроти вiдзначається перспективнiсть створення ДВЕУ.

Як вiдомо в теорiї вiтроколiс звичайного типу передбачається, що минаючи через нього лiнii потокiв не терплять розриву, а саме колесо замiняється тонким проникним диском, при взаємодiї з яким повітряний потiк вiддає йому частину енергiї, у результатi тиск у потоцi i його iмпульс зменшуються. У певнiй моделi незбурена швидкiсть V_0 i щiльнiсть ρ вважаються постійними в часi й у будь-якому поперечному перерiзi розглянутого повітряного потоку. Згiдно з такою моделлю по класичнiй теорiї вiтроколесо може перетворити не бiльш 59% енергiї потоку, що набiгає, але представлений в [3] вивiд цього критерiю не дозволяє визначити умови роботи вiтроколеса, необхідних для досягнення такого енергоз'єму. При виводi критерiю Бетца не враховувалися динамiчні ефекти взаємодiї потоку з вiтроколесом.

У реальних умовах при протiканнi повітряного потоку через лопать вiдбувається його завихрення й турбулiзацiя. Що приводить до закручення повітряного потоку за площиною вiтроколеса, тобто до його обертання щодо вектора швидкостi, що набiгає потоку й хаотичним збурюванням його швидкостi по величинi й напрямку.

						МРМА 22.00.00.000 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

вача повітряного потоку [7, 8]. Для ВЕУ розроблені й запропоновані різні варіанти концентраторів. Один з них представлений на рисунку 1.1. Це можуть бути дифузори або конфузори-дефлектори, що направляють на вітроколесо повітряний потік із площі більшої, ніж та, що обмітає вітроколесо.

Відома вітроустановка вертикально-осьового обертання з ротором, розташованим у трубі або вежі, усередині яких генеруються висхідні вихри [17]. Одночасно відбувається нагрівання повітря усередині вежі шляхом безпосереднього використання сонячного випромінювання з наступним розширенням повітря, внаслідок чого виходить ефект газової турбіни.

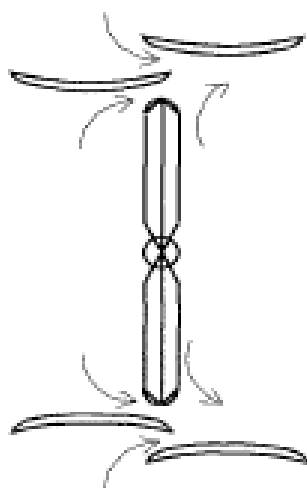


Рисунок 1.1 – Підсилювач потоку

Оцінку багатьох типів установок можна звести до визначення вартості електроенергії, що виробляється установкою. Існуюча централізована мережа не дозволяє розв'язати проблему електропостачання автономного споживача. Отже, необхідне створення малогабаритного автономного вітроагрегата, що задовольняє його потребам.

Аналіз класифікацій ВЕУ [12, 17] також показав, що для умов з малошвидкісним 1,8-6 м/с повітряним потоком і наявністю потенційного

					МРМА 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		20

Штампований шків – вентилятор зварної конструкції закріплений на валу за допомогою шпонки і гайки. Генератор Г222 (рисунок 1.7) відрізняється від вище зазначених, крім даних обмоток збудження і статора, головним чином, наявністю вмонтованого регулятора напруги.

Регулятор напруги Я112В, об'єднаний з шіткотримачем і задньою кришкою, закріплений до задньої кришки генератора, але не до бокової, як у 17.3701, а до торцевої частини. Оскільки регулятор напруги Я122В має спеціальний вивід для переривання струму в обмотці збудження при непрацюючому двигуні автомобіля, генератор має додатковий вивід „ 15 ”, до якого напруга підводиться через вимикач запалювання.

На задній кришці закріплений конденсатор, що знижує випромінювання генератором радіоперешкод. Його виводи з'єднані з виводом «30» генератора і масою. Генератори інших типів в своїй конструкції повторюють розглянуті вище конструкції, відрізняючись від них розмірами вузлів і деталей, витковими даними обмоток, типом регулятора і випрямляча. Зустрічаються, звісно, конструкції, в яких при загальному конструктивному виконанні в традиціях Г250 і 17.3701 застосовується статор з числом пазів 36, тобто об'єднуючи риси типових конструкцій.

1.3.2 Генератори з постійними магнітами

Постійні магніти в останні роки знаходять широке застосування в різноманітних областях техніки, що пояснюється безперервно зростаючими потребами техніки в приладах з ними, розробкою нових матеріалів постійних магнітів з різними характеристиками і нових конструкційних сталей з високою механічною міцністю.

Області застосування постійних магнітів дуже різноманітні. Вони з успіхом використовуються в електромашинобудуванні, радіоелектроніці, на транспорті, в техніці зв'язку, в медичній техніці і т. д.

					<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Оскільки для створення магнітного поля постійних магнітів не потрібно спеціального джерела живлення, то в деяких випадках вони дають єдине доступне технічне рішення.

Електричні генератори з постійними магнітами, володіючи перевагами безконтактних машин з електромагнітним збудженням, мають ще наступні переваги: високу надійність, простоту конструкції, високий ККД, надійне збудження, поліпшені вихідні характеристики, малу інерційність при перехідних процесах. В певному діапазоні частот струму та потужностей електричні генератори з постійними магнітами мають кращі масогабаритні характеристики, чим генератори з електромагнітним збудженням. Застосування нових матеріалів постійних магнітів дозволяє розробити генератори змінного струму підвищеної та високих частот на великі потужності (до 1000 кВ·А) з кращими масогабаритними показниками, ніж у генераторах з електромагнітним збудженням.

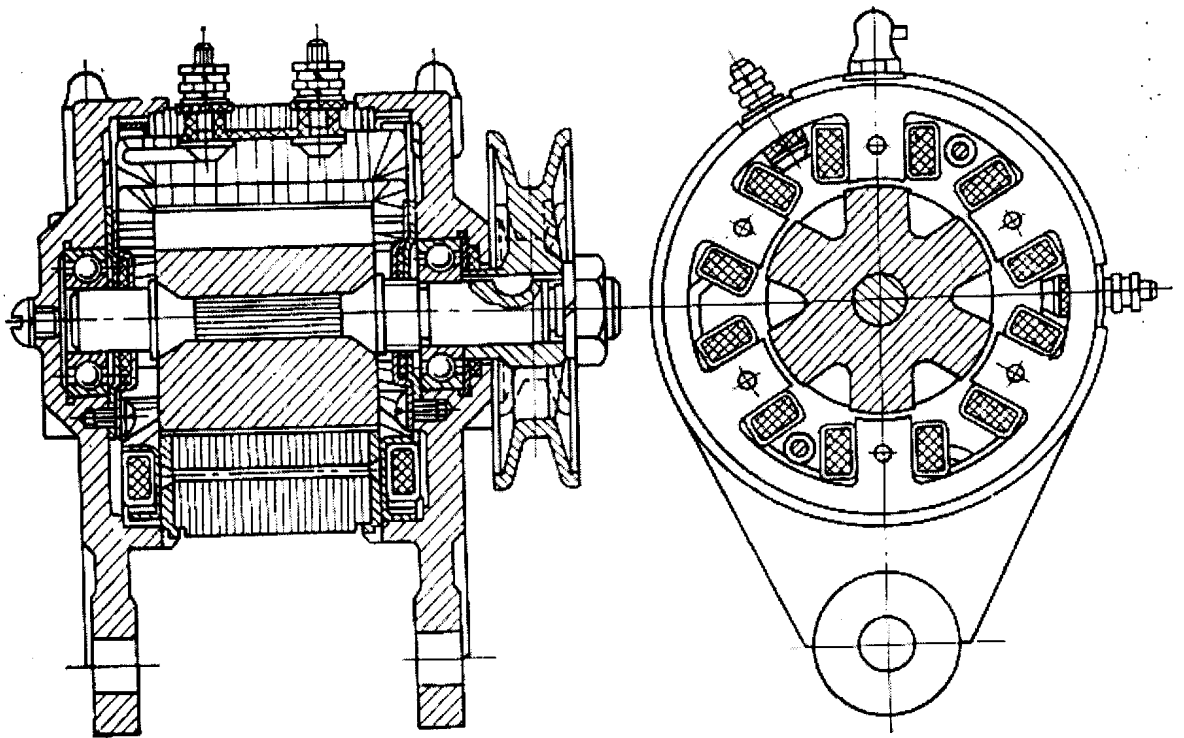
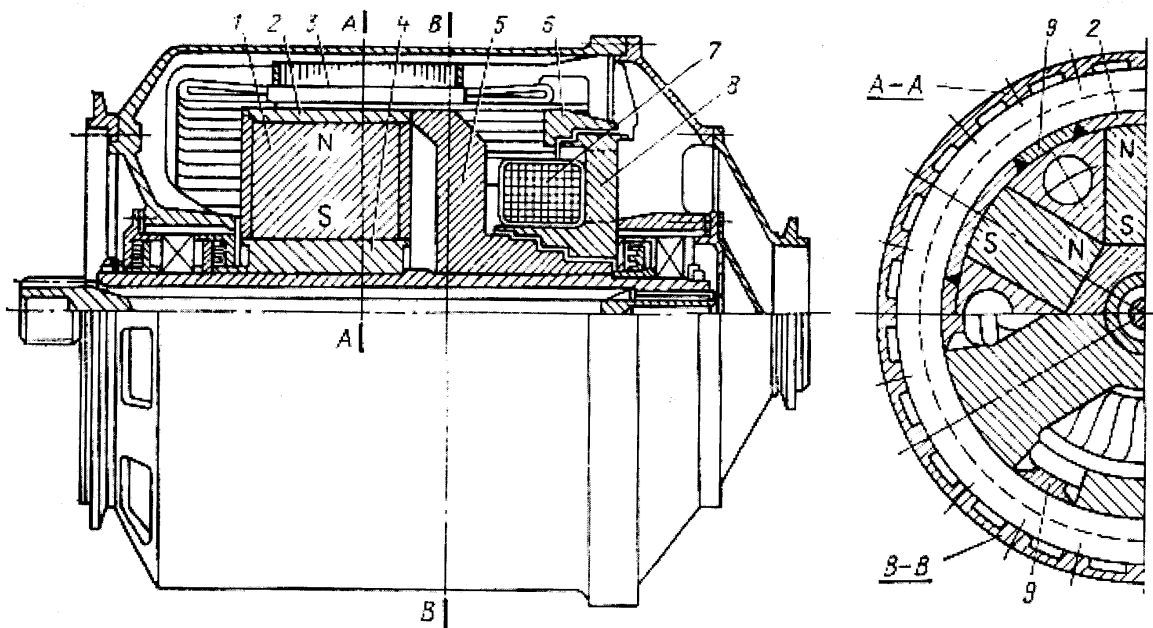


Рисунок 1.8 – Генератор ГЗО-А2

						МРМА 22.00.00.000 ПЗ	Арк. 28
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата			



1 – постійний магніт; 2 – полюсний башмак, 3 – статор з обмоткою; 4 – магнітна перемичка; 6 – полюсний наконечник; 7 – електромагнітна обмотка збудження; 8 – нерухомий магнітний шунт; 9 – немагнітна вставка

Рисунок 1.10 – Ескіз генератора комбінованого збудження

В 60 – х роках були розроблені для практичного застосування матеріали постійних магнітів на основі рідкоземельних елементів і кобальту (RCo). Застосування цих магнітів розширило перспективи подальшого поліпшення характеристик електричних генераторів з постійними магнітами. Однак специфічні властивості нових магнітів не дозволили реалізувати їх переваги при простій заміні старих магнітів на нові. Необхідна була докорінна зміна конструкції і схем керування електричних генераторів з постійними магнітами. Зокрема, доцільним стало застосування магнітних систем індуктора з пазовим розміщенням магнітів, без зубчастої конструкції якоря, випарної системи охолодження з рідким азотом чи іншими холодоагентами. В останньому випадку можна добитися значного підвищення ККД (до 95 %) при малій питомій масі генераторів [до 0,35 кг/ (кВ·А)].

						MPMA 22.00.00.000 ПЗ	Арк. 31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата			

Значний вплив на розвиток генераторів з постійними магнітами здійснила розробка нових перспективних систем енергопостачання змінного струму з перетворювачами частоти і систем постійного струму високої напруги (270 В) з застосуванням перетворювальних пристроїв на базі силових високовольтних напівпровідникових ключів. В цьому випадку керування напруги забезпечується перетворювачем, що дозволяє перебороти один із суттєвих недоліків генератора з постійними магнітами – важкість керування напруги. Більш високі ККД, велика надійність, малі маса і розміри, коротко тривалість перехідних процесів, покращенні вихідні характеристики в порівнянні з генераторами електромагнітного збудження забезпечують переваги електричним генераторам з постійними магнітами. В наш час спроектовані, виготовлені і випробувані електричні машини з постійними магнітами потужністю 60, 150 кВ * А, що працюють в генераторному і двигунному (статорному) режимах (фірми „Дженерал Електрик” – США).

Застосування генераторів з постійними магнітами в системах енергопостачання значно спрощує проблему охолодження генераторної установки. Ротор в більшості випадків не потребує спеціального охолодження, так як втрати в ньому малі. Можливість мати великий робочий зазор між ротором і статором дозволяє легко ізолювати ротор від статора і тим самим полегшити пристрій системи охолодження статора.

Застосування магнітів на базі рідкоземельних елементів в індукторах вентильних генераторів постійного струму дозволяє значно знизити рівень пульсацій випрямленої напруги в порівнянні з рівнем пульсацій в генераторах з електромагнітним збудженням. Застосування магнітної системи з пазовим розміщенням магнітів на індукторі, винесення якірної обмотки в робочий зазор, застосування в якості демпфера суцільної мідної труби на індукторі дозволило приблизно в два рази зменшити пульсації випрямленої напруги [4].

						<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	Арк. 32
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			

Аналіз існуючих технічних розв'язків, конструкцій і патентів показав, що на даний момент широкого використання автономних малопотужних вітроелектричних установок, що працюють із досить високим КПД при малих швидкостях вітрового потоку, не існує.

При розробці й створенні мало енергоємної ВЕУ вирішувалися наступні завдання:

1. Вивчення й аналіз накопиченого досвіду розробки й створення вітроустановок, здатних ефективно працювати в умовах невеликого вітрового потенціалу й забезпечувати електроенергією малопотужного автономного споживача.
2. Розробка теоретичних методів розрахунків і конструювання вітроустановки.
3. Реалізація розроблених методів розрахунків і конструювання отриманого нового технічного розв'язку при створенні нового дослідно-експериментального зразка і його експериментальному дослідженні.
4. Розробка практичних рекомендацій з розрахунків, проектування й створенню конструкцій ВЕУ для електропостачання малопотужних автономних споживачів.

Висновки до першого розділу

1. Оцінка вітрового потенціалу України показала, що на більшій її території переважають малошвидкісні вітрові потоки в межах від 2 до 6 м/с, що визначила напрямок на розробку й створення вітроенергетичної установки, що ефективно працюватиме в зазначених умовах.
2. Проведений огляд існуючих розв'язків, схем конструкцій і патентів указав на відсутність малопотужних вітроенергетичних установок, що працюють із високим КПД при малошвидкісних повітряних потоках.

					МРМА 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

санаторіїв; систем краплинного зрошення й аерації водойм; систем освітлення та водопостачання.

Потужність ВЕС достатня для забезпечення електроспоживання однією середньостатистичною родиною: 100 – 300 кВт/год. за місяць.

Гондола ВЕУ монтується на опорі, встановленій на фундаменті. Відчу- жувана при цьому площа землі становить лише близько 5,5 квадратних метра. Орієнтація за напрямом вітру відбувається за рахунок хвостового флюгера.

Робочий діапазон швидкостей вітру, м/с:

- стартова – 2,5;
- номінальна – 7,5;
- максимальна експлуатаційна – 45.

Потужність, Вт

- на затискачах генератора – 750;
- номінальна на виході – 1200;
- максимальна короткотермінова (до 4 сек.) – 2600;

Напруга на виході ~220 -230 вольт;

Середній час роботи від акумуляторної батареї (ємністю 190 ампер/год.), при навантаженні 1 кВт/год. – 3,5 години.

Ця система може: забезпечити постачання споживачів електроенергією сумарною потужністю 1,2 кВт із параметрами мережі (~ 220В, 50Гц); витрима- ти короткотермінове перевантаження до 2,6 кВт упродовж 3 – 5 сек. при вини- кненні індукційних піків споживання (при підключенні електродвигунів, насо- сів, потужних холодильників тощо); виконувати функції стабілізатора напруги, тому що при будь – яких режимах роботи вихідні параметри залишаються не- змінними (~ 220В; 50Гц); нагромаджувати енергію в акумуляторній батареї з наступним її перетворенням у параметри мережі (~ 220В; 50Гц); постачати при потребі споживачам постійний струм напругою 24 вольт (для нагрівання води; аварійне освітлення тощо).

						МРМА 22.00.00.000 ПЗ	Арк. 37
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата			

Таким чином, вітроелектрична система безперебійного постачання дає змогу гарантовано одержувати електроенергію змінного струму зі стабільними параметрами однофазної мережі для живлення комп'ютерів, телевізорів, касових апаратів, апаратури АЗС, аудіо - та відеотехніки, освітлюваних приладів, систем автоматики і циркуляційних насосів опалювальних систем, холодильників, водяних насосів, інкубаторів і т.д.

Вітроенергетична установка працює наступним чином:

При появі вітру достатньої швидкості флюгер встановлює головку за напрямом вітру, а робочі колеса (лопати) починають обертатися на валах. Вал відбору потужності передає енергію користувачу через конічну зубчасту передачу.

Незаперечними перевагами споживчих властивостей пропонованої вітроелектричної системи порівняно з існуючими, у тому числі і закордонними, є:

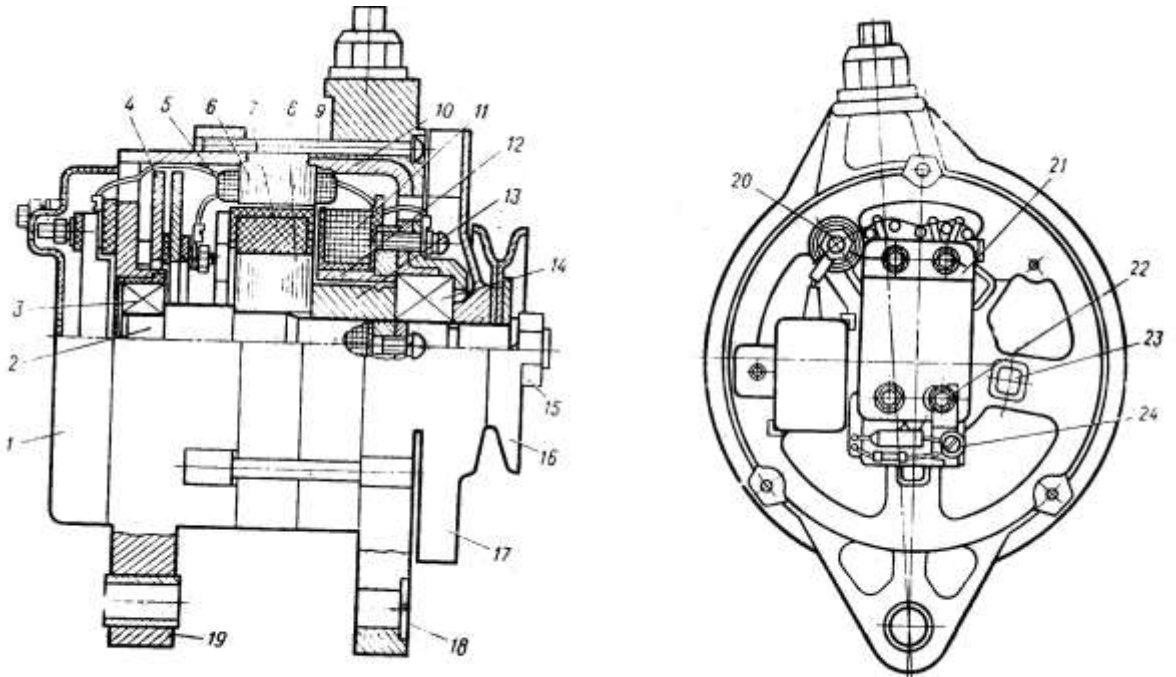
- вона максимально адаптована до вітрових умов більшої частини території України, а саме: стартова швидкість вітру може бути лише 2,5 м/с, а номінальна – 7,5 м/с; що забезпечує значний середньомісячний виробіток електроенергії;
- можливість монтування без використання підйомно – транспортного і зварювального устаткування в польових умовах;
- майже повна автоматизація режимів функціонування.

Остання обставина вкрай важлива, тому що при коливаннях напруги в мережі (а це явище набуває характеру епідемії через те, що енергонасиченість сучасних квартир, будинків і особливо котеджів різко зросла, а обладнання мережі залишилось тим самим), багато споживачів працюють зі зниженим ККД, що призводить до додаткових витрат енергії, а деякі прилади, особливо імпорتنі, взагалі виходять з ладу, якщо не приєднати їх до додаткових засобів стабілізації напруги.

						<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	Арк. 38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

2.3 Опис генератора вітроенергоустановки

Після аналізу генераторів постійного та змінного струму (див. п.1.3) для вітроенергетичної установки був прийнятий індукторний безщітковий вентильний генератор 955.3701, що представлений на рисунку 3.2.



1 – кожух; 2 – вал ротора; 3, 14 – шарикопідшипники; 4 – випрямляч; 5 – обмотки статора; 6 – сердечник статора; 7 – вузол постійних магнітів; 8 – зірочка ротора; 9 – стяжні гвинти; 10 – передня кришка-магнітопровід; 11 – обмотка збудження; 12 – втулка індуктора; 15 – гайка кріплення шківа; 16 – шків; 17 – вентилятор; 18 – підшипниковий щит; 19 – задня кришка; 20 – вивід «+» («30»); 21 – пристрій регулювання напруги; 22 – гайки кріплення регулятора; 23 – болт кріплення випрямляча; 24 – перемикач посезонного регулювання

Рисунок 2.2 – Безщітковий генератор 955.701

Ротор генератора несе на собі шестипроменеву зірочку, виконану зі сталі. В міжпроменевих проміжках розташовані постійні магніти, об'єднані в єдину конструкцію заливанням в алюмінієву деталь, закріплену на валу ротора, або опресо-

										МРМА 22.00.00.000 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

вані пластмасою. На зубцях статора розміщена котушкова обмотка, з'єднана в п'ятикутник. Передня кришка сталева. В ній розташований індуктор зі втулкою, що закріплена за фланець до кришки. На втулці індуктора розміщена обмотка збудження, намотана на каркас. Між втулкою індуктора й втулкою ротора є повітряний зазор

На сталеву кришку одягнений підшипниковий щит з натяжним вухом та лапою, розташування яких дозволяє застосовувати генератор на будь-яких моделях автомобілів ВАЗ. Задня кришка з алюмінієвого сплаву несе на собі випрямний блок БПВ62-100, розташований у її внутрішній порожнині й закріплений на ній п'ятьма ізольованими болтами, регулюючий пристрій, що містить інтегральний регулятор напруги Я112Б и підстроювальний резистор. Блок розташований на зовнішній поверхні задньої кришки і закритий пластмасовим кожухом. Там же розташований перешкодоподавляючий конденсатор К-73-21 — 2,2 мкф. Генератор, окрім основної обмотки збудження, має зустрічно їй увімкнену розмагнічувальну обмотку, що розширює швидкісний діапазон застосування генератора.

2.4 Опис електричної схеми вітроенергоустановки

Загальна електрична схема показана на рисунку 2.3 та листі МРМА 22.00.00.000Е3. Розглянемо більш детально роботу регулятора напруги.

Коли напруга генератора менша напруги, на яку відрегульований регулятор напруги, контакти замкнуті. Струм збудження проходить по ланцюгу генератора.

Коли напруга генератора стане більшою напруги, на яку відрегульований регулятор, контакти регулятора напруги розімкнуться і струм збудження, минаючи контакти обмежувача струму, піде через резистори. Струм збудження

					<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

від методу Лагранжа до методу Ейлера зводиться до диференціювання рівнянь за часом з наступним виключенням постійних a, b, c [8].

Рівняння нерозривності руху в математичній формі являє собою закон збереження маси [7] і має вигляд:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{d\rho}{dt} + \operatorname{div} \bar{V} \right) = 0 \quad (2.1)$$

Модель повітря можна розглядати в цілому як суміш n компонентів. Виражаючи його стан рівнянням стану для суміші ідеальних газів виражені законами Дальтона [5]:

$$P = \rho \cdot R \cdot T = \frac{x}{v} \cdot T \cdot \frac{k}{m} \quad (2.2)$$

де $P = \sum_{i=1}^n \rho^{(i)}$; $R = \frac{k}{m}$ - газова стала суміші;

$T = \frac{I}{V} \sum_{i=1}^n T^{(i)} v^{(i)}$ - температура суміші $v^{(i)}$;

v - число частинок в одиниці компонента та суміші;

ρ - густина компоненти.

Рівняння енергії, поряд з рівняннями стану, руху й нерозривності входить у систему основних диференціальних рівнянь, у результаті розв'язку яких повністю визначається рух газу.

Це рівняння [26] виражає закон збереження енергії, відповідно до котрого зміна за час dt сповненої енергії, що полягає з кінетичної й внутрішньої енергії частинок, дорівнює роботі прикладених до частки зовнішніх сил плюс приплив тепла ззовні. Рівняння енергії, описане в [8] є рівнянням Бернуллі.

$$\rho \frac{V_1^2}{2g} + p_1 = \rho \frac{V_2^2}{2g} + p_2 = const \quad (2.3)$$

Це рівняння застосовується в теоретичній аеродинаміці й справедливо для потоків, у яких можна зневажити в'язкість, стискальність й теплопровідність. Тобто у потоці немає джерел тепла, що й має місце в більшості вітроустановок.

При визначенні потужнісних і силових характеристик взаємодії вітрового потоку з вітроколесом звичайно використовуються класична теорія або теорія реального колеса Сабініна Г.Х. [8]. Остання також базується на класичній теорії й відрізняється від неї обліком у балансі енергій вітроколеса й вітропотoku витрат на утворення вихрів кінцями лопат колеса.

Відповідно до класичної теорії ідеальне вітроколесо представляється у вигляді тонкого проникного диска або колеса з нескінченно більшим числом лопастей дуже малої ширини [8]. При зустрічі ламінарного вітрового потоку з перешкодою (рисунок 2.4) за рахунок виникаючого підпору тиск у потоці зростає від W_0 до W_1 і після проходження через переріз, у якому розташовано колесо різко падає до W_2 . Розрідження, що утворилось в міру видалення від вітроколеса, асимптотично наближається до нуля. Швидкість потоку при наближенні до вітроколеса знижується від V_0 до V_1 після проходження перетину A_1 досягає мінімального значення V_2 (рисунок 2.4, с).

Для визначення потужності вітроколеса класична теорія використовує теорему імпульсів і закон збереження енергії [8].

						МРМА 22.00.00.000 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата			

$$(V_0 - V_2) \cdot V_1 = \frac{(V_0^2 - V_2^2)}{2}. \quad (2.6)$$

Звідки:

$$V_1 = V_0 + \frac{V_2}{2}, \quad (2.7)$$

або:

$$V_2 = 2V_1 - V_0. \quad (2.8)$$

Секундна маса повітря, що проходить через площу перетину та обдуває вітроколесо, дорівнює:

$$m = \rho \cdot A \cdot V, \quad (2.9)$$

де ρ - щільність повітря в потоці.

Після підстановки (2.9.) і (2.10.) в (2.5.), одержуємо:

$$P_1 = 2\rho \cdot A_1 \cdot V_1^2 \cdot (V_0 - V_1). \quad (2.10)$$

Потужність вітроколеса також може бути виражена через потужність незбуреного потоку, що набігає, P_0 і коефіцієнт відбору потужності C_p , що характеризує ефективність використання вітроколесом енергії повітряного потоку:

$$P_1 = C_p \cdot P_0. \quad (2.11)$$

Потужність P_0 дорівнює енергії вітрового потоку, що проходить через одиницю часу, через площу A_1 , вітроколеса, що обдувається:

Вираз для коефіцієнта C_p може бути отриманий з (2.11) припідстановці (2.10):

$$C_p = \frac{2\rho \cdot A_1 \cdot V_1^2 \cdot (V_0 - V_1)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot V_0^3} = \frac{4 \cdot V_1^2 \cdot (V_0 - V_1)}{V_0^3}. \quad (2.12)$$

Виразимо відносно гальмування потоку у вітроколесі через коефіцієнт гальмування α :

$$\alpha = \frac{V_0 - V_1}{V_0}. \quad (2.13)$$

Тоді

$$V_1 = (1 - \alpha) \cdot V_0. \quad (2.14)$$

Підставивши (2.13.) і (2.14.), отримуємо:

$$C_p = 4\alpha(1 - \alpha). \quad (2.15)$$

Аналіз потужності вітроколеса при зміні коефіцієнта гальмування (2.12) показує, що максимального значення C_p досягає при $\alpha = 1/3$.

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 0,59 \quad (2.16)$$

Умова (2.16) називається критерієм Бетца й використовується в розрахунках вітрових і гідравлічних вітроустановок.

Слід зазначити, що класична теорія не розглядає поведінку повітряного потоку після проходження їм перетину A_2 і не дозволяє визначити осьові координати перетинів A_0 й A_2 відносно A_1 , так само як і перетину за колесом, у якому тиск і швидкість обуреного потоку стають рівними початковим значенням. У роботі [8] відзначається, що ці характеристики можуть бути визначені лише експериментально. Разом з тим вивчення картини взаємодії потоку з вітроколом показує, що для загальної потужності вітрогенератора ВЕУ велике значення може мати саме правильний вибір координати розміщення другого колеса. Розглянемо, які дані можуть бути отримані із класичної теорії, стосовно до розрахунків параметрів ВЕУ.

З аналізу класичної теорії роботи вітрогенератора відомо, що щільність енергії вітру вкрай низька. Отже, згідно формули (2.10) від розмірів вітроколіс залежить величина перетвореної потужності.

Це обумовлює їхні високі матеріалоемність і вартість. Тому на перший план висувуються питання оптимального конструювання ВЕУ й обґрунтованість вибору значення C_p .

Звернемося до фізичних основ використання кінетичної енергії вітру. Особлива увага при цьому приділяється тому, що коефіцієнт використання енергії вітру залежить не тільки від аеродинамічної досконалості вітроколіс, але більшою мірою від можливого відбору потужності, тобто від відношення питомої енергії необуреного потоку перед вітроколом до питомої енергії відпрацьованого потоку за колесом. У свою чергу, C_p ВЕУ пропорційний різниці швидкостей необуреного вітропо-

						МРМА 22.00.00.000 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

току перед колесом і вітрового потоку за ним. Чим більше ця різниця, тем вище ефективність ВЕУ. У цьому випадку частка корисної енергії відпрацьованого вітропоту становить незначну частину вихідної енергії робочого агента. Тому відвід останнього від ВЕУ є складним на відміну від інших перетворювачів енергії, наприклад, ГЕС, де агент рухається в замкненому просторі. Для інтенсивного відводу відпрацьованого вітропоту й запобігання ефекту закривання необхідно, щоб агент містив значну частину свого первісного запасу енергії. Відповідно класичної розрахункової схеми використання енергії вітру у ВЕУ (див. мал.2.1), швидкість необуреного потоку V_0 повинна бути більше швидкості відпрацьованого потоку V_2 , а ширина необуреного потоку A_0 повинна бути менша ширини відпрацьованого A_1 настільки, щоб:

$$V_0 \cdot A_0 \approx V_1 \cdot A_1 \quad (2.17)$$

Але в реальних умовах це нездійсненне, тому що потік за вітроколом починає взаємодіяти з іншим необуреним потоком, що має більшу енергію, що суттєво впливає на переформування характеру руху потоку за колесом. У результаті відпрацьований повітряний потік не може "розсунути" незбурений потік більшого енергопотенціалу для безперешкодного переміщення зі зменшеними швидкостями в просторі за колесом. У зв'язку з вищесказаним і з урахуванням припущення Хлопенкова викликає сумнів основна розрахункова схема руху робочого агента (рисунок 2.3).

Вважається, що ефективна працездатність будь-якої ВЕУ забезпечується завдяки ежекційному ефекту на границі поділу більш швидкісного незбуреного потоку по периметру вітрокола з відпрацьованим, що пройшов через вітроколо.

						<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	Арк. 51
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			

Висновки до другого розділу

В даному розділі розроблено конструкцію та електричну схему вітрогенераторної установки, що є оптимальною для даної місцевості та умов використання. Здійснено вибір акумуляторної батареї. Проаналізовано взаємодію вітроенергоустановки із потоками повітря. Наступним етапом є проведення необхідних розрахунків конструкції та її дослідження.

					<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		52

3. РОЗРАХУНКИ ВІТРОЕНЕРГООУСТАНОВКИ

3.1 Розрахунки параметрів вітроенергоустановки

Енергія повітряного потоку визначається як кінетична енергія рухомого тіла:

$$E = mV^2 / 2, \quad (3.1)$$

де m – маса рухомого потоку; V – його швидкість.

Маса рухомого потоку може бути виражена через його об'єм V та густину

Тобто

$$m = V \rho / g, \quad (3.2)$$

де g – прискорення вільного падіння.

Якщо площу перерізу, перпендикулярного до напрямку руху повітряного потоку, позначити через F , то його об'єм становитиме

$$V = F \delta \quad (3.3)$$

Підставивши (3.3) у (3.2), а (3.2) у (3.1), отримаємо

$$E = F \rho V^3 / 2g \quad (3.4)$$

або в кіловатах

$$E = 0,0049 \rho V^3 F \quad (3.5)$$

					МРМА 22.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Залежність потужності P повітряного потоку, що припадає на 1 квадратний метр його поперечного перерізу, від швидкості повітряного потоку v при температурі $+ 15$ С та атмосферного тиску $101,325$ кПа ($=1,25$ кг/м) приведена в таблиці 4.1.

Таблиця 3.1 - Залежність потужності повітряного потоку від його швидкості

$v, \text{ м/с}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$P, \text{ кВт/м}$	0,039	0,132	0,312	0,61	1,054	1,674	2,5	3,6	4,9

Відносну зміну потужності повітряного потоку при відхиленні температури та атмосферного тиску відповідно від $+ 15$ С і $101,325$ кПа у діапазоні їх реальних значень показано в таблиці 3.1.

Вітроенергетичні установки можуть перетворювати в корисну енергію лише частину енергії, що припадає на площу вітроприймального пристрою. Показником цього перетворення є коефіцієнт використання енергії вітру - функція швидкохідності вітроколеса. Для ідеального вітроколеса при $z = 5 - 6$ значення досягає максимуму, який дорівнює $0,593$ експериментальні дані показують, що дволопатеve вітроколесо правильної аеродинамічної форми при $z = 5 - 6$ має $=0,47$. У практичних розрахунках ВЕУ коефіцієнт використання енергії вітру рекомендується брати таким, що дорівнює $0,4$.

При переході від потужності вітрового потоку до потужності ВЕУ швидкість потоку має бути замінена його розрахунковою швидкістю - тою мінімальною швидкістю, при якій ВЕУ розвиває встановлену потужність. В.І.Єсьман і Н.А.Мамедзаде пропонують як розрахункову брати швидкість, що забезпечує максимум річного вироблення електроенергії. На підставі цього та кривої повторюваності Гриневича в [2] запропоновано розрахункову швидкість вітру визначити за формулою

З рахуванням коефіцієнта використання енергії вітру та його середньої швидкості, а також втрат, пов'язаних з перетворенням механічної енергії в електричну (в редукторі та електрогенераторі), формула для визначення корисної (встановленої) потужності (кВт), що може бути здобута від ВЕУ з площею її вітроприймального пристрою, має такий вигляд:

$$N = 0,0049 \rho V_p^3 F \xi \eta_p \eta_e, \quad (3.6)$$

де - η_p , η_e відповідно ККД редуктор та електрогенератор.

Площа перерізу вітрового потоку, що сприймається вітроколесом, дорівнює площі круга, який описується лопатями при обертанні їх, незалежно від кількості останніх. Виразивши в (3.6) площу F через діаметр D (м) вітроколеса, дістанемо

$$N = 0,00386 \rho V_p^3 D \xi \eta_p \eta_e. \quad (3.7)$$

Результати розрахунку встановленої потужності ВЕУ залежно від швидкості вітру та діаметра вітроколеса при температурі +15 С, а атмосферному тиску 101,325 кПа, $\rho = 1,225$ та $\xi = 0,9$ наведено в таблиці 2.2.

При розрахунковій швидкості вітру в 1,5 раза вищій від середньорічної число годин використання встановленої потужності ВЕУ за рік становить 3500 – 4000, причому з максимальною потужністю установка працює близько 30 % загального часу, з потужністю не менш як половина встановленої – 45 % часу і не працює через малі швидкості вітру (енергетичний штиль) решту часу.

Корисну енергію ВЕУ починає віддавати при мінімальній швидкості вітру, що становить 30 – 40 % розрахункової. Ця швидкість вітру називається його мінімальною робочою швидкістю. Для самозапуску ВЕУ швидкість вітру повинна бути трохи більшою від цієї швидкості. При розрахунковій та більшій

						<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	Арк. 56
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			

швидкості вітру ВЕУ працює з установленою потужністю до деякої максимальної швидкості вітру, після досягнення якої вітроколесо зупиняється за умовами безпеки.

Формула (3.6) визначає встановлену потужність ВЕУ виходячи з розрахункової швидкості вітру без урахування діапазону його робочих швидкостей. Цього недоліку немає формула, запропонована [4], яка рекомендується для розрахунку питомої потужності ВЕУ (потужності у ватах, віднесеної до 1 м площі, описаної вітроколесом) і записується у вигляді

$$N_0 = 0,5\xi\eta_p\eta_c\rho \left[\int_{v_0}^{\bar{v}_p} v^3 f(v) dv + v_p \int_{v_p}^{v_{\max}} f(v) dv \right], \quad (3.8)$$

де v – швидкість вітру, м/с;

$f(v)$ – диференціальна функція розподілу цієї швидкості, проміле;

v - мінімальна робоча швидкість вітру,

v_p - швидкість вітру, що відповідає початку регулювання роботи установки, м/с;

v_{\max} – максимальна швидкість вітру, при якій установка виводиться з-під потоку вітру, щоб запобігти аварії.

Диференціальна функція розподілу швидкості вітру за періодами року обчислюється з використанням рівняння (3.2).

Повна встановлена потужність ВЕУ визначається виразом:

$$N = N_0 F. \quad (3.9)$$

З (3.9) і (3.7) випливає, що встановлена потужність ВЕУ тим вища, чим більша площа, яка опускається її вітроколесом. Тому намагання дістати найбільшу потужність установки при вибраній розрахунковій швидкості вітру при-

						МРМА 22.00.00.000 ПЗ	Арк. 57
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата			

керування та експлуатація ВЕНС; крім того, зростають внутрішньостанційні втрати в силових лініях.

Разом з тим зменшення встановленої потужності ВЕУ може впливати і позитивно, оскільки її вітроколесо та редуктор матимуть при цьому менші навантаження, що дає можливість полегшити їх конструкцію. З іншого боку, полегшення головки ВЕУ і, особливо, самого вітроколеса, безперечно, спрощує й здешевлює механізм регулювання частоти обертання та орієнтації вітроколеса відносно напрямку вітру. Все це спричинює зменшення маси елементів ВЕУ й здешевлення її опорної конструкції. Тому зменшення встановленої потужності ВЕУ при одному й тому самому діаметрі вітроколеса може спричинити не таке вже значне збільшення питомої вартості установки.

Крім того, зменшення встановленої потужності ВЕУ завдяки підвищенню надійності її енерговіддачі збільшує ступінь можливої участі ВЕНС у балансі потужності всієї енергосистеми, що пов'язано з витісненням інших електростанцій, а отже, економією капіталовкладень та експлуатаційних витрат.

Позитивним фактором зменшення встановленої потужності ВЕУ може бути можливість скорочення мінімальної відстані між ними при невеликих додаткових втратах енергії, тому що в цьому випадку збільшується час роботи установки при надлишковому енергоресурсі, якщо швидкість вітру вища від розрахункової.

Слід відзначити також можливий вплив зміни встановленої потужності ВЕУ на її ККД, хоч напрямок цього впливу не дуже ясний. З одного боку, зменшення потужності редуктора та електрогенератора призводить до деякого зниження їх ККД; з другого боку, може збільшитися середньозважений коефіцієнт використання енергії вітру вітроколесом, тому що скорочується тривалість роботи ВЕУ в режимах, які сильно відрізняються від оптимального при швидкості вітру, близькій до розрахункової.

					<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Усе вищевикладене показує, що вибір установленної потужності ВЕУ одночасно з вибором розрахункової швидкості вітру – це складна оптимізаційна задача, яка може кардинально вплинути на ефективність ВЕНС. Розв’язання цієї задачі має велике значення для уявлення про те, які ВЕУ будуть потрібні для ВЕНС з урахуванням вітрових та економічних умов конкретних районів. Це дасть змогу більш виразно говорити про можливість створення ВЕУ на основі сучасної техніки та обґрунтовано визначити напрями науково – дослідних і конструкторсько-експериментальних робіт у цій галузі.

3.2 Розрахунки на міцність елементів вітроенергоустановки

Розрахунки на міцність вала енергоустановки проводились із використанням модуля CosmosExpress, їх результати представлено на листі МРМА 22.00.00.000 ДД, числові результати представлено у додатку Б. Із отриманих результатів можна зробити висновок, що конструкція вала є надійною.

3.3 Дослідження енергетичних характеристик системи автономного живлення із вітрогенератором

Режими роботи систем автономного живлення при порівнянних потужностях самої системи автономного живлення й навантаження на практиці зустрічаються досить часто. Прикладом цього може служити збільшення систем автономного живлення невеликої потужності, розрахованих на живлення споживачів сумарною потужністю до 0,5-2 кВт, що має місце в невеликих селищах, фермерських господарствах.

Режим порівнянної потужності впливає на роботу всіх ланок тракту перетворення й стабілізації параметрів системи в режимі номінального навантаження. Найбільший вплив режим порівнянної потужності відбувається на лан-

					<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

ку генератор-випрямляч. Якщо потужність генератора значно (більш ніж на порядок) перевищує потужність повністю завантаженого випрямляча, то несинусоїдальність споживаного їм струму практично не позначається на формі підведеної напруги від генератора. При порівнянній потужності генератора й випрямляча вищі гармоніки струму викликають перекручування підведеної напруги тим більше, ніж ближче потужність навантаження до потужності генератора. Як відомо, випрямляч споживає з живильної мережі несинусоїдальний струм. Гармонійний склад струму залежить від схеми випрямлення й параметрів фільтра, що згладжує. Збільшення спотворень, пов'язане з ростом вищих гармонік у живлячій напрузі, приводить до додаткових втрат енергії в трансформаторах, кабельних з'єднаннях, генераторі й викликає збої в роботі електронної апаратури зв'язку, автоматики, обчислювальної техніки. Ступінь спотворення напруги (його несинусоїдальність) оцінюється звичайно коефіцієнтом гармонік по напрузі

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{nm}^2}}{U_{1m}}, \quad (3.10)$$

де U_{1m} - амплітуда першої гармоніки напруги;

U_{nm} - амплітуда вищих (n -го порядку) гармонік.

Спотворення напруги від роботи випрямляча виникають в основному за рахунок спадань напруги на опорах генератора, трансформатора й інших внутрішніх опорів джерела, що живить випрямляч.

Випрямляч в електричній схемі розглядається як генератор гармонік струму. У цьому випадку він може бути представлений еквівалентною схемою заміщення у вигляді джерела струму різних гармонік. На рисунку 5.1 представлена схема заміщення випрямляча. Навантаженням є еквівалентний опір живи-

					<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C_{2v} = \frac{1}{A_v - B_v}, \quad (3.14)$$

$$Q_{1v} = \frac{1}{K_v} \cdot \frac{A_v + 3B_v}{A_v + 2B_v} \cdot e^{i(1-v)\frac{4\pi}{3}}, \quad (3.15)$$

$$Q_{2v} = \frac{1}{K_v} \cdot \left(1 + e^{i(v-1)\frac{4\pi}{3}} - \frac{B_v e^{i\frac{2\pi}{3}} \left(1 + e^{i\frac{2\pi}{3}} \right)}{A_v + B_v} \right) \cdot e^{i(v-1)\frac{4\pi}{3}}, \quad (3.16)$$

Де коефіцієнти A_v , B_v , K_v визначаються за допомогою диференціального рівняння розглянутого ланцюга. Рівняння періодів дозволяють знайти кут перекриття фаз випрямляча λ і кути включення й вимикання діодів θ_1 та θ_2 . Після визначення кутів можна розрахувати гармонійний склад струму випрямляча за допомогою наступної формули:

$$I_v = \text{Im} \left(\frac{K_v - e^{i(1-v)\theta_1}}{2\pi i(1-v)} \cdot \left(\left(C_{1v} - C_{2v} e^{i(v-1)\frac{2\pi}{3}} \right) \cdot e^{i(1-v)\lambda} - (C_{1v} - C_{2v}) \cdot e^{i(v-1)\frac{2\pi}{3}} \right) \right) \quad (3.17)$$

В обмотках статора генератора протікають несинусоїдальні струми, форма яких залежить, як було показано вище від числа фаз, характеру навантаження й тривалості комутаційного процесу у випрямлячі. Внаслідок цього в синхронній машині виникають додаткові втрати. При протіканні по обмотці статора несинусоїдального струму втрати в обмотці можуть бути визначені як сума втрат від гармонійних складових фазного струму.

$$P_{cu} = mR \sum_{-\infty}^{\infty} I_{2k+1}^2 K_{\phi(2k+1)} \quad (3.18)$$

де m - число фаз обмотки;

генератора від вищих гармонік струму випрямляча. Розраховані залежності втрат вітрогенератора при зміні навантаження представлені у додатках. Звідси видно, що загальний рівень втрат в обмотці вітрогенератора зменшується при зменшенні навантаження. Тут зручно проаналізувати вплив фільтра на виході випрямляча на рівень вищих гармонійних складові токи випрямляча й, відповідно, на величину втрат в обмотці вітрогенератора. Найменші втрати відзначаються при відсутності фільтра на виході випрямляча. Введення реактивності при підключенні фільтра збільшує рівень вищих гармонік струму через вентиль, що веде до збільшення втрат в обмотці вітрогенератора. Причому, найбільше значення втрати становлять при ємнісному фільтрі. Звідси можна зробити вивід, що підключення фільтра на вихід випрямляча в системі автономного живлення з вітрогенератором збільшує втрати вітрогенератора від вищих гармонічних складових струмів випрямляча при одночасному поліпшенні якості випрямленої напруги.

Проведено необхідні розрахунки елементів конструкції вітроенергоустановки для побутових потреб, також за допомогою модуля CosmosExpress проведено розрахунки вала енергоустановки на міцність.

					<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		67

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. – К.:ТОВ «ВіолаПрінт», 2008. – 55 с.
3. Безруких П.П. Использование энергии ветра. Техника, экономика, экология /П.П. Безруких. – М.: Колос, 2008. – 196 с.
4. Васько В.П. Управление параметрами электроэнергии автономных ветроэлектрических установок / В.П. Васько // Технічна електродинаміка. 2002. Вип.1. С.53-56.
5. Ветроэнергетика Украины. [Электронный ресурс] – режим доступа до даних: http://www.uwea.com.ua/ukraine_wind.php
6. Дзензерский В.А. Ветроустановки малой мощности / В.А. Дзензерский, С.В. Тарасов, И.Ю. Костюков. – К.: Наук. думка, 2011. – 592 с.
7. Забарний Г.М. Енергетичний потенціал нетрадиційних джерел енергії України / Г.М. Забарний, А. В. Щурчков// – К.: ІТТФ, 2002. □ С. 151-159.
8. Перспективы мировой ветроэнергетики. Доклад GWEC, Greenpeace International, DLR и Ecofys Cpnsultancy / [под ред. Crispin Aubrey, Angelika Pullen, Arthouros Zervos, Sven Teske], Berlin. 2007. – 31 с.
9. ВР. Прогноз развития мировой энергетики до 2030 года [Электронный ресурс] – режим доступа до даних: <http://www.bp.com>
- 10.Б.П. Коробко Як вибрати вітряка //Винахідник і раціоналізатор, № 2,2000 р., с.26-28.;
- 11.Проектуємо електрику разом. URL: <http://vgs-design-el.blogspot.com>
- 12.Дикий М.О. Поновлювані джерела енергії.: Підручник. – К.: Вища школа, 1993. – 351с.: іл.;

					<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		69

13. Журнал „ Винахідник і раціоналізатор”, № 1, 2000 р., с,4 -10.;

14. Васько П.Ф. Определение технических показателей качества эффективности использования вітроелектрических агрегатов в Украине // Энергетика и электрификация. – 1995. - № 2. – с.48 – 51.

15. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. – М.: Сельхозгиз, 1995. – 536с.

16. Подгуренко В.С. Об ошибочных утверждениях, дискредитирующих віротехнику // Энергетика и электрификация. К, 2000, - №12, с.49 – 53.

17. Алтухова Т.В., Скрипник С.А. Создание инновационной модели солнечно-ветрового воздушного комплекса для энергоснабжения промышленных предприятий. Матеріали фахового наукового журналу "Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки". – Київ: ТНУ, 2018. – Том 29 №3/2018 (68). – С.61–65.

18. Грузов Л.Н. Общие вопросы применения и устройства электрических генераторов с постоянными магнитами. : Энергоатомиздат. 1988. 280 стр. Москва.

19. Авторское свидетельство SU 1670170 А1. Дата опубликования 15.08.91 кл. F03D 3/06. Автор изобретения П.Г.Баклушин и В.В.Саисонов.

20. Авторское свидетельство SU 1195041 А. Дата опубликования 30.11.85 кл F03D 3/00. Автор изобретения Ю.В.Шевченко, В.И.Коваленко.

21. Авторское свидетельство SU 1086208 А. Дата опубликования 15.04.84 кл F03D 3/06. Автор изобретения Б.Б.Гурфинкель.

22. Авторское свидетельство SU 1657724 А1. Днепропетровский государственный университет им 300 – летия воссоединения Украины с Россией. Дата опубликования 23.06.91 кл F03D 3/06. Автор изобретения Н.Н.Харченко, Г.К.Волков, Ю.А.Арышев.

					МРМА 22.00.00.000 ПЗ	Арк. 70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

23. Авторское свидетельство 547546. Дата опубликования 13.05.77 кл F03D 3/00, F03D 7/04. Автор изобретения И.А.Бабинцев, А.И.Коженков, Ю.К.Петров и М.П.Федоров.

24. Твайделл Дж., Узйр А. Возобновляемые источники энергии. – М.: Энергоиздат, 1990. - С.195-239.

25. Лабейш В.Г. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – Спб.: СЗТУ, 2003. – 400с.

26. Воронин С.М. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учебное пособие. - Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2007. – 204с.

27. Быстрицкий Г.Ф. Общая энергетика: Учеб. пособие для сред. проф. образования: - М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 208с.

28. Абул Магомедов. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Махачкала: Издательско-полиграфическое объединение «Юпитер», г. Махачкала 1996.

29. Ветроэнергетика/ Под ред. Д. де Рензо: Пер. с англ.; В 39 под ред. Я. И. Шефтера.- М.: Энергоатом издат, 1982.

30. Чунихин А. А. Электроаппараты: Общий курс-3е издание., перераб. и доп.-М.: Энергоатамиздат, 1988.

					<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		71

ДОДАТОК А

					<i>МРМА 22.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		72