

Міністерство науки і освіти України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем

Оптимізація потужностей генерування вітрових електростанцій в розподільних електричних мережах

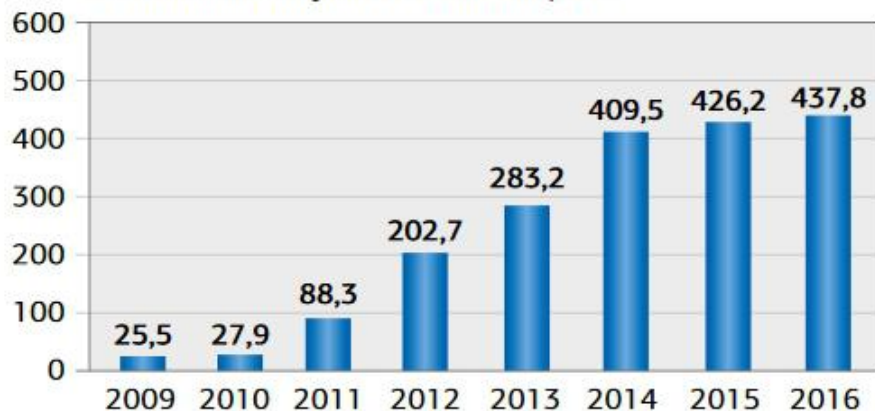
Виконав
ст. гр. 1ЕСМ-17м **Шуляк А.І.**

Науковий керівник
Леонт'єв Василь Олександрович
кандидат технічних наук, професор

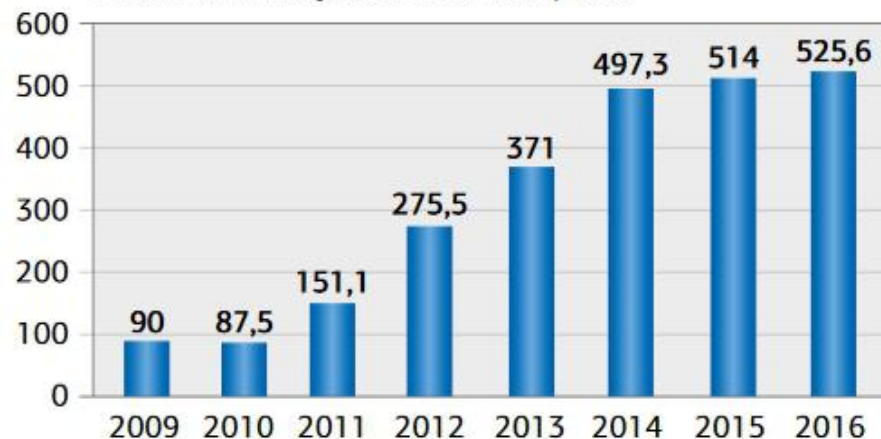
Вінниця 2019 рік

Динаміка розвитку вітроенергетичного сектору материкової частини України, 2009-2016

Встановлена потужність в МВт по роках



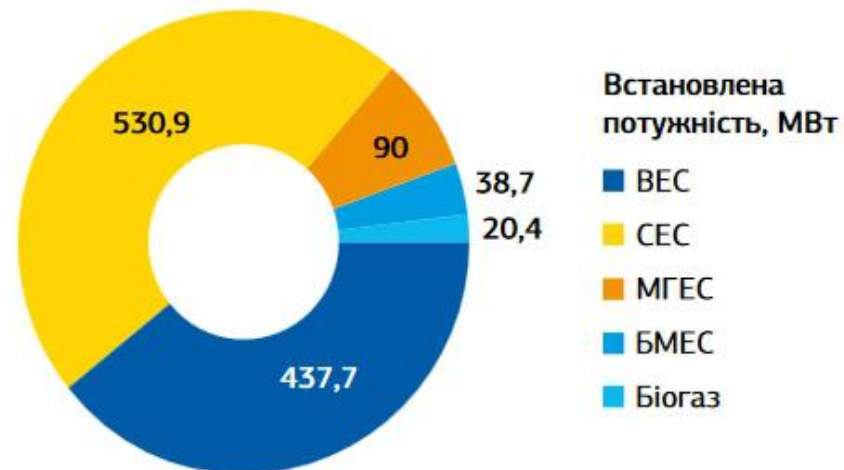
Встановлена потужність в МВт по роках



| ЕЛЕКТРО-СТАНЦІЯ | 2015 рік | | 2016 рік | |
|---------------------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|---|
| | Генерація електроенергії млн кВт·год | Частка в національному обсязі електрогенерації, % | Генерація електроенергії млн кВт·год | Частка в національному обсязі електрогенерації, % |
| ТЕС, ТЕЦ | 55 461,7 | 35,2 | 56 611,6 | 36,5 |
| АЕС | 87 627,5 | 55,6 | 80 950,0 | 52,3 |
| ГЕС, ГАЕС, з них ГЕС | 6 808,5 | 4,3 | 9 118,8 | 5,9 |
| ГАЕС | 5 234,9 | 3,3 | 7 484,8 | 4,8 |
| | 1 573,6 | 1 | 1 634,0 | 1,1 |
| ВДЕ (ВЕС, СЕС, біомаса) | 1 591,1 | 1 | 1 775,0 | 1,1 |
| Блок-станції та інші джерела | 6 176,4 | 3,9 | 6 576,8 | 4,2 |
| ВСЬОГО | 157 665,2 | 100 | 155 032,2 | 100 |

Структура потужностей відновлюваної енергетики материкової частини України, МВт, 2016

| ВДЕ | Встановлена потужність, МВт | | Введено в 2016 році |
|---------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|
| | на 31.12.2015 | на 31.12.2016 | |
| ВЕС | 426,125 | 437,725 | 11,6 |
| СЕС | 431,743 | 530,887 | 99,144 |
| МГЕС | 86,735 | 90,02 | 3,285 |
| БМЕС | 35,2 | 38,7 | 3,5 |
| Біогаз | 17,24 | 20,36 | 3,12 |
| ВСЬОГО | 997.043 | 1117,692 | 120,649 |



Якщо за підсумками 2015 року сукупна встановлена потужність всіх ВДЕ зросла заледве на **30 МВт**, то у 2016 році приріст встановленої потужності нововведених в експлуатацію електростанцій з ВДЕ сягає **120,649 МВт**, а сумарна загальна потужність всіх ВДЕ – **1117,692 МВт**. На кінець 2015 було **997,04 МВт**.

Мета роботи та основні задачі

Метою роботи є дослідження та оптимізація функціонування вітрових електростанцій для підвищення енергоефективності електричних мереж.

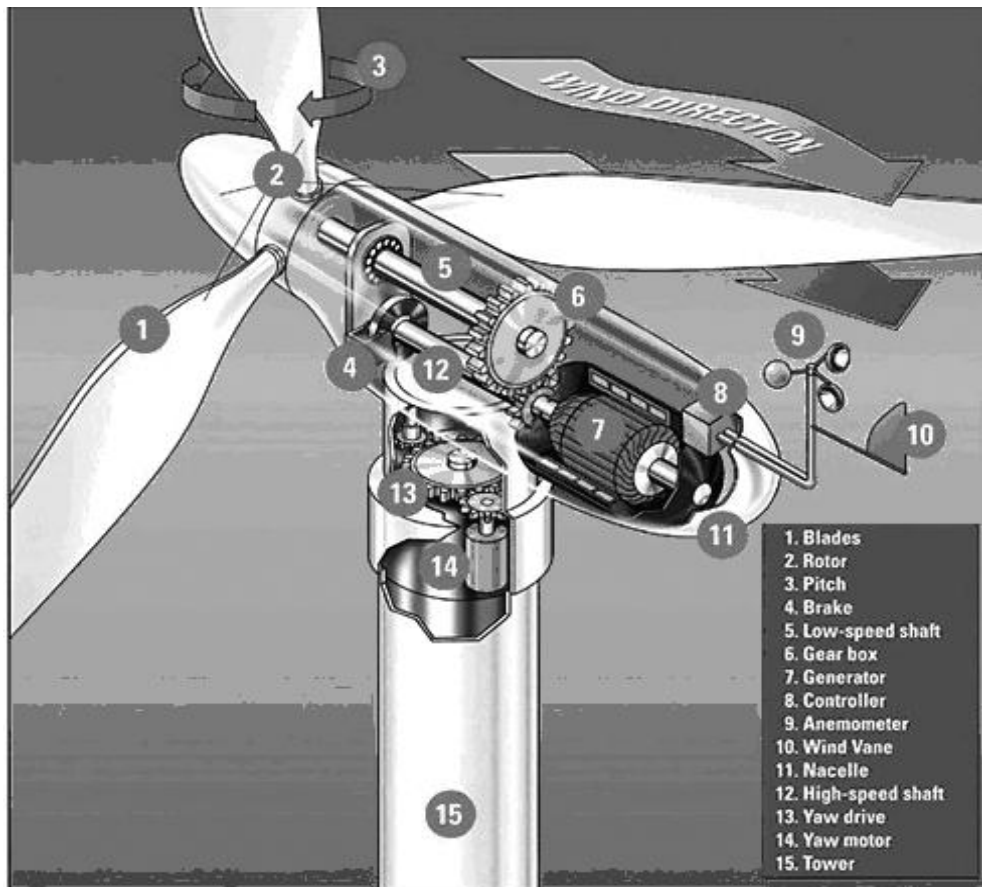
Об'єкт дослідження – процеси розвитку та функціонування електричних мереж з вітровими електростанціями.

Предмет дослідження – методи та засоби оцінювання режимів роботи електричних мереж.

Відповідно до вказаної мети в роботі вирішуються такі **основні задачі**:

- провести комплексний аналіз можливостей та особливостей інформаційного забезпечення задач побудови та розвитку інтегрованих ЕПС в умовах України;
- дослідити теоретичні основи та сформувані практичні підходи до визначення потужності, яка генерується відновлюваними джерелами енергії зокрема вітровими електростанціями;
- дослідити моделі і методи довгострокового прогнозування динаміки основних технічних і енергетичних параметрів ВЕУ.
- дослідження методів пошуку оптимальних місць під'єднання вітрових електростанцій до електричних мереж
- виконання практичних розрахунків, щодо оцінювання впливу генерування ВЕС на режимні параметри роботи ЕМ, зокрема втрати активної потужності.

Моделювання і прогнозування динаміки основних параметрів вітрових електричних установок



- 1 – Лопаті;
- 2 – Ротор;
- 3 – Пристрій управління потужністю;
- 4 – Вимикач;
- 5 – Вісь низької швидкості;
- 6 – Редуктор (коробка передач);
- 7 – Генератор;
- 8 – Контролер;
- 9 – Анемометр;
- 10 – Флюгер;
- 11 – Гондола;
- 12 – Вісь високої швидкості;
- 13 – Пристрій повороту;
- 14 – Мотор повороту;
- 15 – Вежа.

Рисунок – 5.1. Конструкція вітрової електричної установки:

Сьогодні більшість виробників ВЕУ віддає перевагу моделям з номінальною потужністю 3 МВт з діаметром ротора до 120 м. Установки номінальною потужністю 5 МВт і вище вже розробляє і виробляє ряд компаній

Таблиця 6.1 – Надпотужні моделі ВЕУ

| № | Виробник | Модель ВЕУ | Номінальна потужність, МВт | Діаметр ротора, м |
|----|--------------------|------------------------|----------------------------|-------------------|
| 1 | Enercon | E126 | 7.5 | 126 |
| 2 | Gamesa | G14X-7MW | 7.0 | 140 |
| 3 | Samsung | S7.9-171 | 7.0 | 171 |
| 4 | Mitsubishi | SeaAngel 7MW | 7.0 | 165 |
| 5 | Vestas | V164 | 7.0 | 164 |
| 6 | MingYang | MingYang SCD 6.5 MW | 6.5 | 140 |
| 7 | Senvion | 6.2MW/126 | 6.2 | 126 |
| 8 | Nordex | N150 | 6.0 | 150 |
| 9 | REpower | REpower 6MW | 6.0 | 126 |
| 10 | Siemens | SWT-6.0-154 | 6.0 | 154 |
| 11 | Senvion | 5MW | 5.1 | 126 |
| 12 | Arera Multibrid | Multibrid M5000-135 | 5.0 | 135 |

На продуктивність ВЕУ впливають, головним чином, такі параметри щодо вищезазначених комплектуючих:

- номінальна потужність генератора;
- висота вежі;
- довжина лопаті/діаметр ротора;
- складові ваги ВЕУ;
- спосіб перетворення енергії (редукторний/ без редукторний);
- спосіб керування потужністю (активний/пасивний).

Таблиця 6.1 – Деякі наслідки збільшення розмірів ВЕУ

| | | | |
|-------------------------------------|----|-----|------|
| Відносна номінальна потужність | 1 | 3 | 9 |
| Швидкість обертання ротора, об/хв. | 40 | 20 | 10 |
| Відносна швидкість обертання ротора | 1 | 0.5 | 0.25 |
| Відносний обертаючий момент ротора | 1 | 6 | 36 |

З цієї таблиці випливає, що обертаючий момент ротора має суттєво зростати з ростом номінальної потужності ВЕУ

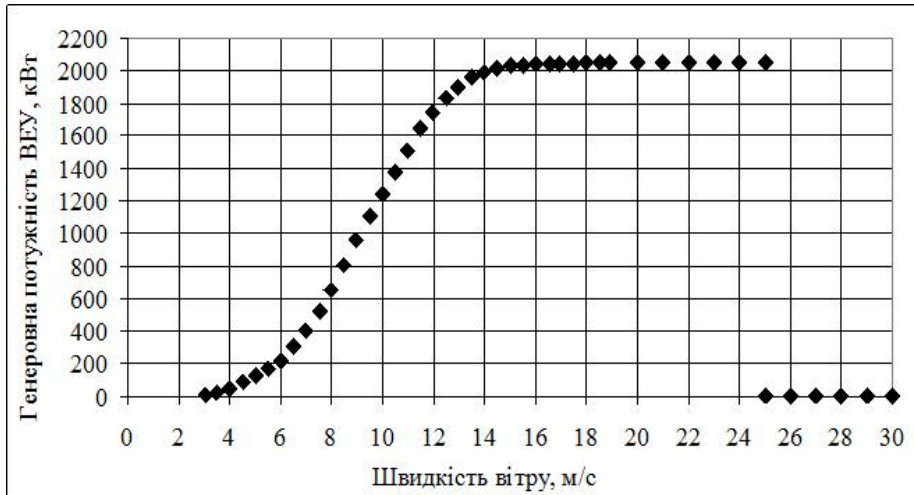


Рисунок 7.1 - Приклад графіка характеристики потужності ВЕУ з пасивною системою керування потужністю

Для керування потужністю ВЕУ з метою запобігання її руйнуванню за умови суттєвого збільшення швидкості вітру, в конструкції ВЕУ передбачено відповідну систему, що тим або іншим чином позбавляє ВЕУ від “зайвої” потужності.

На ранніх етапах розвитку вітроенергетики єдиною системою керування потужністю була система пасивного керування (stall control). Кут нахилу лопатей ВЕУ в цій системі зафіксовано, й вони не можуть бути повернені уздовж поздовжніх осей. Аеродинамічний профіль і кут нахилу лопаті обрані так, що для вітрів зі швидкостями, вищими швидкості виходу ВЕУ на номінальну потужність, повітряний потік навкруг профілю лопаті відділяється від поверхні лопаті.

Система активного керування потужністю (pitch control) з певного моменту, коли генерована потужність ВЕУ наближається до номінальної, починає отримувати сигнали від генератора щодо рівня генерованої потужності. У той момент, коли генерована потужність співпадає з номінальною, система керування починає обертати лопаті навкруг їх поздовжніх осей так, щоб кути атаки повітряних потоків зменшувались, а з ними зменшувалась й генерована потужність. Використання системи активного керування потужністю стало можливим завдяки прогресу мікрокомп’ютерної техніки.

Приклад графіка характеристики потужності ВЕУ з активною системою керування потужністю приведено на рис. 2.3.

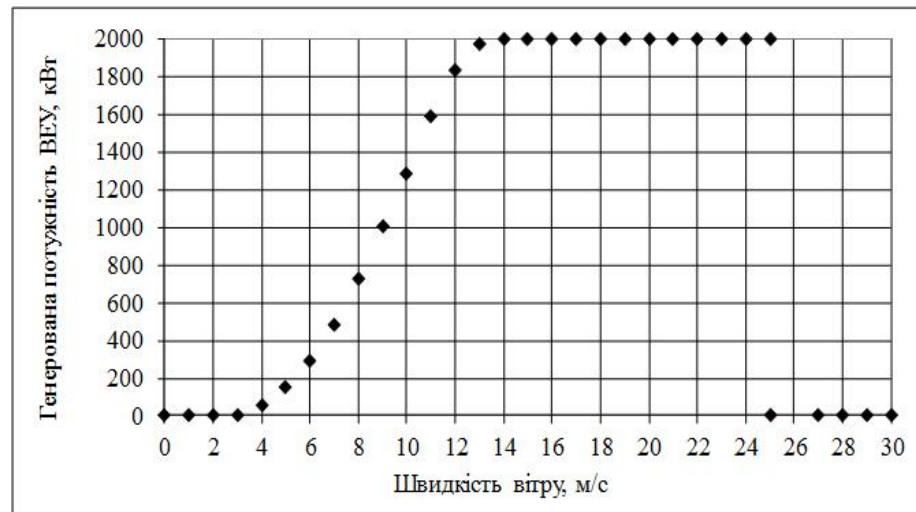


Рисунок 7.2 Приклад графіка характеристики потужності ВЕУ з активною системою керування потужністю

Кількісний аналіз і моделі прогнозу технічних параметрів ВЕУ

Базовим технічним параметром ВЕУ є її номінальна потужність. На рис. 2.4. подано графік світової динаміки показників середньої номінальної потужності ВЕУ, що встановлюються на наземних вітрових електростанціях

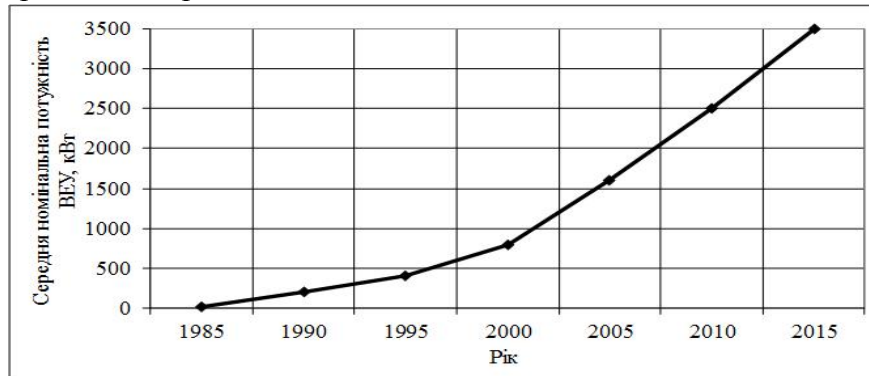


Рисунок 8.1. – Світова динаміка середньої номінальної потужності наземних ВЕУ

Для довгострокового прогнозування параметрів технічних пристроїв в літературі рекомендовано використовувати математичні моделі сигмоїдного типу

$$P(t) = ae^{-e^{b-ct}} \quad (8.1)$$

де t – центроване значення року (0 відповідає 1985-му року); $P(t)$ – середня номінальна потужність ВЕУ, що вводяться в експлуатацію в t -му році, a, b, c – параметри моделі.

Параметр a являє собою горизонтальну асимптоту функції (2.1), тобто є граничним значенням потужності, яку може генерувати ВЕУ.

$$a_0 = P^L;$$

P^L – оцінка граничної номінальної потужності ВЕУ в майбутньому, визначена, наприклад, експертним шляхом.

Для відшукування значень параметрів моделі Гомпертца (8.1) доцільно, перш за все, застосувати метод лінеаризації, а саме:

$$\ln(P) = \ln a - e^{b-ct} \quad \mathbf{a} \quad \ln\left(\frac{a}{P}\right) = e^{b-ct} \quad \mathbf{a} \quad \ln \ln\left(\frac{a}{P}\right) = b - ct; \quad (8.2)$$

Виходячи з аналізу рівняння (8.2), пропонується алгоритм відшукування числових значень параметрів моделі Гомпертца, що базується на комбінації методу лінеаризації, методу спуску за групами змінних і лінійного методу найменших квадратів.

- 1) Фіксація початкового значення параметру a_0 за формулою
- 2) Виконання перетворень:

$$y_i = \ln \ln\left(\frac{a_0}{P_i}\right), t = 1, \dots, T;$$

$$x_i = -t, t = 1, \dots, T;$$

- де T – кількість років ретроспективних спостережень.
- 3) Відшукування лінійним методом найменших квадратів оцінок параметрів рівняння регресії:

$$y = b + cx;$$

а саме:

$$c = \frac{T \sum_{t=1}^T x_i y_i - \sum_{t=1}^T x_i \sum_{t=1}^T y_i}{T \sum_{t=1}^T x_i^2 - \left(\sum_{t=1}^T x_i \right)^2} \quad \bar{x} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T y_i$$

$$b = \bar{y} - c\bar{x};$$

- 4) Уточнення значення параметру a за методом найменших квадратів за формулою:

$$a' = \frac{\sum_{i=1}^T P_i e^{-e^{b'-c't}}}{\sum_{i=1}^T P_i e^{-2e^{b'-c't}}}$$

- 5) Після цього повторюється процедура уточнення параметрів b і c і так до повної стабілізації значень параметрів:

$$P(t) = 17000e^{-e^{1.7721-0.04541t}} \quad (8.3)$$

Таблиця 9.1 – Результати математичного моделювання динаміки середньої номінальної потужності введених в експлуатацію наземних ВЕУ за моделлю Гомпертца

| Рік | Центрований рік | Фактичне значення потужності ВЕУ, кВт | Розраховане значення потужності ВЕУ, кВт | Відносна похибка, % |
|-------------------|-----------------|---------------------------------------|--|---------------------|
| 1985 | 0 | 20 | 47 | 136.8 |
| 1990 | 5 | 200 | 155 | 22.5 |
| 1995 | 10 | 400 | 399 | 0.2 |
| 2000 | 15 | 800 | 850 | 6.3 |
| 2005 | 20 | 1600 | 1555 | 2.8 |
| 2010 | 25 | 2500 | 2517 | 0.7 |
| 2015 | 30 | 3500 | 3699 | 5.7 |
| Середнє за період | | | | |
| 1985-2015 рр. | | | | 25.0 |
| 1990-2015 рр. | | | | 6.4 |
| 1995-2015 рр. | | | | 3.1 |

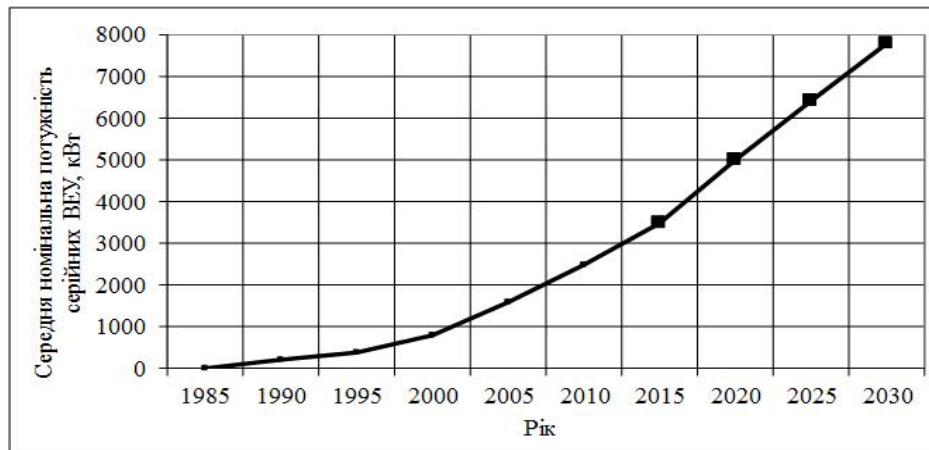


Рисунок 9.1 – Спостережені і прогнозні значення середньої світової номінальної потужності введених в експлуатацію наземних ВЕУ

Розраховані значення індексу “маса верхівки/площа обмаху ротора”, запропонованого німецьким дослідником П. Моллі. Цей показник (надалі – індекс Моллі) нижче буде використано для прогнозування маси верхівки ВЕУ. На рис. 9.2. подано залежності діаметра ротора від номінальної потужності ВЕУ. Для математичного моделювання даної залежності використано ступеневу модель. Оцінки параметрів даної моделі розраховано методом найменших квадратів:

$$D(P) = 2.2303P^{0.4719}$$

де D – діаметр ротора ВЕУ.



Рисунок 9.2 – Залежність діаметра ротора від потужності ВЕУ

Таблиця 9.2 – Зведені результати прогнозних розрахунків основних технічних параметрів ВЕУ (серійне виробництво):

| Рік | Прогнозна середня номінальна потужність ВЕУ, кВт | Діаметр ротора, м | Площа обмаху ротора, м ² | Маса верхівки ВЕУ, т | Висота осі ротора, м |
|------|--|-------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 2015 | 3500 | 105 | 8639 | 190 | 99 |
| 2020 | 5030 | 124 | 12166 | 268 | 112 |
| 2025 | 6428 | 140 | 15334 | 337 | 123 |
| 2030 | 7820 | 153 | 18450 | 406 | 132 |

Якщо вимірювання швидкості вітру здійснювались на висоті встановлення анемометрів, то для висоти передбачуваної установки вітротурбіни швидкість вітру може бути перерахована на підставі залежності

$$V = V_a \left(\frac{h}{h_a} \right)^m$$

m – показник, який залежить від характеру підстилаючої поверхні та пори року

h – висота передбачуваної установки вітротурбіни, м;

h_a – висота встановлення анемометра, м;

Потужність, що розвивається вітроколесом, при швидкості вітру до 20 м/с визначається у такий спосіб

$$P_{BK} = \rho \frac{F}{2} V^3 \xi$$

$\rho = \frac{P_{ат}}{R_c T}$ – щільність повітря, кг/м² (що має місце при температурі

повітря 15 °С й атмосферному тиску 760 мм рт.ст.);

F – площа, що обмітається лопатями вітроколеса, м²;

V – швидкість вітру, м/с;

ξ – коефіцієнт використання енергії вітру, в.о.

Вітроколесо перетворює у механічну енергію лише частину повної енергії потоку вітру. Коефіцієнтом використання енергії вітру ξ називають співвідношення енергії, яка була прийнята вітроколесом, до повної енергії, яку несе у собі повітряний потік. Для визначення цього показника запропоновано різні залежності. Існують також пропозиції щодо розрахунку коефіцієнту використання вітру у функції параметра, що визначається швидкістю вітру та частотою обертання ротора (кутовою швидкістю) – коефіцієнт швидкохідності вітротурбіни.

Залежність потужності вітрової турбіни від швидкості вітру наведено на рис. 10.1а. Принципово можлива робота вітрогенератора у двох режимах: із постійною та змінною частотами обертання

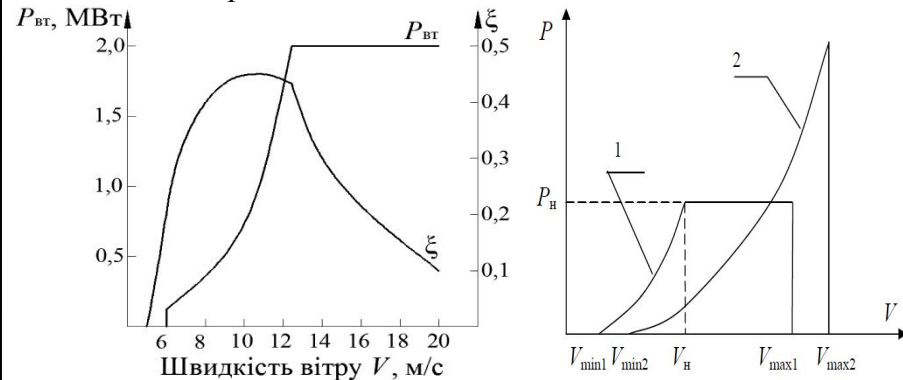


Рисунок 10.1 – Залежність потужності вітрової турбіни від швидкості вітру

1 – з аеродинамічним регулюванням; 2 – без аеродинамічного регулювання; V_{min} – мінімальна чи пускова швидкість вітру; V_n – номінальна розрахункова швидкість вітру для ВЕС з аеродинамічним регулюванням; V_{max} – максимально можлива (бурова) швидкість вітру.

Потужність на виході ВЕС визначатиметься таким чином:

$$P_{ВЕС} = P_{BK} \eta_p \eta_r \eta_{\text{вип}} \eta_{\text{інв}} = \rho \frac{F}{2} V^3 \xi \eta_p \eta_r \eta_{\text{вип}} \eta_{\text{інв}} = \rho \frac{F}{2} V^3 \xi \eta_p \eta_r \eta_{\text{пер}}$$

де η_p – ККД підвищуючого редуктора знаходиться на рівні 0,93–0,95, η_r – ККД вітрогенератора, допустимо приймати близьким до значення 0,87–0,9 [86] практично у всіх режимах роботи ВЕС, $\eta_{\text{вип}}$ – ККД випрямляча для режиму нормальних навантажень знаходиться у межах 0,93–0,95, $\eta_{\text{інв}}$ – ККД інвертору, можна вважати рівним 0,87–0,98, $\eta_{\text{пер}}$ – ККД перетворювального блоку, можна прийняти рівним 0,81–0,93, ξ – коефіцієнт використання енергії вітру, що використовується при розрахунку потужності, що розвивається вітроколесом P_{BK} , приймаємо 0,3–0,35.

Виконання проектних розрахунків на прикладі схеми електричної мережі 110-750 кВ Південно-Західної електроенергетичної системи

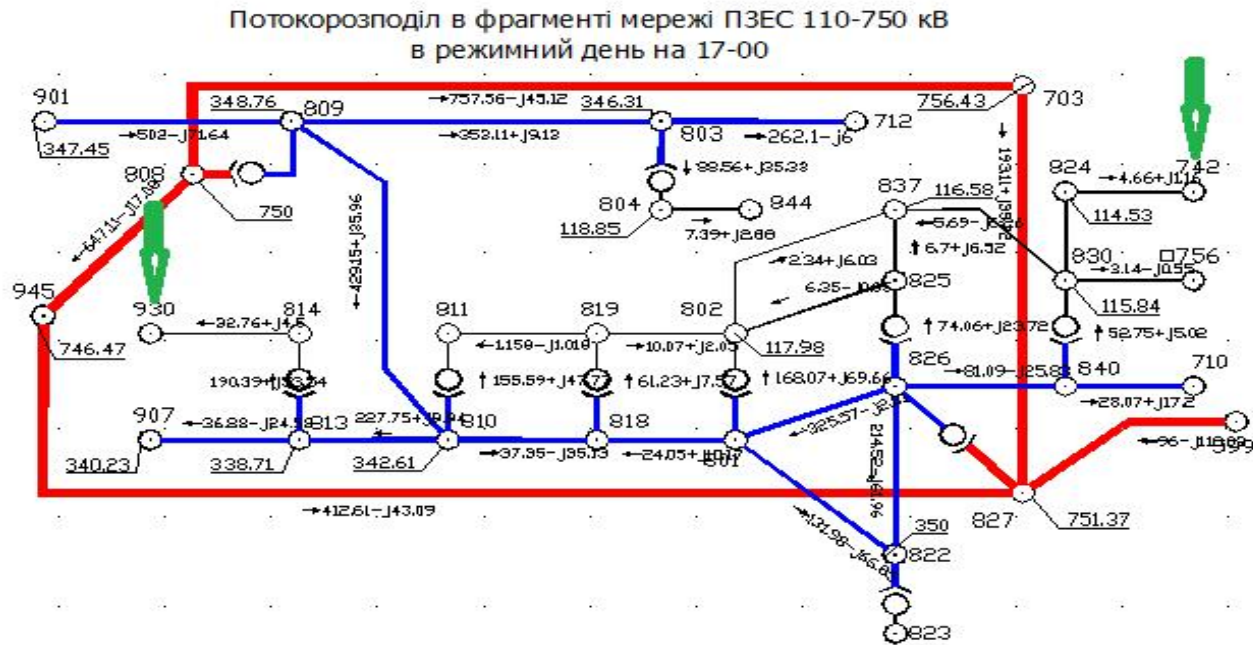


Рисунок 11.1 – Фрагмент схеми Південно-Західної енергетичної системи з виділеними вузлами можливого приєднання

Потужність генерування ВЕС для вузла Н. Бердичів (742 вузол на схемі) та Радивилів (930 вузол на схемі) становить 8,53 МВт та 34,8 МВт відповідно, та загальні втрати в енергосистемі становлять: $P=38.6$ МВт та після підєдання 36.01 МВт.

В магістерській роботі було наведено вирішення актуального завдання визначення потенційних можливостей електричних систем України, щодо приєднання РДЕ, зокрема вітрових електростанцій. З точки зору зменшення втрат активної потужності в електричних мережах, було розроблено метод пошуку оптимальних місць під'єднання та потужностей ВДЕ.

1. Проведено комплексний аналіз можливостей та особливостей інформаційного забезпечення задач побудови та розвитку інтегрованих ЕПС в умовах України;
2. Досліджено теоретичні основи та сформувані практичні підходи до визначення потужності, яка генерується відновлюваними джерелами енергії зокрема вітровими електростанціями;
3. Досліджено моделі і методи довгострокового прогнозування динаміки основних технічних і енергетичних параметрів ВЕУ.
4. Проведено практичні розрахунки, щодо оцінювання впливу генерування ВЕС на режимні параметри роботи ЕМ, зокрема втрати активної потужності.
5. В розділі охорони праці було розглянуто аудиторію в якій проводилися дослідження. Перераховано небезпечні фактори, які впливають на дослідника. Досліджено безпеку роботи електричних мереж в умовах дії загрозливих чинників навколишнього середовища.

Дякую за увагу!