

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»**



**ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ  
ГЕНЕРАТОРІВ ВЕС та міні-ГЕС**

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ, ЗАВДАННЯ І МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ  
З ДИСЦИПЛІНИ  
«ЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ ВЕС та міні-ГЕС»

для студентів за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка  
і електромеханіка

Харків – 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»**

**ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ  
ГЕНЕРАТОРІВ ВЕС та міні-ГЕС**

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ, ЗАВДАННЯ І МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ  
З ДИСЦИПЛІНИ  
«ЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ ВЕС та міні-ГЕС»

для студентів за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка  
і електромеханіка

Затверджено  
редакційно - видавницькою  
радою університету,  
протокол № 1 від 16.02.2023 р.

Харків – 2023

**Особливості роботи генераторів ВЕС та міні-ГЕС.** Контрольні питання, завдання і методичні вказівки для виконання завдання з дисципліни «Електричні генератори ВЕС та міні-ГЕС» для студентів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка» / Укладач Шевченко В. В. – Харків: НТУ «ХП», 2023. – 34 с.

Укладач В. В. Шевченко

Рецензент: К.В. Махотило

Кафедра електричних машин

## ВСТУП

Методичне видання присвячено виконанню дослідницько-розрахункового завдання з дисципліни «Електричні генератори ВЕС та міні-ГЕС» для студентів за фахом 141 – Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка за спеціалізацією «Електричні машини».

**Метою роботи** є закріплення теоретичних знань з сучасної відновлювальної електроенергетики і відпрацювання практичних навичок вибору на базі виконання техніко-економічного порівняльного аналізу генераторів різного типу за умови їх використання для вітрових електростанцій (ВЕС) та для міні- та мікрогідроелектростанцій (міні- та мікро-ГЕС).

**Об'єктами дослідження** є електричні генератори різних типів.

В результаті виконання цих завдань студент повинен знати:

- сучасний рівень розвитку електроенергетики і напрямки вдосконалення установок, які використовують для малої електроенергетики;
- досягнення світової науки і практики в створенні генеруючих систем для малої електроенергетики, що працюють від відновлювальних джерел енергії (вітру, води);
- знати різні типи електричних машин (ЕМ), вміти порівнювати їхні характеристики при роботі в генераторному режимі;
- знати основні конструктивні рішення і особливості генераторів з урахуванням номінальної потужності та умов використання;
- знати перспективи створення ЕМ зі збудженням від постійних магнітів, сучасні технології виготовлення постійних магнітів, їх технічні та економічні характеристики, вміти оцінювати переваги і недоліки електричних генераторів з постійними магнітами;
- знати досягнення світової науки і практики в створенні генеруючих систем для електроенергетики, що базується на відновлювальних джерелах. Розуміти проблеми, що обмежують підвищення потужності ВЕС, вміти запропонувати шляхи подолання цих проблем.

В методичних вказівках сформульовані контрольні питання, вихідні дані до задач, а також методичні вказівки щодо їх розв'язання. Конкретний обсяг робіт уточнює викладач, який веде курс лекцій з дисципліни.

Звіт щодо виконання завдання є підсумковим документом роботи студента в семестрі. До заліку звіт повинен бути повністю оформлений і захищений. У кінці звіту необхідно наводиться список джерел інформації (книги, наукові статті, сайти із Інтернету...), які студент використовував в процесі роботи. Зверніть увагу, що серед вказаних джерел інформації повинні бути джерела останніх 2-3 років.

Звіт про розрахункову роботу починається з титульного листа, зразок оформлення якого наведено в додатку А. При оформленні звіту треба наводити постановку завдання, вказувати порядок його виконання, додавати необхідні схеми і графіки. Завдання може виконуватися на українській або англійській мовах.

При виконанні завдань додавайте необхідні ілюстрації, схеми і графіки, а також використовувати тільки систему одиниць і позначень електричних, магнітних, енергетичних, механічних величин, яка відповідає Міжнародній системі одиниць (СІ) та державним стандартам.

## **ЗАВДАННЯ**

### **1.1 Скласти відповіді на питання**

1) Назвіть типи електричних генераторів (ЕГ), які, на Вашу думку, можна використовувати для вітрових електростанцій (ВЕС) та для міні-гідроелектростанцій (міні-ГЕС). Вкажіть їх переваги та недоліки, рекомендований діапазон потужності.

2) Вкажіть напрямки розвитку сучасної вітроенергетики. Проаналізуйте переваги та недоліки роботи ВЕС.

3) Вкажіть де перспективно використовувати міні- або мікро-ГЕС. Аргументуйте Ваші пропозиції. Які генератори можливо використовувати для цих електростанцій? Вкажіть переваги і недоліки генераторів з постійними магнітами.

4) Порівняйте загальні характеристики постійних магнітів різних типів, які можна використовувати для гідрогенераторів міні- та мікро-ГЕС.

Вкажіть існуючі засоби намагнічування постійних магнітів. Опишіть використання постійних магнітів для ЕГ малої потужності.

**1.2 Виконати дослідження і запропонувати рішення проблеми згідно теми, що запропонована в табл. 1.**

Таблиця 1 – Данні для виконання завдання 1.2.

Варіант	Питання для виконання завдання
1, 11	Електроенергетичний комплекс України як частина Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) Європи. Засоби отримання електроенергії від відновлювальних джерел енергії в Україні.
2, 12	Вибір генераторів для ВЕС великої потужності. Вкажіть їх переваги і недоліки, сучасні напрямки подолання цих недоліків.
3, 13	Вітроенергетика як спосіб зменшення техногенного впливу на навколишнє середовище. Вкажіть переваги і недоліки вітроенергетики.
4, 14	Вибір конструктивних рішень вітроенергетичних комплексів малої і середньої потужності. Вкажіть їх переваги і недоліки
5, 15	Вибір та проведення порівняльного аналізу використання можливих типів генераторів для міні- і мікро-ГЕС. Вкажіть їх переваги і недоліки.
6, 16	Виконати класифікацію вітроенергетичних установок згідно особливостей їх конструктивних рішень і міста встановлення. Вкажіть їх переваги і недоліки
7, 17	Опішіть основні елементи комплектування вітроустановок. Що обмежує подальше підвищення потужності вітроенергетичних установок?
8, 18	Виконайте порівняння роботи генератора ВЕС на автономного споживача та на єдину енергетичну систему. В чому різниця? Які є обмеження під'єднання генераторів ВЕС та міні-ГЕС до єдиної енергетичної системи країни?.
9, 19	Коротко охарактеризуйте сучасні постійні магніти. Запропонуйте тип магніту для генератора ВЕС або міні-ГЕС. Пропозицію обґрунтуйте.
10, 20	Виконайте порівняльний аналіз синхронних генераторів з магнітоелектричним та електромагнітним збудженням при їх роботі в вітроенергетичних установках та як генераторів міні-ГЕС

## 2 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ

Матеріали, що наведено в цих методичних вказівках, допоможуть вам виконати запропоновані завдання.

### 2.1 Проблеми та напрямки розвитку електроенергетики України

В даний час в нашій країні є значні невирішені проблеми, які є загальною причиною для всіх країн світу: забруднення навколишнього середовища; обмеженість копалин паливних і мінеральних ресурсів; безперервне зростання населення; значні втрати електроенергії. Поганий технічний стан електромереж, які недосконалі системи обліку викликають збільшення рівня втрат електроенергії: втрати в усіх мережах України складають близько 15-18%, а в деяких регіонах втрати через зношеності електромереж досягають і більш істотних значень. Крім того, проблеми виникають через недоробки в сучасних технологіях отримання енергії.

Основою силового енергетичного комплексу України є Об'єднана енергетична система (ОЕС), яка забезпечує централізоване енергопостачання власних споживачів і взаємодіє з енергосистемами сусідніх країн. В ОЕС входять електростанції енергогенеруючих компаній (14 ТЕС, 4 АЕС, 7 ГЕС і 1 ГАЕС, 97 ТЕЦ, 8 ВЕС, міні- і мікро-ГЕС, тощо), магістральні електричні мережі національної енергетичної компанії (НЕК) «Укренерго» і розподільні електромережі регіональних енергопостачальних компаній.

На початок 2021 р. середні показники за світовими енергосистемами наступні: електростанції, які працюють на нафті – 38%, на природному газі – 20%, на вугіллі – 27%, що становить 85% від загального вироблення електроенергії. Решта 15% припадають на АЕС і на електростанції, що працюють від поновлюваних джерел енергії.

В Україні АЕС виробляють до 70 %. Загальна встановлена потужність енергосистеми України за різними джерелами оцінюється в 52900 МВт (за даними українських статистичних управлінь) або в 48000 МВт (за даними Європейського Банку Реконструкції та Розвитку). Загальна потужність 15 встановлених енергетичних блоків на 4 АЕС України становить 11900 МВт.

В даний час більшість віддалених споживачів, які не мають централізованого електропостачання, отримують електроенергію від дизельних електростанцій. Дорожняча дизельного палива призводить до збоїв в електропостачанні, простою підприємств, ди-



Рисунок 1 – Варіант комплектування ВЕУ відносно невеликої потужності (20-50 кВт)

сcomfortним умов існування населення. У той же час енергозабезпечення об'єктів, розташованих в районах з хорошим вітровим потенціалом доцільно здійснювати від вітроелектричних установок (ВЕУ) з високонадійними магнітоелектричними синхронними генераторами (СГ) при безпосередньому приводі від вітротурбін.

Генератор приводиться в обертання вітродвигунами безпосередньо без мультипліка-

тора. Стабілізація параметрів електроенергії здійснюється за допомогою перетворювача типу випрямляч-інвертор напруги. Споживачі, які не вимогливі до якості електропостачання, підключаються безпосередньо до затискачів СГ. З огляду на можливість одиничного або дрібносерійного виробництва, з метою зниження вартості обладнання було прийнято рішення вивчити можливість виготовлення генератора ВЕУ на базі освоєних промисловістю машин суміжного класу. Тоді існуюча технологічне оснащення і налагоджене виробництво дозволять значно скоротити терміни і вартість його виготовлення. Разом з тим, через низьку швидкості валу вітротурбіни в оптимальному варіанті електрична машина повинна мати відносно великий зовнішній діаметр  $D$  при малій довжині. Орієнтація на електричні машини, що випускаються серійно, змушує трохи відійти від бажаних співвідношень  $D/l$ , проектуючи вітрогенератор на заданому діаметрі.

Згідно з проведеними розрахунками при потужності 5-10 кВт в якості генераторів ВЕУ слід вибирати синхронні генератори зі збудженням від постійних магнітів, а на більшу потужність (100-200 кВт) краще обирати АГ з короткозамкненим ротором

Техніко-економічні показники магнітоелектричної синхронної машини залежать як від властивостей постійних магнітів, так і від виконання магнітних систем статора і ротора. При виборі конструкції генератора зіставлені два типи компонування ротора: з радіальним і тангенціальним намагнічуванням постійних магнітів. Порівняльні розрахунки показали, що в даному випадку перевагу слід віддати другому варіанту з традиційною пазовою структурою статора і масивними полюсами на роторі.

Коли СГ працює на напівпровідниковий перетворювач, номінальні значення частоти і напруги на його затисках можуть бути обрані з міркувань економічності та експлуатаційної надійності. Енергетично доцільно встановлювати машини з частотою напруги не менше 400 Гц. Це положення, зокрема, відкриває можливості вибору кількості полюсів  $2p$  за умовою мінімізації витрат на постійні магніти і побудови раціональної схеми обмотки статора при заданому числі пазів серійного прототипу.

## 2.2 Вибір електричного генератора для малих вітроенергетичних установок

Розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у довгостроковій перспективі має відбуватися на основі конкуренції з традиційними джерелами, з урахуванням потенційної вигоди від їх розвитку.

Традиційні способи отримання електроенергії від невідновлюваних джерел (вугілля, газ, нафта, уран) на АЕС, ТЕС, ТЕЦ мають низьку обмежень. Після Чорнобильської катастрофи розвиток атомної енергетики здійснюється з великою обережністю і навіть зазнає протидії. Події в Японії (АЕС «Фукусіма», березень 2011 р.) ще більшою



мірою обмежили будівництво об'єктів атомної енергетики, яка в багатьох країнах залишається основною (Німеччина, Франція, США тощо). Знос електрообладнання (ЕО) класичних ТЕС, кінцівка запасів органічного палива, проблеми екології змушують говорити не лише про неможливість перспективного розвитку теплової енергетики, а й про можливість її існування, хоча це відображено в оновленому варіанті енергетичної стратегії України до 2030 р.

Тому протягом останніх 40-50 років безперервно зростає інтерес до відновлюваних джерел енергії і, насамперед, до вітроенергетики, яка поряд із малою гідроенергетикою є найперспективнішим напрямом для України. Перспективний напрямок розвитку ВДЕ на Україні пов'язаний з вітроенергетикою, яка може стати економічно рентабельною за рахунок зниження питомих капітальних витрат на будівництво ВЕУ та правильного вибору комплектуючих елементів.

У перших ВЕУ всіх типів і потужностей, як генеруючу одиницю, використовували асинхронну машину (АМ). Дійсно, АМ є найпростішими на етапах розрахунку, проектування, виготовлення та обслуговування, найнадійнішими, найдешевшими та найлегшими машинами (кВт/кг). Але при використанні в автономному генераторному режимі вони потребують джерела реактивної енергії, що знижує надійність ВЕУ. Оцінка вибору електрогенератора в залежності від діапазону встановленої потужності, від впливу швидкості вітру та стійкості «троянди вітрів» для конкретного регіону повинна виконуватись для вибору високих енергетичних параметрів, високої надійності та ККД.

Для розрахування потужності асинхронного генератора (АГ), встановленого у ВЕУ, складемо рівняння балансу активних потужностей, Вт:

$$P = C_p \cdot \frac{\rho \cdot v^3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \eta_{el} \cdot \eta_{mech},$$

де  $C_p$  — коефіцієнт використання енергії вітру;

$\rho$  — щільність повітря ( $\rho=1,23$  кг/м<sup>3</sup> при температурі  $t=15$  °С про і атмосферному тиску 760 мм рт. ст.);

$v$  — середня швидкість вітру (встановлюють да даними гідрометцентру окремого регіону), м/с;

$D$  — зовнішній діаметр вітроколеса, м;

$\eta_{el}$  — ККД електричного генератора, в.о.;

$\eta_{mech}$  — ККД механічної частини ВЕУ, в.о.

Швидкість вітру в момент часу  $t$  має випадковий характер і визначається на підставі спостережень та/або прогнозується з певною точністю. При розгляді енергетичних співвідношень майже завжди вважають, що коефіцієнт потужності АГ постійний.

Рівняння балансу потужностей для автономної системи електропостачання з АГ із системою самозбудження при включенні в коло обмотки статора конденсаторів представимо у вигляді:

$$m_s \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi_{AG} = m_N \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos \varphi_N \quad (1)$$

$$m_s \cdot \left[ \frac{I_k^2}{\omega_s \cdot C} - I_N^2 \cdot \omega_s \cdot L \right] = Q_{AG} \quad (2)$$

$$m_s \cdot \frac{I_k^2}{\omega_s \cdot C} = Q_{AG} \quad (3)$$

$$m_s \cdot \frac{I_k^2}{\omega_s \cdot C} + I_N^2 \left[ \frac{1}{\omega_s \cdot C_k} - \omega_s \cdot L \right] = Q_{AG}, \quad (4)$$

$$\frac{m_s}{\omega_s} \cdot \left( \frac{I_k^2}{C} + \frac{I_k^2}{C_k} \right) = Q_{AG}. \quad (4)$$

де  $I_s, I_N, I_k$  – струм обмотки статора АГ, струм навантаження та конденсаторів, А;  
 $\omega_s$  - кутова частота напруги генератора, 1/с;

$L$  – індуктивність навантаження, Гн;

$C, C_k$  – ємність конденсаторів, що шунтують і компаундують, Ф;

$\varphi_s, \varphi$  — фазові кути зсуву напруг генератора та навантаження;

$m_s$  – кількість фаз обмотки статора генератора;

$\cos \varphi_{AG}$  — коефіцієнт потужності генератора;

$Q_{AG}$  – реактивна потужність генератора, квар:

$$Q_{AG} = m_s \cdot U_s \cdot I_s \cdot \sin \varphi_{AG}.$$

Рівняння (1) – рівняння балансу активних потужностей. Воно виконується для кожної автономної системи з АГ зі самозбудженням. Наступні рівняння (2-5) виражають баланс реактивних потужностей при активно-індуктивному навантаженні і при використанні в генераторній установці тільки конденсаторів, що шунтують або компаундують. Рівняння балансу реактивної потужності є правильним для автономної системи лише тому випадку, якщо вирівнювання частоти автономної системи не застосовується вставка «випрямлювач-інвертор».

Якщо дана вставка є, то баланси реактивної потужності складають окремо для АГ з колом його збудження і окремо для автономного кола з компенсаторами реактивної потужності. Це допомагає забезпечити якості електроенергії.

При спільній паралельній роботі генераторів на загальне активно-індуктивне навантаження їх активні потужності складаються, а реактивна потужність системи дорівнює сумарній реактивній потужності встановлених конденсаторів.

Для роботи асинхронної машини у генераторному режимі необхідне джерело реактивної потужності. Значення ємності, необхідної для збудження генератора при заданій частоті, дорівнює, Ф:

$$C = \frac{1}{[(2\pi \cdot f_s)^2 \cdot (L_s + L_m)]}$$

де  $L_s$  та  $L_m$  – відповідно індуктивність обмотки статора і намагнічуючого контуру генератора, Гн.

У загальному випадку ємність, яка необхідна для отримання напруги на генераторі при заданому значенні навантаження, може бути розрахована:

- запишемо баланс реактивної потужності АГ, що працює на автономну систему, вар:

$$Q_C = m_s \cdot \frac{U_C^2}{X_C} = Q_{AG} + Q_N = P_{AG} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{AG} + P_N \cdot \operatorname{tg}\varphi_N;$$

де  $Q_C$  – необхідна реактивна потужність конденсаторів, вар;

Прийmemo  $P_{AG}=P_N$ , тоді, Ом:

$$X_C = \frac{1}{\omega_s \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f_s \cdot C}$$

Звичайно, значення ємності, яка необхідна для роботи АГ, якщо приводний двигун (лопаті ВЕУ) обертається зі змінною частотою обертання,  $\Phi$ :

$$C = \frac{P_N \cdot (\operatorname{tg}\varphi_{AG} + \operatorname{tg}\varphi_N)}{2\pi \cdot f_s \cdot m_s \cdot U_C^2},$$

де  $P_N$  – активна потужність, що передається від АГ до споживача, Вт;

$U_C$  – напруга конденсаторів, що підключені до АГ,  $\Phi$ ;

$f_s$  – частота напруги АГ, Гц;

$\varphi_{AG}$  та  $\varphi$  – відповідно кути здвигу фаз між напругою і струмом АГ та навантаження, ел.град.;

$U_{AG}=U_C$  – напруга на виводах АГ і, відповідно, на навантаженні, В.

Дослідження показали, що автономні АГ доцільно використовувати при значеннях  $n_{AG}/n_N \geq 0,9$ , де  $n_N$  – синхронна частота обертання асинхронної машини (об/хв).

При менших  $n_{AG}$  необхідна ємність для роботи асинхронної машини в генераторному режимі швидко зростає, і генератор майже повністю завантажується реактивним струмом.

В наш час значний інтерес викликає можливість використання в енергетиці електрогенераторів із постійними магнітами. Розвиток технологій дозволяє постійним магнітам конкурувати з генераторами зі звичайною електромагнітною системою збудження, а надійність та відсутність втрат дозволяють говорити про їхню перевагу. Тому в діапазоні потужностей від 1 кВт до 50 кВт все більшого поширення набувають синхронні генератори (СГ) з постійними магнітами (СПМ), які мають високий ступінь автономності, надійності, вони прості у виконанні та мають досить високий ККД.

Поки що вони дорогі у виготовленні, але переваги в експлуатації відповідають сучасній тенденції розвитку техніки.

Тож при виборі типу генератора, що встановлюється в ВЕУ, необхідно враховувати особливості його експлуатації, потужність, вести оцінку і враховувати економічні показники і технічні можливості виробництва, на якому передбачається випускати ВЕУ або окремо генератор.

Порівняння енергетичних характеристик генераторів багатьма дослідниками (активна потужність, напруга і частота) показує, що для ВЕУ малої потужності (5-10 кВт) доцільно використовувати не артеріальну гіпертензію з КЗ ротором, а СГПМ. Найбільш ефективна робота ВЕУ із СГПМ при малих швидкостях вітру. Слід пам'ятати, що АГ з КЗ ротором має меншу надійність, ніж СГПМ через обов'язкову комплектацію конденсаторними батареями. Але СГПМ має гірші енергетичні параметри, ніж АГ з КЗ ротором, при різких змінах швидкості вітру.

Слід пам'ятати, що потрібна серйозна аргументація вибору типу генератора, тому що вибір вимагатиме значних матеріальних вкладень в організацію їх виробництва: наукових розробок, створення нових технологічних процесів та оснащення, випробувальних стендів, підготовки інженерно-технічного персоналу та робітників. Тому для України, на наш погляд, більш прийнятним є використання класичних типів генераторів або генераторів спеціального, але більш традиційного виконання, що теж є визначальним фактором вибору типу генератора.

В цілому для ВЕУ можливі не тільки АГ з к.з. ротором або СГПМ, тобто синхронні генератори з магнітоелектричним збудженням (із збудженням від постійних магнітів), також можливе використання:

- синхронні генератори з електромагнітним збудженням;
- асинхронні генератори із фазним ротором;
- асинхронізовані синхронні генератори;
- спеціальні СГ: індукторні, генератори з кігтеподібним ротором та деякі інші.

Кожен із зазначених типів генераторів має переваги та недоліки.

Використання СГПМ довгі роки стримувалось великою вартістю та складною технологією виготовлення постійних магнітів.

Натепер значно поширюється. Цьому сприяє створення нового покоління постійних магнітів з високими техніко-економічними показниками, що мають високу коерцитивну силу та можливість її довго зберігати. Такі магніти дозволяють отримати в робочій зоні (повітряному зазорі) значення магнітної індукції до 0,8-0,9 Тл, що в деяких випадках навіть перевищує значення індукції, що отримується при електромагнітному збудженні.

### 2.3 Види постійних магнітів, що використовуються для ВЕУ, та засоби їх стабілізації

Магніт – тіло, що володіє власним магнітним полем. Слово походить від грецького *magnitis lithos* – магнетитовий камінь. Існують три основні види магнітів: постійні магніти, тимчасові магніти, електромагніти. Постійні магніти – найбільш звичні для використання магніти. Вони постійні в тому сенсі, що, будучи колись намагнічені, зберігають певний рівень залишкової намагніченості.

Різні види постійних магнітів мають різні характеристики або властивості, що відносяться до того, як легко вони розмагнічуються, наскільки вони сильні, як їх сила змінюється з температурою і т. ін. На використанні постійних магнітів, як джерел постійного магнітного поля, ґрунтується робота магнітоелектричних вимірювальних перетворювачів, поляризованих реле, герконів та інших пристроїв. В мікромашинах збудження за допомогою постійних магнітів практично повністю витіснило електромагнітне збудження.

Система з постійними магнітами – складне магнітне коло, в якому до постійного магніту можуть бути підключені магнітопроводи, полюсні наконечники, магнітні шунти, випрямлячі поля, магнітні екрани, кріпильні деталі та інші елементи.

Параметри магнітної системи значною мірою визначають параметри всього пристрою – його метрологічні характеристики, масу, габаритні розміри, вартість.

Тимчасові магніти – це магніти, які діють як постійні магніти тільки тоді, коли знаходяться в сильному магнітному полі, і втрачають свій магнетизм, коли зовнішнє магнітне поле зникає.

Електромагніти – це намотані на каркас витки проводу, зазвичай зі сталевим осердям, який діє як постійний магніт тільки тоді, коли по дроту тече струм. Сила і полярність магнітного поля, створюваного електромагнітом, обумовлені зміною величини і напрямку електричного струму, поточного по дроту.

При проектуванні системи з постійними магнітами необхідно спочатку вибрати матеріал, а потім визначити розміри постійного магніту та конфігурацію магнітної системи, які забезпечать отримання заданої магнітної індукції в робочому повітряному зазорі за умови найкращого використання властивостей матеріалу.

Ступінь використання цих властивостей можна оцінити за допомогою коефіцієнта використання матеріалу  $\sigma$ , який являє собою відношення магнітної енергії в повітряному проміжку до максимально можливої енергії магніту даного об'єму:

$$\sigma = \frac{B_p \cdot H_p \cdot V_p}{(BH)_{\max} \cdot V_m} \quad (1)$$

де  $B_p$  – магнітна індукція в повітряному проміжку, Тл;

$H_p$  – напруженість поля в повітряному проміжку, А/м;

$(BH)_{\max}$  – максимально можлива енергія, що відповідає ідеалізованому випадку роботи всього об'єму магніту, Дж/м<sup>3</sup>;

$V_p$  – об'єм робочого проміжку, м<sup>3</sup>;  $V_m$  – об'єм магніту, м<sup>3</sup>.

Важлива характеристика постійних магнітів – стабільність.

Стабільність постійних магнітів – це здатність підтримувати постійним значення магнітного потоку під час роботи протягом достатньо довгого часу. До зміни з плином часу магнітного потоку від постійних магнітів приводе дія зовнішніх умов, вплив інших магнітних полів, значні механічні навантаження, удари, температура, радіація, присутність сусідніх феромагнітних мас...

Розрізняють структурну та магнітну нестабільність.

*Структурна нестабільність* (структурне «старіння») пов'язана з кристалічною будовою, фазовими перетвореннями, зменшенням внутрішніх напруг. При появі структурної нестабільності магнітні властивості можуть бути відновлені лише регенерацією структури, наприклад повторною термічною обробкою матеріалу.

*Магнітна нестабільність* (магнітне «старіння») зумовлюється зміною магнітної доменної структури речовини, яка намагається досягти стійкої термодинамічної рівноваги як в часі (магнітне старіння), так і при зміні зовнішніх умов.

Магнітна нестабільність може бути як оборотною, так і необоротною. В разі повернення зовнішніх умов до початкових, коли магнітні властивості відновлюються, відбуваються оборотні зміни, але за наявності значного гістерезису (для магніто-твердих матеріалів) – необоротні. Якщо магнітна нестабільність оборотна, то для боротьби з нею необхідно повернути зовнішні умови до початкових показників, а якщо необоротна – необхідне повторне намагнічування.

Магнітне «старіння» визначається кривою розмагнічування, відносними розмірами магніту (положенням робочої точки) і зовнішніми умовами, в яких перебуває матеріал (температура, механічні напруги тощо). Магнітне старіння постійних магнітів залежно від виду матеріалу і положення робочої точки змінюється від десятих часток процента до кількох процентів за рік.

Для забезпечення сталості напруги в широкому діапазоні зміні навантаження і частоти обертання генераторів змінного струму, наприклад, ВЕС, з магнітоелектричним збудженням необхідно магніт періодично стабілізувати. Для

стабілізації магнітів, їх магнітний полів для цих генераторів застосовуються спеціальні методи різні за принципом дії та ефективністю.

*Методи магнітної стабілізації:*

1) Часткове розмагнічування магніту. Намагнічений магніт піддають дії змінного магнітного поля зі спадаючою до нуля амплітудою. В результаті такої обробки подальша зміна властивостей магніту у відомому діапазоні змін зовнішніх умов стає оборотною. При цьому магніт частково розмагнічується.

Дослідження показали, що в разі часткового розмагнічування необоротні зміни зменшуються не лише під впливом зовнішніх магнітних полів, а і під дією температури, вібрацій. При цьому також покращується структурна стабільність.

2) Крім часткового розмагнічування, магніти можна піддати термообробці і механічному впливу, коли до стабільності магніту ставляться особливо високі вимоги і коли можливі значні зміни зовнішніх умов.

Термообробка полягає в тому, що магніт після часткового розмагнічування 3-5 разів нагрівають і охолоджують до температури дещо вищої і дещо нижчої від очікуваної робочої. Особливо великі зміни спостерігаються при цьому після першого циклу, наступні цикли позначаються набагато менше. Механічні впливи також повторюють кілька разів, причому їх величина має перевищувати максимально можливу під час експлуатації.

Зміну властивостей стабілізованого магніту можуть викликати зміни зовнішніх умов (температури, напруженості поля, механічні впливи). Ці зміни можна оцінювати за допомогою відповідних коефіцієнтів, наприклад, температурного коефіцієнта магнітної індукції:

$$\alpha_B = \frac{\Delta B}{B \cdot \Delta t} \quad (3)$$

де  $B$  – магнітна індукція при початковій температурі  $t$ , Тл;

$\Delta B$  – зміна індукції, спричинена зміною температури на  $\Delta t$ , Тл;

$\Delta t$  – зміна температури, °С.

Так само можна оцінити зміну коерцитивної сили  $H_c$  та енергетичного добутку  $(BH)_{\max}$  тощо. Температурний коефіцієнт магнітної індукції  $\alpha_B$  залежить від хімічного складу та структури матеріалу, від розмірів магніту, від значення коефіцієнта розмагнічування, ступеню попереднього розмагнічування, початкова температура (і зміни температури  $\Delta t$ ).

Незважаючи на широкий вибір, жоден з існуючих магнітів не задовольняє

всім вимогам. Натепер найкращими для промислового використання в електричних машинах можна вважати магніти із сплавів на основі рідкоземельних металів хімічного складу  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ .

Вони мають високі магнітні властивості та дешевші за магніти самарій-кобальтової групи (Sm-Co). Висока коерцитивна сила дорівнює приблизно 1000 кА/м, а залишкова намагніченість – 1,1 Тл. За 10 років неодимовий магніт втрачає лише 1% своєї намагніченості, якщо температура його в умовах експлуатації не перевищує  $+80^\circ\text{C}$  (для деяких марок до  $+200^\circ\text{C}$ ), рис. 2.

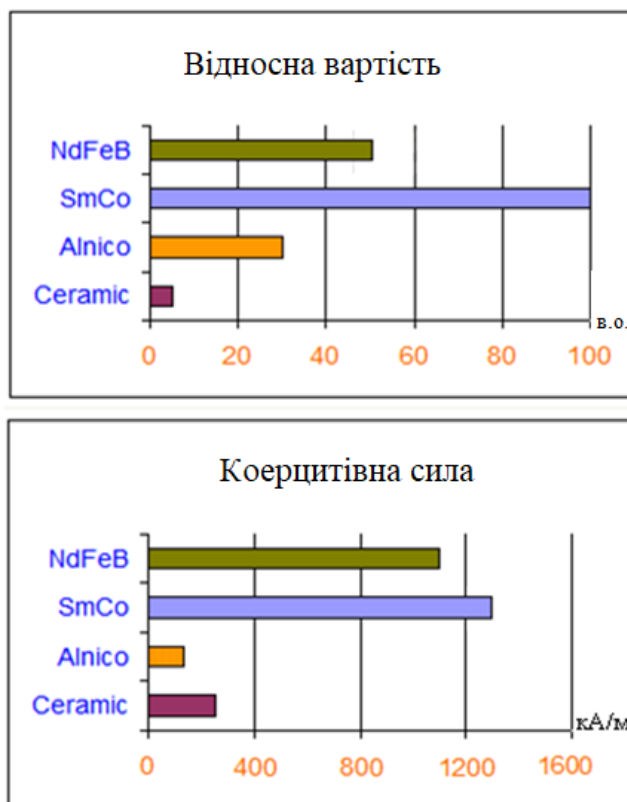


Рисунок 2 – Порівняльні характеристики постійних магнітів різних марок

Крім того, параметри матеріалів системи Nd-Fe-B ще не досягли теоретично встановленої межі, тому саме для них можна очікувати подальшого покращення властивостей. Через широке різноманіття марок неодимових магнітів виникає питання вибору оптимальної з них для конкретних умов експлуатації магнітних ловильних пристроїв. Градація магнітів сплаву Nd-Fe-B здійснюється за максимальним енергетичним добутком  $(BH)_{\max}$  та максимальною робочою температурою  $t$ .

Постійні магніти використовують достатньо широко: в магнітних носіях інформації, в поляризованих реле та в компасах, в мистецтві та в іграшках, для виробництва ювелірних виробів та

в викрутках, при обробці металобрухту для відділення магнітних металів (заліза, сталі та нікелю) від немагнітних (алюмінію, кольорових сплавів і т. ін.); в конструкціях безконтактних гальм.

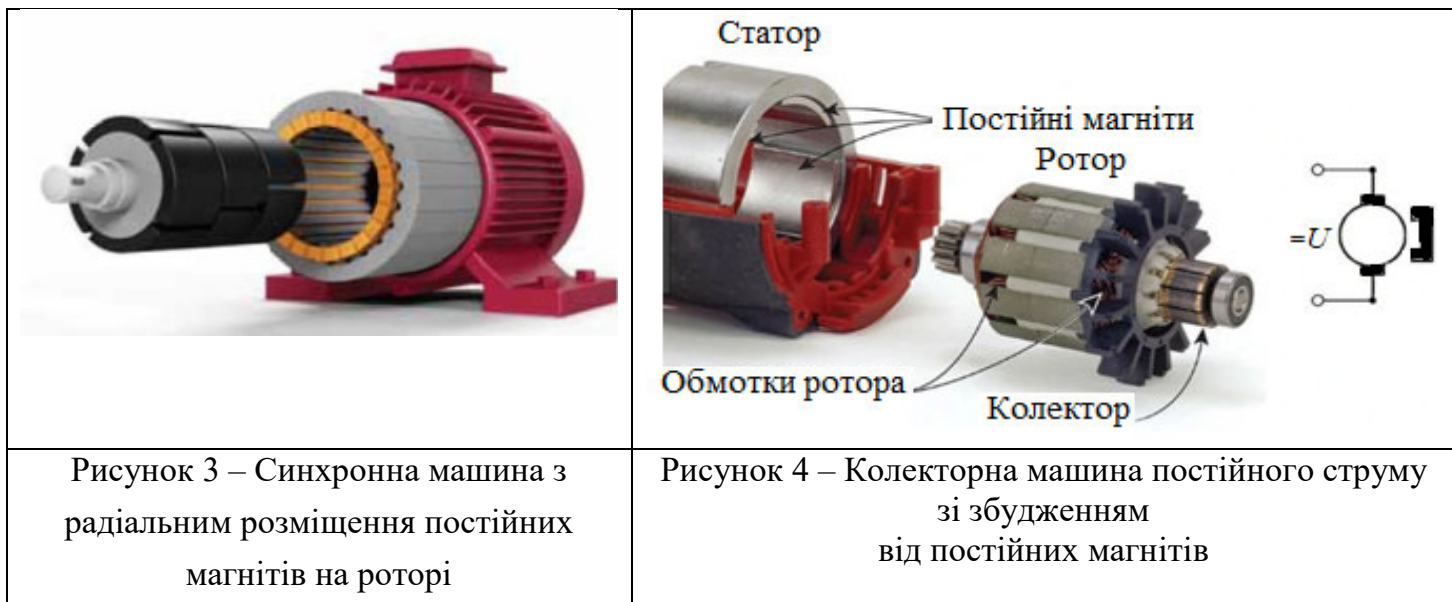
Сучасність розширює сферу використання постійних магнітів. Так, майже всі ВЕС потужністю 5-10 кВт використовують генератори зі збудженням від постійних магнітів. Причому, таке рішення мають ВЕС різних світових фірм-виро-



бників. Постійні магніти класу Nd-Fe-B в даний час є найбільш комерційно вигідними у виробництві. Вони випускаються різних розмірові и форм, щоб охопити широкий діапазон застосування.

#### 2.4 Машини малої потужності з постійними магнітами

Двигуни на постійних магнітах використовують рідше, ніж асинхронний варіант виконання. Для того, щоб оцінити можливості цього варіанту виконання, слід розглянути особливості конструкції, експлуатаційні якості і багато іншого, рис. 3 та рис. 4.



Електрична машина на постійних магнітах не сильно відрізняється по зовнішньому виду. Осердя статора і ротора виготовляється, як завжди, з електротехнічної сталі, найчастіше використовують стрижневу обмотка. Постійні магніти є частиною ротора. Вал ротора спирається на опорні підшипники.

Створюване постійними магнітами магнітне поле ротора вступає у взаємодію з круговим обертовим магнітним полем, що створюється ємнісним струмом в обмотці статора.

Стабілізацію і регулювання напруги можна здійснювати наступними основними способами:

- вибором і зміною внутрішніх параметрів генератора (параметричної стабілізацією), застосуванням магнітних шунтів, додаткових насиченням частин муздрамтеатру, застосуванням спеціальних стабілізуючих обмоток, механічним переміщенням частин муздрамтеатру відносно один одного;

- включенням зовнішніх стабілізуючих і регулюючих елементів (конденсаторів і дроселів насичення);
- включенням на виході генератора напівпровідникових ключів, що періодично розривають зовнішнє коло генератора або періодично закорочують його якірну обмотку;
- комбінованим збудженням від постійних магнітів і додаткових обмоток збудження (в цьому випадку класичний електромагнітний генератор перероджується в новий клас електричних машин – генератори комбінованого збудження;
- включенням на виході генератора стабілізованого по напрузі напівпровідникового статичного перетворювача.

*Модернізований генератор для ВЕУ на базі асинхронної машини з постійними магнітами*

Переробка АД – досить популярний метод виготовлення генератора для вітрогенератора. АД з малою кількістю полюсів розраховані на високі обороти, наприклад двохолюсні на 3000 об/хв, але для вітрогенераторів потрібні низькі обороти, з цього потрібно вибирати низько-швидкісні двигуни, на 8 і 6 полюсів, відповідно на 750 і 1000 об/хв. Двигуни на 2-4 полюса доводиться перемотувати, щоб зробити більше полюсів, це досить складно і витратно.

Зазвичай для виконання невеликих генераторів для ВЕС або міні-ГЕС за базову конструкцію приймають серійні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором серій АІР або 4А. Вся переробка двигуна в генератор полягає в установці на роторі неодимових магніти. Робиться це так:

- ротор проточується на товщину магнітів (наприклад, на 5 мм)4
- далі ротор ділиться на кілька секторів (наприклад, вісім) і на нього, як полюса, наклеюють магніти. Магніти підбираються невеликих розмірів.

Наприклад двигун АІР-112МВ-8 (3 кВт) має ротор діаметром 131 мм, а довжиною 130 мм. Довжина окружності ротора 408,2 мм; після проточки ротора на 5 мм довжина окружності ротора 376,8 мм. Ділимо на 8 полюсів і отримуємо ширину полюса 47,1 мм. Розмір магніту можна взяти стандартний, 30\*10\*5 мм, помістити їх по довжині ротора, що дорівнює 130 мм, по 4 магніта для одного полюса (4 магніти дадуть загальну довжину 120 мм) і між полюсами залишиться зазор в 7 мм. На ротор потрібно 32 магніта, рис. 5.



Рисунок 5 – Зразок переробленого ротора асинхронної машини.  
Вказано розміщення 32 постійних магнітів-пластин на роторі

Малопотужні асинхронні двигуни від 0,18 до 1 кВт без перемотування статора не підходять для вітро-генераторів, енергію звичайно давати будуть, але через великий опір обмоток струм генератора буде дуже малий. Наприклад 6-ти полюсний двигун потужністю 0.55 кВт має опір обмотки однієї фази 22 Ом, і при 600 об/хв потужність буде всього 69 Вт при 12 В, а при 48 В – близько 180 Вт.

## 2.5 Електричні генератори для міні-ГЕС

Гідроелектростанція – це електростанція, яка використовує енергію води. Для цього на річках будують водосховища і греблі.

Щоб ГЕС ефективно виробляла електроенергію, повинні бути 2 показники: значний ухил річки і забезпеченість водою на протязі цілого року. В цілому ідея гідроенергетики в світі є не новою і досить випробуваною. Але, скажімо, якщо взяти за приклад Австрію, там робота над розробкою та будівництвом ГЕС триває 6-10 років, будівництву передують роки розрахунків та досліджень, щоб максимально вписатися в природні умови, зменшити вплив на навколишнє середовище, врахувати всі можливості. Будівництво дамб і гребель, відбір значної кількості води в дериваційних ГЕС та те, що потім цю воду скидають під тиском в іншому місці, - все це може привести до порушення рівноваги і до того, що русло річки зміниться і почнуться зсувні і ерозійні процеси, які вже сьогодні є однією з найбільших проблем Карпат. Зрозуміло, що міні-ГЕС використовує енергію маленьких водойм, і їх вплив на природне середовище незначний.

В даний час в нашій країні в області електроенергетики, як вказувалось, є значні невирішені проблеми, які є загальними для всіх країн:

- 1) наростаюче забруднення навколишнього середовища, значне зростання населення;
  - 2) обмеженість паливних і мінеральних ресурсів;
  - 3) значні втрати електроенергії в процесі отримання, розподілу та споживання.
- Збільшення втрат електроенергії визначається також поганим технічним станом електромереж, недосконалими системи обліку. За оцінками фахівців втрати електроенергії у всіх мережах України складають 15-18%.

В Україні, де чітко виражені години пікового споживання електроенергії, відсутні розвинені лінії електропередачі, крім великих проблем з базовими потужностями, стало питання про їх недостатність. Тому для віддалених, малих за потужністю споживачів забезпечення електроенергією можливе тільки за рахунок автономних джерел енергії – дизельних електроустановок, сонце- і ВЕУ.

Сонячна енергетика для України має сенс для дуже невеликого географічного регіону і не весь календарний рік, а інші нетрадиційні способи отримання енергії: приливні станції, гейзерні, геотермальні і т. ін., – або не існують, або знаходяться в стадії перших розробок. Таким чином, на сьогоднішній день для України має сенс розглядати тільки вітроенергетику та малі (міні та мікро) ГЕС.

Електричні машини традиційного виконання не мають перспектив радикального поліпшення силових і економічних показників шляхом підвищення електромагнітних навантажень, принаймні, в діапазоні малих і середніх одиничних потужностей. Найбільшою мірою в даний час необхідні машини наступних значень потужності:

- 1) від 1 до 5 кВт для енергетичних установок індивідуального користування, що працюють від енергії вітру, сонця, і інших поновлюваних джерел енергії;
- 2) від 1 до 1000 кВт для мікро- і міні-ГЕС;
- 3) від 300 до 2000 кВт для автономних електростанцій для невеликих населених пунктів і для роботи в складі електроприводів з високими швидкостями;
- 4) від 500 до 10 тис. кВт – генератори для роботи з паровими і газовими турбінами для вирішення проблем міст з населенням в 20-100 тис. жителів;
- 5) від 16 до 320 МВт (турбогенератори з повітряним охолодженням) – для технічного переозброєння ТЕС і ТЕЦ.

Зростаючий попит на енергоносії і боротьба за екологічну безпеку змусили вчених шукати нові підходи до перетворення відновлюваної енергії води в електрику. Як вдалий варіант застосування міні-ГЕС для використання на річках зі швидкістю течії від 1 м/с пропонується конструкція малогабаритної плаваючої

на міні-понтоні малої електростанції. Ефективність міні-ГЕС вище, ніж ефективність інших альтернативних джерел. Але виникає питання: наскільки вона буде відчутна при використанні міні-ГЕС на рівнинних річках без споруди додаткових гідротехнічних споруд?

Для міні-ГЕС гідрогенератор складається з регульованого безколекторного генератора з постійними магнітами. Вони мають більший ККД у порівнянні з іншими міні-ГЕС - гідрогенераторами і здатна виробляти більше 1 кВт електроенергії. Гідрогенератори міні-ГЕС оснащують робочим колесом з шорсткою міді, універсальними гідравлічними насадками (настроюються розміри - від 3 мм до 25 мм). У комплект входить цифровий мультиметр для вимірювання сили струму на виході. Вся система міні-ГЕС - гідрогенератора виготовлена з нержавіючих сплавів, рис. 6.

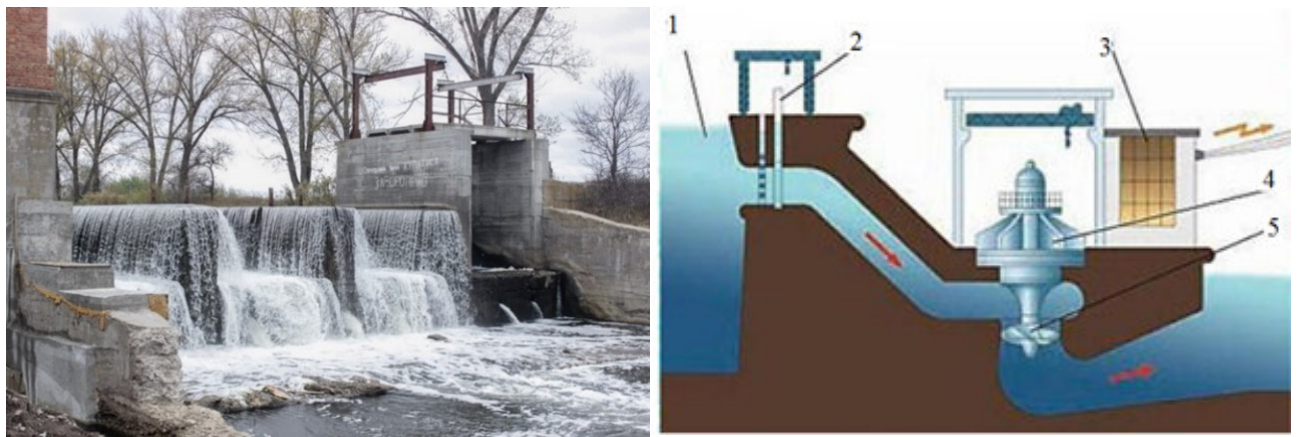


Рисунок 6 – Зовнішній вигляд і схема міні-ГЕС

1 – водосховище; 2 – затвор (шлюз); 3 – трансформаторна підстанція з розподільчим пристроєм; 4 – гідрогенератор; 5 – гідротурбіна

У Закарпатті прийняли програму з будівництва 330 міні-ГЕС. Побудувавши сотні ГЕС в гірських районах Закарпаття можна зменшити енергозалежність України. Але якщо ці плани все-таки виконають, це нашкодить туристичному потенціалу, рідкісним річковим зоо-видам та карпатським річкам. Будівництво міні-ГЕС, безсумнівно, буде мати вплив на біо-різноманіття. Постраждають і червонокнижні веснянка, і лосось дунайський, який знаходиться в Червоную книгу, і струмкова форель, що входять до переліку зникаючих видів, і хариус європейський, вид, що вписаний не лише в Червоную книгу України, а й визначено як уразливий у всій Європі.

Більшість із запланованих для будівництва ГЕС належать до так званого «дериваційних» (їх ще називають «прируслові»). Принцип їх роботи такий: воду з гірської річки скидають в трубу, через яку вона тече від кількох сотень метрів до кількох кілометрів, потім потрапляє на агрегат, розташований нижче за течією, крутить

турбіну, і потім її скидають назад в русло річки. При проектуванні цих гідроспоруд не надто зважають на рекреаційної привабливістю і навіть із заповідним статусом території. Вважається, що жодного негативного впливу ці споруди ні навколишньому середовищу, ні на рекреаційного потенціалу не принесуть.

Міні-ГЕС привабливі для підприємців-власників міні-ГЕС: якщо поррахувати витрати на виробництво одного кВт і не враховувати вище перелічених наслідків для природи і регіону, то гідроенергетика дійсно є одним з найдешевших способів виробництва енергії. А продавати цю енергію в мережу не по ринкової ціні, а за «зеленим» тарифом, який в кілька разів перевищує вартість одного кіловата для споживача.

Міні-ГЕС також вважається прекрасною альтернативою для централізованого енергопостачання в важкодоступних і віддалених районах. Під час використання міні - мікро-ГЕС, набагато легше вирішити проблему з перебоями електрики, а також зафіксувати ціну енергоресурсів на доступному для користувача рівні. Головними джерелами мікро-ГЕС є маленькі річки та струмки. Але є й інші джерела енергії для гідроелектростанції. Це системи водопідготовки, технологічні водостоки (наприклад, каналізаційні або промислові скиди), зрошувальні канали.

Ефективність міні-ГЕС вище, ніж ефективність інших альтернативних джерел, але на скільки вона буде відчутна при використанні міні-ГЕС на рівнинних річках без споруди додаткових гідротехнічних споруд не відомо. Для отримання великої кількості енергії потрібен суттєвий потік, як повітря, так і води. В умовах центральної України з цим погано. Але, тим не менше, розроблені міні-ГЕС, які здатні працювати на потоках води швидкістю 1,5-2 м/с. Для продуктивної експлуатації обладнання повинна бути достатня сила течії – будівництва допоміжних споруд пов'язано з додатковими витратами. Слід пам'ятати, що будівництво міні-ГЕС - суто індивідуальне будівництво окремих громадян або громад.

## **2.6 Економічні аспекти впровадження в енергомережі ВЕС та міні-ГЕС**

В останні роки в багатьох країнах досягли значних успіхів у підвищенні економічності будівництва ВЕС, надійності, терміну служби і в зниженні собівартості електроенергії. Якщо брати до уваги ще й екологічні фактори, то ВЕС вже сьогодні виявляється більш економічною, ніж електростанції на вугіллі і АЕС. Широкий спектр використання характерний для сучасних автономних ВЕУ. Крім забезпечення електроенергією різних автономних споживачів, вони застосовуються для вироблення тепла і механічної енергії, необхідних в різних сферах

промисловості, сільського господарства і життя суспільства. Для заохочення розробок і впровадження ВЕУ, уряди ряду країн (Швеція, Данія, Норвегія, Великобританія, Австрія) видають приватним фірмам великі субсидії, які доходять часом до 35-50% капітальних вкладень

Темпи створення ВЕУ в Україні відстають від темпів розвитку цього напрямку в інших розвинених країн. Це відбувається, перш за все, через відсутність дієвого господарського механізму, стимулюючого розвиток децентралізованої енергетики, невідповідності машинобудування до серійного випуску сучасного ефективного обладнання для таких установок. Негативний вплив справила також стратегія розвитку енергетики в 60-ті – 80-ті роки – орієнтація на будівництво великих електростанцій у зв'язку зі значним зростанням видобутку нафти і природного газу.

Вітроенергетична техніка в порівнянні з іншими джерелами енергії має очевидні переваги:

- відсутність витрат на видобуток і транспортування палива;
- низькі питомі трудовитрати на спорудження ВЕУ – ці витрати на порядок менше, ніж для теплових і атомних станцій;
- широкий технологічний діапазон прямого використання енергії ВЕУ (зокрема, автономність і робота в централізованих мережах, сумісність з іншими джерелами енергії);
- короткі терміни введення потужностей в експлуатацію;
- відсутність шкідливого впливу на навколишнє середовище (в цьому відношенні вітро-установки поступаються лише геліо-системам).

## **2.7 Роторні (ортогональні) вітроустановки**

Відмінні експлуатаційні та технічні характеристики ортогональних (роторних) вітроенергетичних установок (ВЕУ), оригінальний зовнішній вигляд, плавне безшумне обертання ротора, цікавий дизайн, екологічність і сучасність - все це свідчить про перспективність цього напрямку.

На ВЕУ "Махаон" з вертикальною віссю обертання використовуються низькообертовий генератори з збудженням від постійних магнітів NdFeB. На відміну від генераторів, що застосовуються на класичних гвинтових установках, номінальна швидкість обертання становить 200-300 об/хв. Тому при малих і середніх вітрах (від 3 до 7 м/с) ККД роторних установок "Махаон" значно вище, ніж гвинтових .

Вітродвигун (ротор) ВЕУ "Махаон" виготовляється з двома або трьома вертикальними крилами на кожному ярусі, і різними екранами. Генератор з мультиплікатором встановлюється вертикально на столі-опорі під ротором. Обертання передається від ротора на генератор безпосередньо або за допомогою мультиплікатора. Генератор однофазний, змінного струму зі збудженням від постійних магнітів, розташованих на роторі. Практично не вимагає обслуговування в процесі всього часу експлуатації. Розрахунковий термін експлуатації 15 років. Номінальна швидкість обертання генератора – 200-300 об/хв в залежності від потужності генератора. Генератор має низький момент строгування, практично рівний нулю, що дозволяє почати вироблення електроенергії при швидкості вітру 2,2 м/с. Опорно-монтажний стіл роторної ВЕУ дозволяє встановити її на даху будівлі, будь-який інший щоглі або стовпі без комплектування штатної щоглою.

Роторні ВЕУ абсолютно безшумні, мають порівняно малу швидкість обертання ротора (до 200 об/хв), працюють в широкому діапазоні вітрів (від 2 до 50 м/с), не бояться штормових вітрів, не вимагають орієнтації на вітер, здатні добре працювати при низовому або протяжному вітрі, тому не вимагають високого підйому ротора над землею.

Переваги роторних ВЕУ: не бояться різких короткочасних поривів вітру; не бояться снігопадів, обмерзання, відмінно працюють в умовах сніжної зими, навіть за умови налипання снігу на ротор і ефективно працює при малих швидкостях вітру (3-4 м/с); легко трюгається з місця при вітрі менше 1 м/с; ротор не стоїть на місці (в одній площині, як повітряний гвинт), а постійно йде від вітер, тому установки не бояться штормових вітрів і легко, без додаткових заходів безпеки, в тому числі конструктивних, використовуються в більш широкому діапазоні вітрів (від 2 до 50 м/с). З підвищенням швидкості вітру тільки збільшується стійкість (ефект дзиги або гіроскопа); модульність конструкції ротора дозволяє нарощувати необхідну потужність установки за рахунок кількості модулів; можливість монтажу установки на різних площах (дахи будівель, платформи, вишки, мобільні споруди (вагончики та ін.); повна безшумність при всіх режимах роботи; відсутність необхідності флюгерної системи, яка орієнтує гвинт на вітер, що дозволяє установці працювати при нестійких у напрямку вітрах, при різкій зміні напрямку вітру; порівняно мала швидкість обертання ротора (до 200 об/хв.) збільшує ресурс роботи підшипників, інтервал між мастилом рухомих поверхонь, загальний ресурс роботи; нерухомий, розміщений нижче ротора генератор



доступний для огляду і обслуговування практично завжди без зупинки і демонтажу установки; можливість "підстроювання" системи під конкретну місцевість з певною середньою швидкістю вітру, оскільки передача обертання від ротора на генератор здійснюється через мультиплікатор; можливість використання приземного низового вітру, а також протяжного - уздовж вулиць, будівель, враховуючи рельєф місцевості, рис. 7.



Рисунок 7 – Серійна одноярусна роторна установка потужністю 1 кВт на секційній щоглі

## 2.8 Порівняльна характеристика конструкції вітроелектростанцій

ВЕУ працюють спільно з акумуляторною батареєю. Батарея повинна складатися з акумуляторів (від 4 до 16, в залежності від потужності генератора і напруги на акумуляторної батареї). Для з'єднання акумуляторів в акумуляторної батареї використовуються спеціальні акумуляторні дроти великого перерізу з мідним дротом.

У роторних вітроприймальних конструкціях, як лопаті застосовують різні кривольінійні поверхні. При деяких перевагах (низький рівень шуму, широкий діапазон робочих вітрів, мала площа установки) дана конструкція має істотний недолік – низькі обороти (не більше 400 об/хв), тому поступається крильчатим ВЕУ.

Існуючі ВЕС можна розділити на дві основні групи в залежності від розташування осі обертання валу генератора: пропелерні – з горизонтальним розташуванням валу генератора (HAWT – Horizontal Axis Wind Turbines), та віндоторні з вертикальним розташуванням валу генератора (VAWT – Vertical Axis Wind Turbines), рис. 8.

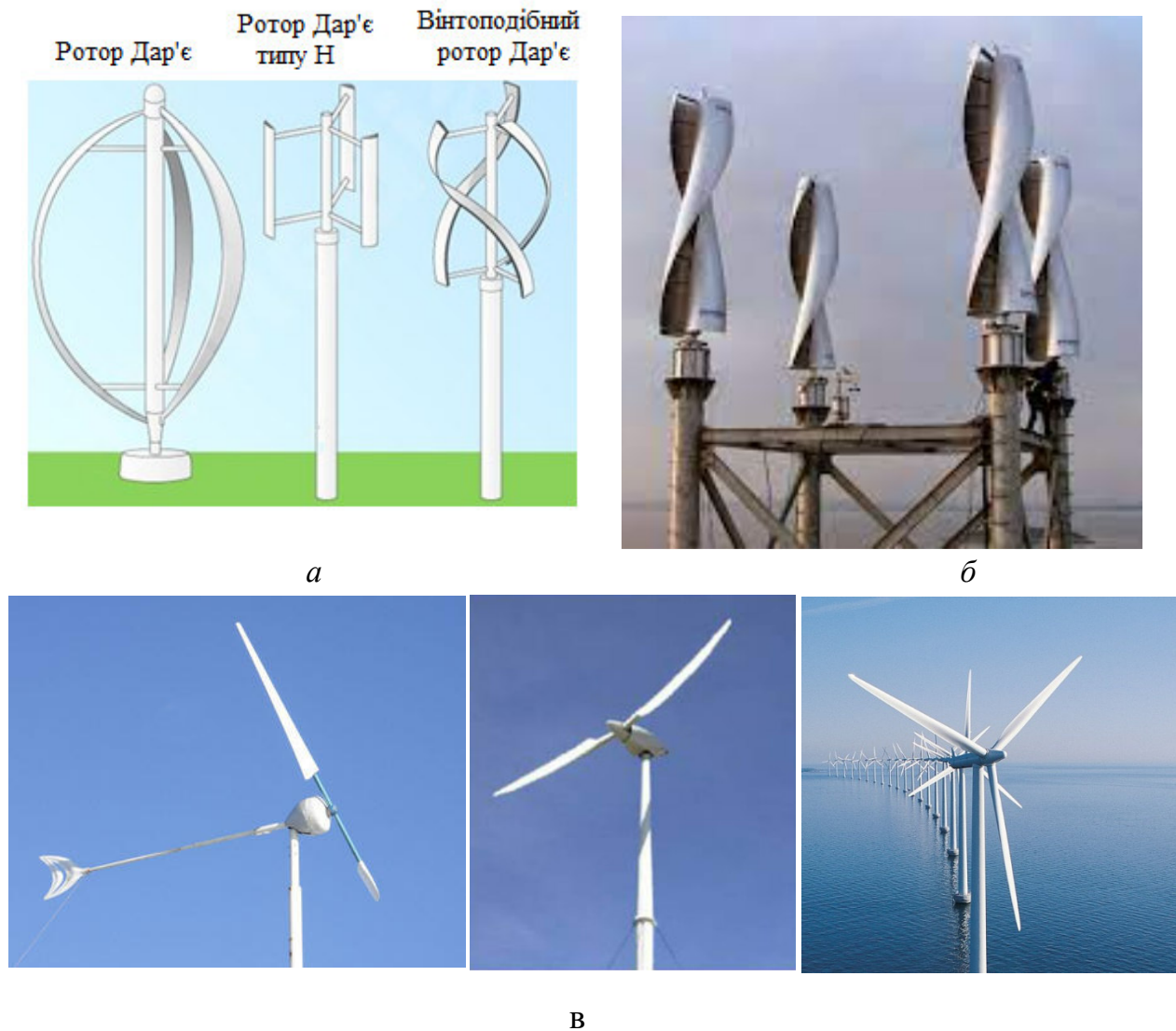


Рисунок 8 – Типи ВЕС в залежності від розташування осі обертання валу генератора

*а, б* - віндроторні з вертикальним розташуванням валу генератора;  
*в* – пропелерні одно-, дво- та трилопатева ВЕУ з горизонтальною віссю ротора

Історично склалося так, що пропелерні (HAWT) набули більш широкого поширення. Віндроторні станції (VAWT), теоретично перевершуючи по ряду економічних і технічних характеристик пропелерні ВЕС, до теперішнього часу просто не мали достатньо простого і економічно виправданого рішення конструкції. В даний час існують різні типи ВЕС з різними технічними і енергетичними характеристиками (вказані коефіцієнти використання енергії вітру).

Пропелерні ВЕУ мають 1,2 або 3 лопаті складної конструкції, дорогий редуктор, систему контролю і гальма. Відомо, що з вітру максимально можна отримати 59% кінетичної енергії, після чого рух повітря припиниться.

Перетворення кінетичної енергії вітру пропелерними станціями в механічну широко варіюється з ККД в межах від 10 до 30%, залежно від типу станції. Можна уточнити, що ці результати вірні тільки в тому випадку, якщо напрямок вітру перпендикулярно робочого профілю лопатей станції. При поривчастим і мінливому вітрі результати добування енергії вітру більш гнітючі, оскільки системи "наведення на вітер" є примітивними у вигляді хвоста і розташовані за робочою поверхнею пропелера, в "відпрацьованому" потоці повітря, а не у вступнику. Через неефективність навіть такого наведення на вітер багато сучасних вітростанції випускаються без системи "наведення" (у великих станціях "наведення на вітер" здійснюється за рахунок повороту лопатей пропелера спеціальним механізмом).

Механічна енергія пропелерних станцій перетворюється в електричну за ККД 50-69%, але пропелерні станції часто виходять з ладу через високо розташованого вітроагрегата, оскільки не проводиться щорічне обслуговування і заміна масла. Як результат – відносно висока вартість кВт·год електроенергії.

Основною перевагою конструкції вітростанції з вертикально розташованим валом є її незалежне "наведення на вітер". Необмежена швидкість обертання ротора дозволяє працювати з усіма зустрічаються вітрами, включаючи штормові. Незалежно від розмірів станції генератор, система управління та інше обладнання встановлюються на рівні землі.

Протягом року бувають періоди затишшя вітрової активності, особливо це характерно для літніх місяців. В цей час вітер з'являється короткочасно або може взагалі бути відсутнім кілька днів поспіль. Вирішення питання енергопостачання об'єкта знаходиться в залежності від добового, тижневого і місячного графіків вітрової активності. Якщо затишшя короткочасні, в межах до 6-8 годин, з подальшим появою вітру силою понад 5-6 м/с, резервним джерелом живлення може служити акумуляторна батарея. При тривалих періодах зниження швидкості вітру до 3-4 м/с або затишшя, коли за рахунок енергії вітру може бути забезпечене електропостачання тільки частини споживачів (потреби першої категорії), до складу системи електропостачання повинна вводитися дизельна/бензинова електростанція або проводитися включення в місцеву електромережу.

В 2020 році біля берегів Великобританії в Ірландському морі запустили найбільшу в світі плавучу вітряну електростанцію (ВЕС). Станція має 87 вітрогенераторів, загальна площа станції складає приблизно 20 тисяч футбольних полів. Її

потужність становить 659 МВт, що достатньо для забезпечення електроенергією майже 600 тисяч британських будинків. Там використовує два типи ВЕС: 40 Siemens Gamesa висотою 188 м, кожен з яких дозволяє генерувати 7 МВт, а також 47 генераторів МНІ Vestas висотою 195 метрів, які генерують 8 МВт кожен. Перша в світі плавуча електростанція запрацювала в жовтні 2017 року в 25 км від берегів Шотландії. Електростанція Nuwind потужністю 30 МВт використовується для подачі енергії в м. Пітерхед.

## 2.9 Перспективи розвитку вітчизняної електроенергетики

Внесок вугілля в світову генерацію електрики за тридцять років скоротиться з нинішніх 37% до 12%, а нафта практично перестане використовуватися для цих цілей. Частка природного газу, а також атомної та гідроенергетики зміниться мало. Швидше за все процес переходу на ВДЕ буде йти в Європі. Завдяки жорсткій політиці до 2050 року 92% електрики в ЄС будуть вироблятися на основі чистих джерел. У США і Китаї декарбонізація займе більше часу.

За прогнозом, до 2050 року попит на електроенергію зросте на 62%. Будівництво нових генеруючих потужностей потребує інвестицій в розмірі \$ 13,3 трлн. З них на енергію вітру доведеться \$ 5,3 трлн., а на енергію Сонця – \$ 4,2 трлн. Крім того, \$ 840 млрд. буде витрачено на розгортання систем зберігання енергії.

Незважаючи на бурхливе зростання ВДЕ, перспективи утримати глобальне зростання температур на рівні 2 °C залишаються неясними. З одного боку, траєкторія декарбонізації багатьох країн сумісна з цілями Паризької угоди, щонайменше, до 2030 року. Однак потім буде потрібно набагато більше зусиль по скороченню викидів парникових газів, включаючи розвиток атомної і водневої енергетики, а також систем уловлювання вуглекислого газу.

Напрямки розвитку електроенергетики носять явно виражений національний характер. Постає питання: чи розвивати теплову енергетику на органічному паливі, віддати перевагу атомній енергетиці, вкладати сили і кошти в розвиток екологічно чистої електроенергетики від поновлюваних джерел ...

Аналогічні проблеми є і в виборі напрямків розвитку генеруючого обладнання: підвищувати одиничну потужність генераторів, наприклад, до 1500 МВт, або віддати перевагу малим джерел енергії з метою їх безпосереднього наближення до споживача, проводити технічну реконструкцію встановленого на ТЕС

зношеного електрообладнання з використанням прийомів діагностики та подальшої реабілітації. І такі питання виникають в кожному секторі, пов'язаному з виробленням, розподілом і споживанням електроенергії. Єдине, що не викликає питання – це необхідність впровадження енергоресурсозбереження.

Енергоресурсозбереження – одна з найбільш серйозних проблем для національного виробника. Сьогодні на виробництво одиниці ВВП в Україні в середньому витрачається майже в 3 рази більше енергоресурсів, ніж в європейських країнах. Особливо це стосується енергоємних підприємств промислового комплексу. Інвестиції в енергоефективність повинні вести до скорочення витрат на енергію, зростання конкурентоспроможності, поліпшенню надійності постачання і зниження впливу на екологію. Незважаючи на явні переваги, програма енергоефективності в промисловості впроваджується досить важко через існування численних бар'єрів.

Експерти виділяють наступні перешкоди для впровадження сучасного енергозберігаючого обладнання:

- 1) відсутність механізмів фінансування для заміни або ремонту (реабілітації) електрообладнання;
- 2) відсутність механізмів підготовки кадрів, здатних не тільки експлуатувати нову техніку, але і вносити певний внесок в її створення і розвиток;
- 3) відсутність інформації про принципи підбору енергоефективного обладнання і про можливості його сервісного обслуговування.

Впровадження енергоефективних технологій на виробництві може дати до 30% скорочення витрат, забезпечити різке підвищення економічності галузі, забезпечити зниження шкідливих викидів і т. ін. Але досягнення відчутного ефекту від політики енергозбереження можливо лише при істотних структурних зрушеннях в створенні і використанні енергозберігаючих технологій по всьому ланцюжку «вироблення-передача-споживання електроенергії» у всіх галузях економіки і соціальної сфері.

Необхідно переглянути енергетичну політику, спираючись на зниження питомого енергоспоживання і на збільшення відрахувань на охорону навколишнього середовища. Питання сталого і безпечного розвитку енергетики нерозривно пов'язані з загальносвітовими, глобальними проблемами, такими, як зміна клімату, стійке або кризовий розвиток економіки, забезпечення нормальної життєдіяльності населення.

Необхідне посилення політики енергозбереження, оскільки майже третина всіх видобуваються енергоресурсів в даний час не використовується (втрачається), що призводить не тільки до економічного, а й до екологічного збитку.

Спільними і багато в чому стійкими є тільки два головних аспекти прогнозування розвитку енергетики, які визначають початкові умови прогнозування – це неодмінна збереження попиту на довгострокові стійкі джерела енергії та необхідність екологічної безпеки при її використанні.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Книга 1. Ветроэлектрогенераторы. – Харьков: Изд. Нац. аэрокосмический ун-т, 2003. – 324 с.
2. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Книга 2. Ветроэнергетика – Харьков: Изд. Национальный аэрокосмический ун-т, 2003. – 297 с.
3. Золотухін В.І., Лутаєв В.В. Водноенергетичні розрахунки при проектуванні ГЕС: Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2005. – 204 с.
4. Мілих В. І., Шавьолкін О. О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. / За ред. В. І. Мілих. – Київ: «Каравела», 2007. – 688 с.
5. Вовчак В., Тесленко О., Самченко О. Мала гідроенергетика України / Інститут проблем екології та енергозбереження. — К., 2018. — Т. І. Аналітичний огляд. — 181 с.
6. Davis S. Serious Microhydro: Water Power Solutions from the Experts Publisher: New Society Publishers. 2010. – 336 p. URL: <https://www.twirpx.com/file/1023003/>
7. Про внесення змін до Закону України "Про електроенергетику" щодо стимулювання виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5485-17#Text>
- 8 Принципи збалансованого розвитку гідроенергетики : Аналітичний документ / Г.К. Веремійчик, Р. Б. Гаврилюк, та ін. – Київ : Видавництво «Фенікс», 2018. – 20 с.
9. Шевченко В.В. Основы электроэнергетики: учеб. пособие / В. В. Шевченко; Нац. техн. ун-т "Харьков. политехн. ин-т". – Харьков: ФОП Панов А. М., 2019. – 338 с. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/42266>

## Допоміжна література

10. Мала гідроенергетика України. Аналітичний огляд. Том І. – Київ, 2018. – 181 с. URL: <https://energyukraine.org/wp-content/uploads/2018/05/Otchet-MGES1.pdf>
11. Ободовський О. Г., Рахматулліна Е. Р., Тимуляк Л. М. Коротка історія розвитку та сучасний стан малої гідроенергетики на рівнинних річках України. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 2016. – Т. 4 (43). – С. 94-106.

12. Шевченко В. В., Книш С.Ю., Занихайло Е.О. Економічне порівняння вітроенергетичних установок з різними типами електричних генераторів змінного струму // Харків: Харківський університет повітряних сил. – Системи обробки інформації, 2011, № 4(94). – С. 94–98. URL: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/8522>

### Інформаційні ресурси в Інтернеті

13. Малі ГЕС України. URL: [http://uk.wikipedia.org/wiki/Малі\\_ГЕС\\_України](http://uk.wikipedia.org/wiki/Малі_ГЕС_України)
14. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80>
15. Малая гидроэнергетика. URL: [https://www.twirpx.com/files/science/tek/hydro\\_small/](https://www.twirpx.com/files/science/tek/hydro_small/)
16. ТОП 7 самых мощных ВЭС Украины.  
URL: <https://getmarket.com.ua/ru/news/top-7-samyh-moshnyh-ves-ukrainy>
17. Стан і перспективи розвитку малої гідроенергетики, сонячної, вітрової та інших джерел поновлюваної енергії зарубіжних країн та України. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/4.-Stan-i-perspektyvy-rozvytkuPDE.pdf>
18. Davis S. (Editor). Serious Microhydro: Water Power Solutions from the Experts. URL: <https://www.twirpx.com/file/1023003/>
19. Родионов В.И. Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего. URL: <http://vetrogenerator.com.ua/base/book/>
20. Енергетична стратегія України на період до 2030 року: Схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071 від 24.07.2013 р. /Офіційний веб-сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості.  
URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>
21. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року / О. Дячук та ін. Київ: Вид-во ТОВ «Арт книга», 2017. – 88 с. URL: <http://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2017/03/Rozvitok-VDE-vUkrai--ni.pdf>
22. Вітрогенератори в питаннях і відповідях. <https://solarwind.in.ua/ua/a372263-vetrogeneratoru-voprosah-otvetah.html>
23. Проектування будівництва мікро, малих та міні ГЕС. URL: <https://mcl.kiev.ua/proektirovanie-stroitelstva-mikro-mini-i-malyh-ges/>
24. Стан і перспективи розвитку малої гідроенергетики, сонячної, вітрової та інших джерел поновлюваної енергії зарубіжних країн та України. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/4.-Stan-i-perspektyvy-rozvytkuPDE.pdf>
25. Українська гідроенергетика: перспективи розвитку: опубліковано 21.11.2019. URL: <https://sies.gov.ua/news/ukrayinska-gidroenergetika-perspektivi-rozvitku>

**ДОДАТОК А**

*Приклад оформлення титульного листа розрахункових завдань*

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»**

*Кафедра електричних машин*

**ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ГЕНЕРАТОРІВ ВЕС та міні-ГЕС**

Завдання з дисципліни

«ЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ ВЕС та міні-ГЕС»

студента 4 курсу групи \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (прізвище, ім'я, по-батькові студента)

Назва розділу	Дата виконання, оцінка, підпис викладача
1 Скласти відповіді на питання	
2 Виконати дослідження	

Харків 20\_\_ р.



## ЗМІСТ

ВСТУП .....	3
1 ЗАВДАННЯ .....	4
1.1 Скласти відповіді на питання .....	4
1.2 Виконати дослідження .....	4
2 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ .....	5
2.1 Проблеми та основні напрямки розвитку електроенергетики України ...	5
2.2 Вибір електричного генератора для малих вітроенергетичних установок	7
2.3 Види постійних магнітів, що використовуються для ВЕУ, та засоби їх стабілізації .....	12
2.4 Машини малої потужності з постійними магнітами .....	16
2.5 Електричні генератори для міні-ГЕС .....	18
2.6 Економічні аспекти впровадження в енергомережі ВЕС та міні-ГЕС	21
2.7 Роторні (ортогональні) вітроустановки .....	22
2.8 Порівняльна характеристика конструкції вітроелектростанцій .....	24
2.9 Перспективи розвитку вітчизняної електроенергетики .....	27
ЛІТЕРАТУРА .....	29
Інформаційні ресурси в Інтернеті .....	30
ДОДАТОК А. Приклад оформлення титульного листа розрахункового завдання .....	31

Навчальне видання

**ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ГЕНЕРАТОРІВ ВЕС та міні-ГЕС**

Контрольні питання, завдання і методичні вказівки  
з дисципліни

«ЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ ВЕС та міні-ГЕС»

для студентів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка  
і електромеханіка»

У к л а д а ч :

ШЕВЧЕНКО Валентина Володимирівна

Відповідальний за випуск проф. В.І. Мілих

Роботу до видання рекомендував проф. В.І. Мілих

В авторській редакції

План 2023 р., поз. 99

Підп. до друку 16.02.2023.

Гарнітура *Times New Roman*. Обсяг – 3,1 др. арк.

---

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2