

Міністерство освіти і науки України  
Поліський Національний Університет

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра Агроінженерія

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

**УДК 621.311.245:631.3**

Павлишин Олександр Олександрович

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Сучасна вітроелектро установка для сільськогосподарських фермерів

АІ-19 маг. Агроінженерія

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістра

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Павлишин О. О.

Керівник роботи

Грабар Іван Григорович

докт. техн. наук, проф.

Житомир – 2020

## Анотація

Павлишин О. О. Сучасна вітроелектро установка для сільсько-господарських фермерів. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю (AI-19маг Агроінженерія). Поліський національний університет, Житомир, 2020.

В даній роботі ми провели теоретичний огляд будови та режиму роботи автономних вітроенергетичних установок, а саме дослідили основні типи генераторів у таких установках, розглянули різні режими роботи вітрових турбін, проаналізували їх головні енергетичні характеристики. Нами було також досліджено основні практичні аспекти системи керування та транспортування електричної енергії до сільськогосподарських угідь.

За результатами проведеного теоретичного огляду та аналізу літератури з теми дослідження, ми також провели практичний аналіз з відповідними математичними обрахунками щодо можливостей використання моделі вітрової турбіни в сільському господарстві. Так, в єдності з дослідженням вітрових потоків на території України, ми розробили модель вітрового потоку, вітроколеса, електрогенератора, а на їх основі визначили оптимальні робочі координати неповного навантаження вітрогенератора.

Основними практичними результатами нашого дослідження є розрахунок економічної ефективності переходу сільських господарств на вітрову енергетику.

**Ключові слова:** вітроенергетична установка, вітрова турбіна, вітрогенератор, вітровий потік, сільське господарство, фермер.

## **Annotation**

Pavlyshyn O.O. Modern wind power plant for agricultural farmers. - Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualification work for a master's degree in specialty (AI-19mag.Agroengineering). - Polish National University, Zhytomyr, 2020.

In this paper, we conducted the theoretical survey of structure and the mode of operation of autonomous wind turbines, namely, we investigated the main types of generators in such wind turbines, considered different modes of operation of wind turbines, analyzed their main energy characteristics. We also studied the main aspects of the system of management and transportation of electricity to agricultural land.

Based on the results of the theoretical review and analysis of the literature on the research topics, we also conducted a practical analysis with relevant mathematical calculations on the possible use of wind turbine models in agriculture. Thus, in unity with the study of wind flows in Ukraine, we have developed a model of wind flow, windmill, electric generator. On their basis, we identified the optimal working coordinates of partial load of the wind generator.

The main practical results of this paper is the calculation of the economic efficiency of the transition of agriculture to wind energy.

Key words: wind power plant, wind turbine, wind generator, wind flow, agriculture, farmer.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
Розділ 1. Будова та режими роботи автономних вітроенергетичних установок	10
1.1 Основні типи автономних вітрових генераторів.....	10
1.2. Режими роботи вітрових турбін.....	12
1.3 Головні енергетичні характеристики ВЕУ.....	13
1.4 Системи керування та транспортування електричної енергії до сільсько – господарських угідь.....	14
Розділ 2. Загальна структура моделі вітрової турбіни та її адаптація для використання в сільському господарстві.....	17
2.1 Моделювання вітрового потоку.....	17
2.2. Моделювання вітроколеса.....	20
2.3 Моделювання електрогенератора.....	22
2.4 Визначення оптимальних робочих координат неповного навантаження вітрогенератора.....	24
2.5 Визначення потреб сільських господарств на електроенергію.....	26
2.6. Дослідження вітрових потоків на території України.....	28
Розділ 3. Дослідження особливостей експлуатації ВЕУ в сільському господарстві.....	30
3.1 Робота вітрових турбін різної потужності на турбулентних вітрах.....	30
3.2 Дослідження можливості накопичення електроенергії.....	32
3.3. Експлуатація вітрогенератора в безвітряну погоду.....	34
3.4. Розрахунок економічної ефективності переходу сільських господарств на вітрову енергетику.....	35

Висновки .....	37
Список використаних джерел .....	38

## ВСТУП

**Актуальність дослідження.** Тема виробництва електроенергії з відновлюваних джерел на даний момент часу вже є добре вивченою. Багато наукових робіт зроблено, беручи за основу, дослідження вітрогенераторів з горизонтальними та вертикальними типами вітрових турбін. На основі досліджень ефективності отримання електроенергії, висунуто низку положень, щодо місця будівництва та потужності вітрогенераторних установок. В основному будуються електростанції великої сумарної потужності, що включають в себе декілька десятків окремих вітрогенераторів. Будівництво, як правило, ведеться на великих відкритих ділянках, площею 3000 – 4000 гектар, де є постійні вітри. Це може бути прибережна шельфова зона або високогірна відкрита місцевість.

Водночас, недостатньо вивченою є проблема ефективності малопотужних вітрогенераторів (до 100 кВт). Саме такі генератори найкраще підходять для використання на сільськогосподарських угіддях фермерів. Вони є дуже мобільними, і піддаються легкому транспортуванню. Також, що є дуже важливим, не створюють низькочастотного шуму і не завдають шкоди птахам. Саме тому тема даної роботи є дуже актуальною для сьогодення, так як використання вітрогенераторів, може зробити фермерства сільського господарства більш автономними та незалежними від зовнішніх факторів, таких як загальна ціна на електроенергію.

**Метою роботи** є аналіз можливості та доцільності експлуатації вітрогенераторів фермерами сільського господарства, а також вибір найбільш ефективної потужності генератора, з точки зору ціна / потужність.

**Об'єктом дослідження** є процес виробництва електроенергії одиничним вітрогенератором, що включає як дослідження постійних вітрових потоків на території України, так і обслуговування та ремонт вибраного генератора та вітрової турбіни.

**Предметом дослідження** є система вітрова турбіна/електрогенератор та затрати коштів на її вибір, купівлю, транспортування та експлуатацію.

Головними **завданнями** дослідження є:

1. вивчення потреб фермерів на електроенергію,
2. підбір найбільш ефективних вітрогенераторів для кожної конкретної потреби,
3. визначення найбільш доцільних місць розташування вітрових турбін, з точки зору постійності вітрових потоків.

Для вирішення поставлених в роботі задач, застосовано найбільш актуальні **методи** дослідження: масовий аналіз вітрових потоків України, побудова математичних моделей в середовищі MatlabSimulink, моделювання вітрового потоку, моделювання генератора електроенергії та вітрової турбіни. Для економічного обґрунтування застосовано методику точних економічних розрахунків, та порівняння фінансових затрат при різних джерелах енергопостачання.

#### **Публікації:**

1) Павлишин О. О. Генерування енергії з вітру та вітрові потоки на території України. *Актуальні питання та перспективи проведення наукових досліджень*: мат. міжнар. студ. наук. конф. 6 листопада, 2020. Вінниця : Молодіжна наукова ліга, 2020. Т.2. ст. 26-28.

2) Павлишин О.О. Аналіз доцільності переходу сільських господарств на вітрову енергетику. *Актуальні проблеми сучасної науки та освіти* : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції м. Львів, 9-10 листопада 2020 року. Львів : Львівський науковий форум, 2020. Ч. III. С. 19-20.

3) Павлишин О. О. Сучасна вітроелектро установка: потенціал використання для сільського господарства. *Інновації науки XXI: LIV* Міжнародна науковопрактична інтернет-конференція. м Київ, 2 листопада 2020 року. Київ : Наука та практика, 2020. С. 252-254.

Отримані результати матимуть вагоме **практичне значення** для економічного розвитку та автономності сільських господарств.

Також результати досліджень можна використовувати для підбору та імпорту найбільш ефективних турбін та генераторів, що покращить економіку України вцілому.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаної літератури. Загальний обсяг роботи становить 34 сторінки.



## **Розділ 1. Будова та режими роботи автономних вітроенергетичних установок**

### **1.1 Основні типи автономних вітрових генераторів**

Вітроенергетичні установки можуть бути кваліфіковані на окремі типи за різними параметрами [4].

За областю використання вітрові енергетичні установки діляться на три основні типи: промислові, приватні, спеціального призначення.

Промислові вітрогенератори в більшості випадків, встановлюються великими енергетичними компаніями, не рідко, за державним замовленням. Для промисловості є вигідним встановлення великої кількості окремих вітрогенераторів, що формують собою вітрову електростанцію [6].

Потужність одного сучасного промислового генератора може сягати 8 – 10 МВт, а електростанції близько 1000 МВт [43].

Вітрові генератори приватного призначення мають суттєво меншу потужність, ніж промислові. Це зумовлено багатьма факторами, такими як вартість купівлі та обслуговування, наявність можливості зберігати електроенергію та іншими. Приватні генератори часто можуть працювати паралельно зі стаціонарною мережею або формувати собою джерела автономного енергозабезпечення [16]. В дану систему також може входити акумуляторна батарея, сонячна панель та інвертор чи стабілізатор напруги. Подібні системи є досить актуальними для сільського господарства, так як часто сільськогосподарські угіддя знаходяться далеко від центральних теплових електростанцій і вимагають додаткових затрат на транспортування електроенергії. В той же час фермерські господарства не потребують дуже великих обсягів електроенергії. За статистикою до 75% господарств відносяться до малих або середніх, з нормою енергозатрат від 100 до 500 кВт / год [15].

Ця норма може бути цілком покрита мережею із кількох вітрових генераторів з горизонтальним або вертикальним типом вітрової турбіни [18].

Відтак, для автономного електрозабезпечення таких технологічних об'єктів як до прикладу туристична стоянка або вітрильна яхта, використовують Вітрогенератори спеціального призначення. Особливість їх використання полягає у тому, що вони часто використовуються без інверторів та мають значно нижчу потужність в порівнянні з іншими типами вітрогенераторів, а головна їх функція в тому, щоб бути джерелом постійного струму для підзарядки акумуляторних батарей [5].

Якщо класифікувати вітрогенератори за конструкцією вітрової турбіни, то вони поділяються на апарати з горизонтальною та вертикальною віссю (яка не обов'язково повинна бути вертикальною).

Особливість апаратів першої групи полягає у тому, що вітер обертає ротор, а вітротурбіна передає добуту електроенергію на контролер заряду. Далі інвертор перетворює цю напругу на придатну для використання – 220 Вт 50 Гц. Апарати з горизонтальною віссю мають високий показник коефіцієнту використання енергії вітру (КІВ, КІЕВ) та характеризуються відносно малим динамічним навантаженням. За рахунок цього досягають оптимізації профілів лопатей турбіни та отримують на них значну підйомну силу, що сприяє підвищенню крутного моменту [17].

Апарати з вертикальною віссю, на відміну від попередніх, не потребують пристроїв орієнтації відносно напрямку вітру. Однак їх суттєвим недоліком довгий час було те, що крутний момент залишався незмінним протягом одного обороту, а самі лопаті турбіни при обертанні створюють імпульси, що призводять до додаткових навантажень на елементи їх конструкції [20].

Підсумовуючи зазначимо, що недоліки та переваги обох типів вітрогенераторів за конструкцією вітрової турбіни були враховані та невдовзі виправлені. Так, наприклад, в апаратах з вертикальною віссю недолік додаткових імпульсів від лопатей турбін усунули шляхом гвинтового їх повороту.

## 1.2. Режими роботи вітрових турбін

В залежності від напрямку вітру, його швидкості та величини навантаження вітрової енерго – установки, генератор постійного струму може працювати в одному із наступних режимів [13]:

1. Вітрогенератор заряджає батарею без зовнішнього навантаження.
2. Вітрогенератор заряджає батарею і одночасно забезпечує зовнішнє навантаження.
3. Вітрогенератор і батарея працюють паралельно на зовнішнє навантаження.
4. Батарея забезпечує зовнішнє навантаження самостійно.

У більшості випадків акумуляторна батарея працює на вітрогенераторі у змішаному режимі, тобто переходить з режиму заряду – розряду в режим постійного підзаряду - так званий буферний режим. Буферний режим використовується коли є одночасно навантаження для розряду батареї та вітер достатньої сили для її підзаряду [14].

Величина зарядного струму залежить від різниці напруг генератора та акумуляторної батареї. Чим менший заряд батареї, та як наслідок нижча її напруга, тим більшим буде зарядний струм, при умові достатньої потужності вітрового потоку [19].

### 1.3 Головні енергетичні характеристики ВЕУ

Особливість розрахунку ефективності вітроенергетичної установки пов'язана зі зміною параметрів та потужності джерела енергії – вітру. На (рис. 1.1) показана типова енергетична характеристика вітрогенератора [5].

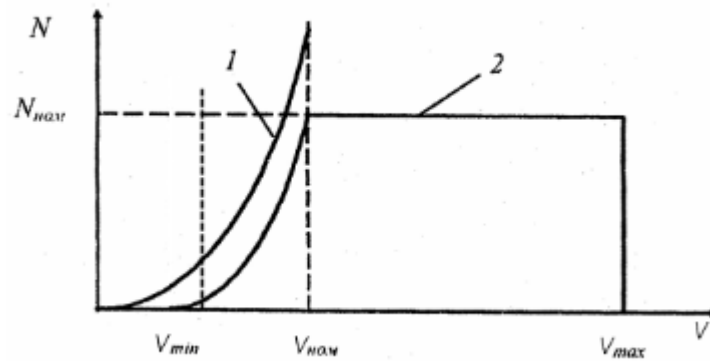


Рис. 1.1. Енергетична характеристика вітрогенератора

Потужність  $N$  вітрового потоку визначається за формулою:

$$N(V) = C_p \cdot \rho \cdot V^3 \cdot S / 2 \quad (1.1)$$

де:  $\rho$  – густина повітря;  $V$  – швидкість набігаючого вітрового потоку;

$S$  – площа вітроколеса, яка ометається;  $C_p$  – коефіцієнт використання енергії вітру.

Функція потужності  $N(V)$ , яка визначається за формулою (1.1) показана на рис.1.1 за допомогою кривої 1. Однак на практиці енергетична характеристика ВЕУ визначається за допомогою кривої 2, адже як тільки швидкість вітру опускається нижч мінімальної робочої, установка перестає працювати. Як правило, мінімальну швидкість визначають наступним чином:  $V_{\min} = 0,5 \cdot V_{\text{ном}}$ .

З графіка енергетичної характеристики вітрогенератора стає очевидним той факт, що хоча швидкість вітру і зростає, а його енергія збільшується, однак остання не може бути використана повною мірою, що зумовлено пологою формою реальних енергетичних характеристик [17].

Одним із основних критеріїв ефективності вітрогенераторає коефіцієнт  $K$  використання установленної потужності вітродвигуна, який визначається за формулою [10]:

$$K = (N_f * T) / (N_y * T) = N_{av} / N_y \quad (1.2)$$

де  $N_y$ ,  $N_{cp}$  – встановлена (номінальна) та середня потужності вітродвигуна за період часу  $T$ ;

Аналіз статистичних даних використання ВЕУ показує, що прийнятне значення коефіцієнту  $K$  лежить в межах 0.35 – 0.5

#### **1.4 Системи керування та транспортування електричної енергії до сільсько – господарських угідь**

В абсолютній більшості випадків роботу вітрової енергетичної установки контролює стандартний промисловий комп'ютер. Існує система NetConverter,

що здатна контролювати та регулювати частоту обертів генератора, напругу та силу струму, що подається на трансформатор [13].

Вітряна турбіна працює в автоматичному режимі і запускається в роботу при досягненні вітром швидкості 3-4 м/с. При швидкості повітряного потоку 13-15 м/с потужність генератора досягає номінальних показників. При досягненні швидкості вітру 25 м/с автоматична система зупиняє ротор турбіни, для уникнення пошкоджень та перегріву. Також передбачено управління турбіною в дистанційному режимі [14].

В малопотужних ВЕУ застосовують електричні генератори різних типів, як традиційної конструкції – асинхронні короткозамкнені з самозбудженням, асинхронні з фазним ротором у вигляді машини подвійного живлення, синхронні з електромагнітним збудженням, СГПМ, вентильні реактивні, так і нових типів – генератори з постійними магнітами та перемиканням потоку, асинхронні з постійними магнітами, ковзно-синхронні з постійними магнітами та ін. [23]

Генератори нових типів мають низку переваг над традиційними, проте їхня конструкція ще не завершена, проектування та виготовлення ускладнені, що негативно впливає на вартість. Тому фермерам увагу варто зосередити на електричних генераторах традиційної конструкції. Вони краще придатні для експлуатації в сільському господарстві [25].

Відповідно до прийнятої концепції побудови ВЕУ для забезпечення високої енергетичної ефективності роботи ротора в малопотужній ВЕУ найдоцільніше застосувати синхронний генератор на постійних магнітах (СГПМ), що й зроблено в переважній більшості вітрогенераторів [26].

Така електрична машина дає змогу легко замінити механічну передачу на електромеханічну, збільшивши до потрібної кількості число пар полюсів.

Водночас відсутність мультиплікатора забезпечує низку позитивних якостей: призводить до зменшення втрат енергії в трансмісії, покращує старт енергетичної машини, підвищує її надійність та знижує вартість [30].

Високу енергетичну ефективність ВЕУ можна гарантувати, лише забезпечивши якісне автоматичне керування її роботою [33]. Зважаючи на низьку надійність роботи механічних систем, які можуть коректувати аеродинамічні характеристики вітрового ротора, їх застосування дуже обмежене, тому переважна більшість досліджень зосереджена вийнятковно на електричному регулюванні.

У випадку застосування синхронного генератора на постійних магнітах таке регулювання можна здійснити, змінивши електричне навантаження генератора [35]. Спеціально для цієї цілі існує низка способів реалізації керованого електричного навантаження. Між собою вони відрізняються складністю, вартістю, рівнем електромагнітної сумісності з джерелом енергії – СГПМ, а також видом вихідного потоку електричної енергії [36]. Щодо останнього, розрізняють системи вихідної напруги та вихідного струму.

## Розділ 2. Загальна структура моделі вітрової турбіни та її адаптація для використання в сільському господарстві

### 2.1 Моделювання вітрового потоку

Рух повітряних мас в атмосфері відбувається під дією сил горизонтального баричного градієнта, сили Коріоліса, відцентрової сили і сили тертя повітря та поверхні Землі. Поблизу поверхні Землі сила тертя гальмує повітряний потік, і внаслідок турбулентного перемішування ефект гальмування поширюється по вертикалі на деяку область, яка називається прикордонним шаром атмосфери [32].

Швидкість турбулентного потоку вітру описується як сума середньої  $V_{в.сер}$  та змінної швидкості вітру  $V_{зв}(t)$  (турбулентної складової):

$$V_{в}(t) = V_{в.сер} + V_{зв}(t) \quad (2.1)$$

Математичний опис швидкості вітру можна здійснити за часовим та спектральним способами [30]. Поширенішим є другий спосіб, для якого за результатами тривалих експериментальних досліджень розроблено низку математичних моделей. Найбільш відомою серед них є модель Ван дер Говена (Van der Hoven) [42], яка показує розподіл гармонік швидкості вітру в діапазоні від 0,0007 до 900 циклів на годину.

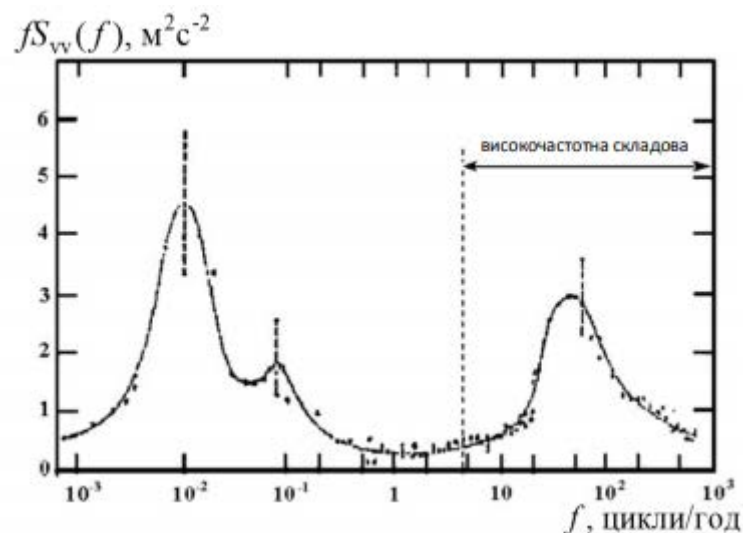


Рис. 2.1 Спектральна модель потужності вітру за Ван дер Говеном



Як видно з рис. (2.1), спектральна густина потужності вітру  $S(f)$  має яскраво виражені максимуми в діапазонах низької та високої частоти, тобто для відносно постійної ( $V_{в.сер}$ ) і турбулентної складових [42].

Відносну інтенсивність турбулентності описує, добутий емпірично, наступний математичний вираз:

$$I_B = Q / V_c = I * (a + 15 / V_c) / (a + 1) \quad (2.2)$$

де  $I$  – коефіцієнт, рівний 0,18 для високої турбулентності та 0,16 для низької;  $a$  – коефіцієнт, рівний 2 або 3 відповідно для високої та низької турбулентності.

Розраховану за виразом (2.2) відносну інтенсивність турбулентності для вітрів з різними значеннями середньої швидкості показано на (рис. 2.2)

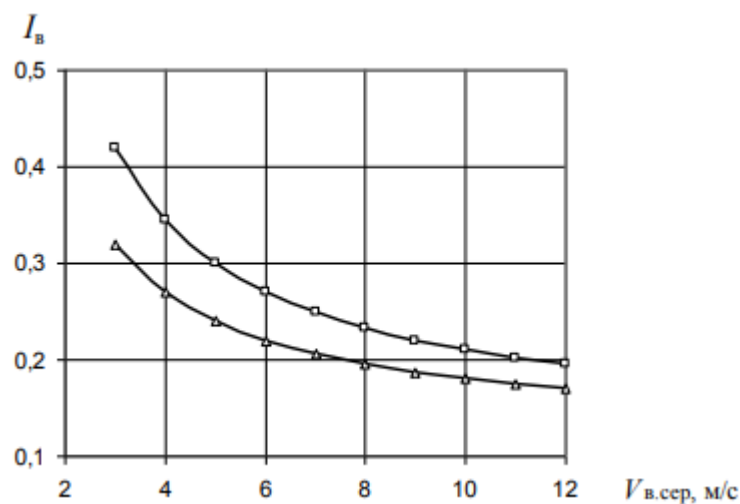


Рис. 2.2. Відносна інтенсивність турбулентності

Статистичні дані показують, що на території України в більшості регіонів для розрахунків, можна середню швидкість вітру приймати  $V_c = 5 \text{ м/с}$  [12]. Тому побудуємо математичну модель турбулентного потоку вітру, прийнявши  $V_c = 5$  та  $L = 400 \text{ м}$  (довжина зони турбулентності).

На підставі виразів розрахунку відносної інтенсивності турбулентності, розрахунку спектральної потужності та заданих даних  $V_c$  та  $L$  в середовищі MATLAB/Simulink можна змоделювати турбулентний вітропотік.

Випадкові значення фаз  $\phi_i$  формуються блоками генератора випадкових чисел `UniformRandomNumber` на дев'ятьох різних частотах.

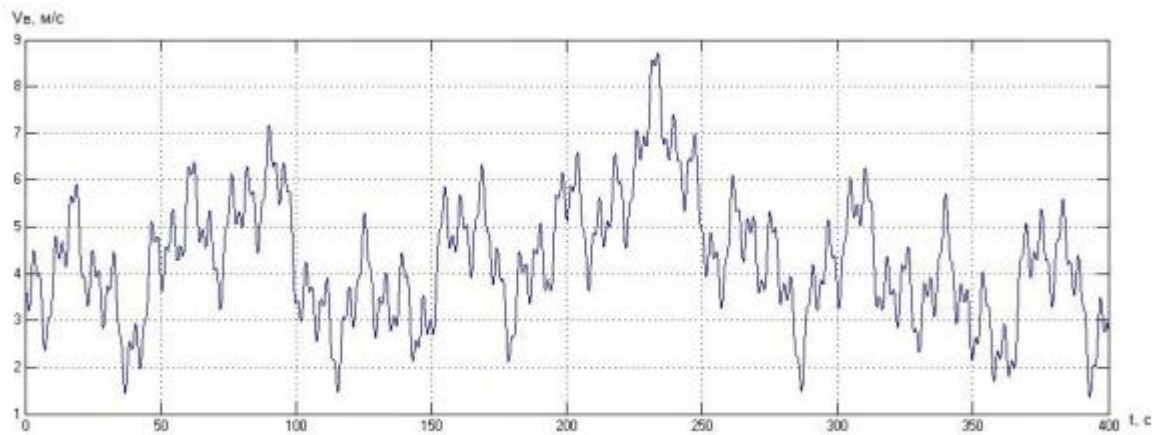


Рис. 2.3. Осцилограма швидкості турбулентного вітропотoku для середньої швидкості вітру 5 м/с

## 2.2. Моделювання вітроколеса

Основна аеродинамічна характеристика вітрового ротора – безрозмірна залежність  $C_p(\lambda)$ . Здебільшого вона визначається конструктивними особливостями ротора та, як правило, не залежить від зовнішніх умов роботи [24].

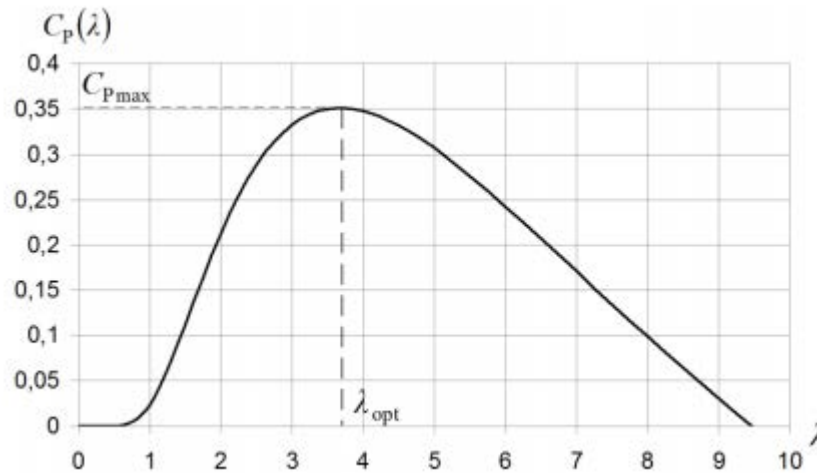


Рис. 2.4. Залежність коефіцієнта потужності Н-ротора  $C_p$  від його швидкості  $\lambda$ .

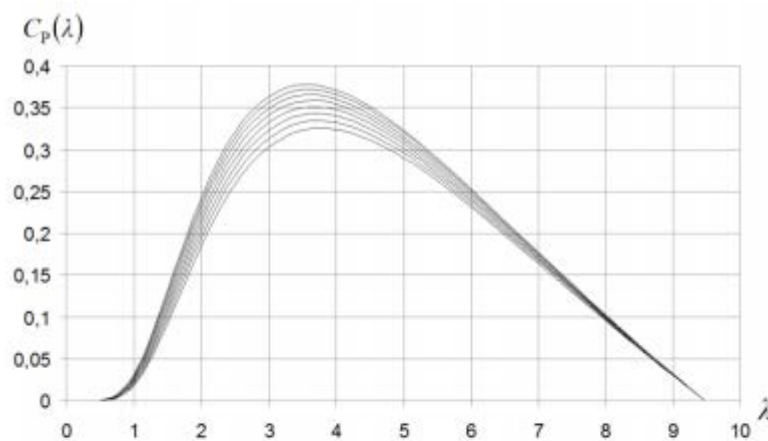
На (Рис. 2.4) представлена залежність  $C_p(\lambda)$ , що характерна для вітрових роторів Н – типу.

Проте, останні дослідження щораз частіше показують, що аеродинамічна характеристика ротора  $C_p(\lambda)$  змінюється зі швидкістю вітру за закономірністю, яку відображено для досліджуваного ВР сімейством кривих на (рис. 2.5) [35]. У цьому сімействі крива, показана на (рис. 2.4), відповідає швидкості вітру 6 м/с, а всі залежності описує вираз:

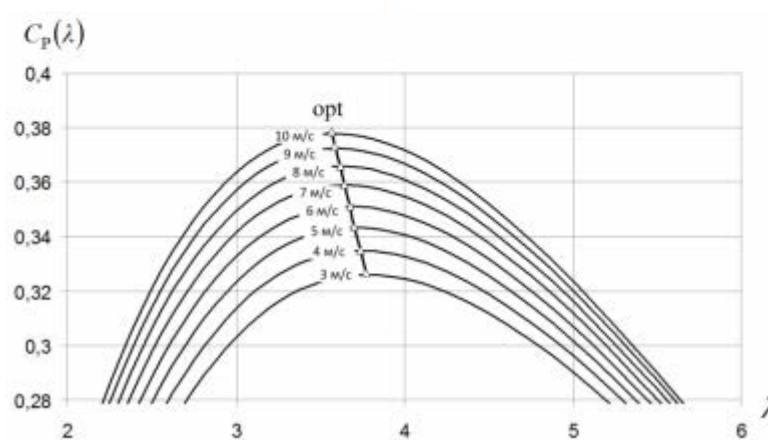
$$C_p(\lambda, V_B) = 1,14 \left( \frac{9,47}{\lambda} - 1 \right) \exp \frac{-f(V_B)}{\lambda}, \quad (2.3)$$

де:

$$f(V_B) = 0,003869V_B^2 - 0,128V_B + 6,627$$



а)



б)

Рис. 2.5. Залежності  $C_p(\lambda)$  при різних швидкостях вітру для вітрового ротора Н - типу: а) загальний вигляд, б) фрагмент в околиці точок максимуму

Нехтування впливів швидкості вітру та температури повітря на ротор призводить до відхилення його робочих параметрів та аеродинамічної характеристики  $C_p(\lambda)$  від номінальних, що знижує ККД ВЕУ [36].

### 2.3 Моделювання електрогенератора

Класична математична модель СГПМ (синхронний генератор на постійних магнітах) без врахування втрат у сталі на насичення магнітопроводу, в обертовій з ротором системі координат d-q, зорієнтованій віссю d вздовж вектора потоку постійних магнітів, описує така система рівнянь [41]:

$$u_d = Ri_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_e L_q i_q \quad (2.4)$$

$$u_q = Ri_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega L_d i_d + \omega_e \Phi_m \quad (2.5)$$

$$M_{em} = \frac{3}{2} p [\Phi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]. \quad (2.6)$$

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{1}{J_\Sigma} (M_{BP} - M_{em} - b\omega - M_c), \quad (2.7)$$

де  $u, i$  – миттєві значення напруг і струмів якоря;

$R, L_d, L_q$  – відповідно активний опір й індуктивності обмотки якоря вздовж осей d і q;

$\Phi_m$  – амплітуда потокозчеплення обмотки якоря з парою полюсів постійних магнітів ротора;

$\omega_e = p\omega$  – колова частота ЕРС;

$p$  – кількість пар полюсів;

$M_{em}$  – електромагнітний момент;

$J_\Sigma$  – сумарний момент інерції ВЕУ (ВР та СГПМ);

$b$  – коефіцієнт в'язкого тертя механічної частини ВЕУ;

$M_c$  – момент статичного навантаження на валу СГПМ.

Математична модель СГПМ не містить періодично змінних коефіцієнтів, проте є нелінійною через добуток змінних, що входять у рівняння.

В разі розміщення постійних магнітів генератора на поверхні його ротора, що й реалізовано в багатополісних СГПМ, індуктивності обмотки якоря відносно осей d і q однакові  $L = L_d = L_q$  [36]. У такому випадку мінімум втрат у міді обмотки якоря досягається при керуванні струмом якоря за умовою  $I_d = 0$ . При цьому струм якоря генератора формується синфазно до ЕРС його обертання, амплітуда якої рівна:

$$E(\omega) = p * \Phi_m * \omega \quad (2.8)$$

Величина амплітуди струму, необхідна для генерації електромагнітного моменту  $M_{em}(\omega)$ , становить:

$$I(\omega) = \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega M_{em}(\omega)}{E(\omega)} = \frac{2}{3} \cdot \frac{M_{em}(\omega)}{p \Phi_m} = k_1 M_{em}(\omega) \quad (2.9)$$

де  $k_1 = 2 * (p \Phi_m) / 3$  – коефіцієнт пропорційності між електромагнітним моментом й амплітудою струму якоря СГПМ при векторному керуванні.

Втрати потужності в багатополісному СГПМ практично зведені до втрат в міді обмоток якоря, оскільки на малих швидкостях вітру, коли електричне навантаження генератора невелике, частота напруги на виході генератора, а отже, й втрати в сталі теж невеликі. На високих швидкостях вітру та вищих частотах обертання, коли збільшуються втрати в сталі, потужність електричного навантаження зростає в кубі до кутової швидкості, а втрати в міді значно переважають.

## 2.4 Визначення оптимальних робочих координат неповного навантаження вітрогенератора

Параметри вітру у часовій та просторовій перспективі є досить непередбачуваними та поєднуються із значним діапазоном, власне, швидкості вітру. При цьому, відомо, що механічні навантаження пропорційні квадрату швидкості вітру, а його потужність – кубу швидкості. Інакше кажучи, якщо швидкість вітру зростає в 2 рази, то механічні навантаження пропорційно зростають в 4 рази, а потужність – у 8 разів [26]. Відтак, надійність вітроелектро установки напряду залежить від надійності електромеханічної системи ВЕУ.

Допустимий діапазон зміни відносного обертального моменту ротора визначається обмеженнями у формі нерівностей:

$$\inf M(z) \leq M(z) \leq \sup M(z), \quad p \leq p \leq p \quad (2.10)$$

- де  $\inf M(z)$  і  $\sup M(z)$  - нижня та верхня межі робочої області на аеродинамічних характеристиках ротора ВЕУ,  $M(z)p$  - відносний обертальний момент ротора ВЕУ.

Координати межі робочої області залежать від геометричних розмірів ротора, параметрів генератора та передавального числа мультиплікатора.

Нижня межа визначається рівнянням [28]:

$$\inf M_p(z) = (2M_{CH} * k_M^2 * z^2) / (\pi * \rho * R^5 * \omega_0^2) \quad (2.11)$$

де:

- $M_{CH}$  - момент сил опору у трансмісії та генераторі на холостому ході,
- $k_M$  - передавальне число мультиплікатора,
- $\rho$  - питома густина повітря,
- $R$  – радіус ротора ВЕУ,
- $\omega_0$  - синхронна кутова швидкість вала генератора,
- $z$  - швидкохідність ротора ВЕУ.

Верхня межа робочої області задається рівнянням [32]:

- ВЕУ з асинхронним генератором:

$$\sup \bar{M}_p(z) = \frac{2 k_M^2}{\pi \rho R^5 \omega_0^2 (1-s_H)^2} \left[ \frac{(1+a_H) P_H k_M}{\omega_0 (1-s_H)} + M_{CH} \right] z^2 \quad (2.12)$$

де:  $s_H$  - номінальне ковзання генератора,  $a_H$  - коефіцієнт, що враховує збільшення моменту сил опору від навантаження генератора,  $P_H$  - номінальна потужність генератора;

- ВЕУ з синхронним генератором

$$\sup \bar{M}_p(z) = \frac{2 k_M^2}{\pi \rho R^5 \omega_0^2} \left[ \frac{(1+a_H) P_H k_M}{\omega_0} + M_{CH} \right] z^2 \quad (2.13)$$

Якщо область  $M(z) \leq p$ , то електрична машина працює в режимі двигуна, покриваючи різницю між моментом опору і моментом ротора. Якщо ж область  $M(z) \geq \sup M(z)$ , то це відповідає такому режиму роботи, коли момент ротора ВЕУ покриває всі втрати в трансмісії та генераторі і віддає в мережу потужність  $0 \leq P \leq P_H$ . При цьому кутова швидкість обертання вала генартора в першому випадку буде меншою синхронної, а машина споживатиме енергію з мережі, тоді як у другому випадку, кутова швидкість перевищуватиме синхронну та перебуватиме в межах  $\omega_0 \leq \omega \leq \omega_H$ . [27]



## 2.5 Визначення потреб сільських господарств на електроенергію

Витрати електроенергії для виробничих і невиробничих потреб планують окремо (рис. 2.6.) [22].

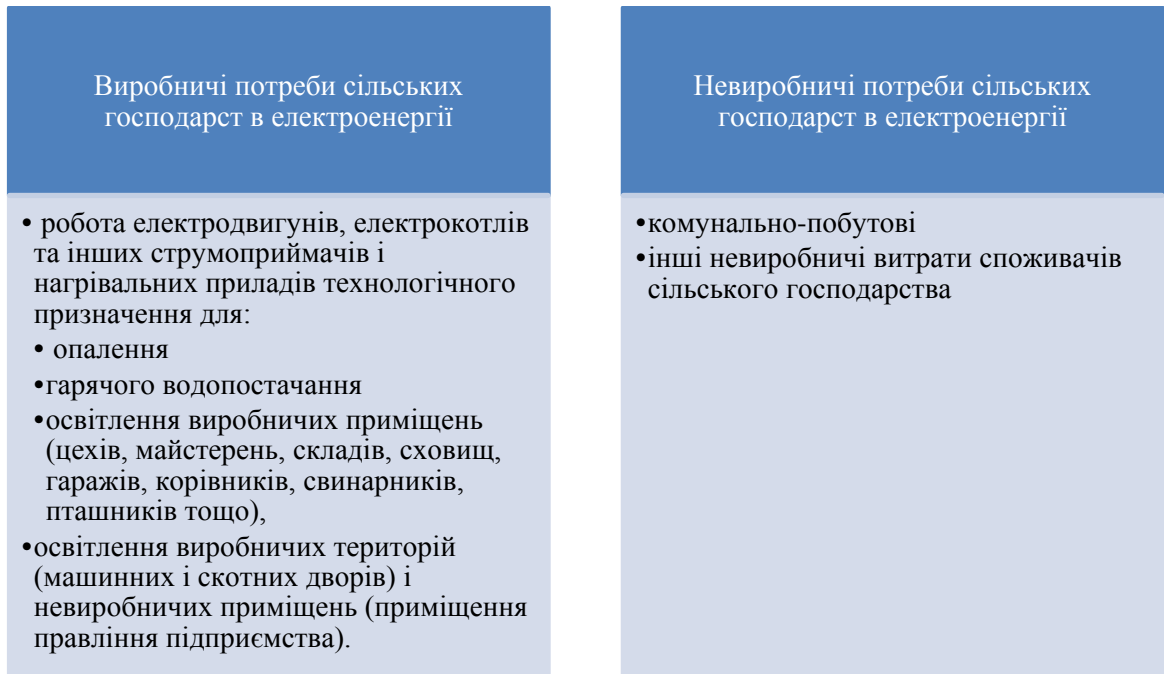


Рис. 2.6. Відмінності виробничі та невиробничі потреби сільських господарств в електроенергії

Для безпосереднього обрахунку потреб в електроенергії конкретного сільськогосподарського підприємства аналізують аналогічні потреби та витрати електроенергії цього підприємства за попередній рік, з урахуванням тенденції минулих років.

Приклад визначення потреби в електроенергії для деякого сільськогосподарського підприємства «Праця» за 2018 рік ми навели на рис. 2.7.

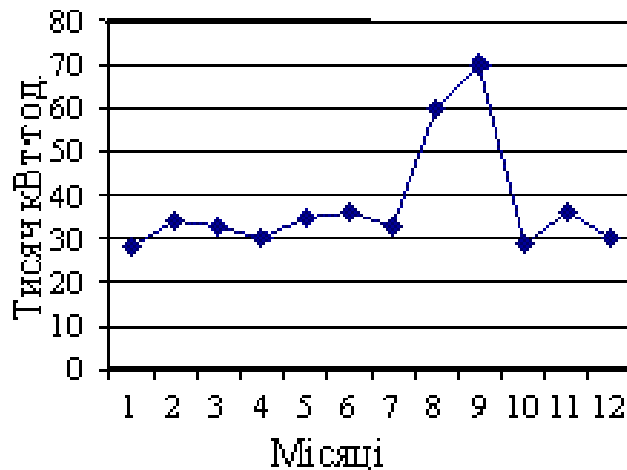


Рис. 2.7. Споживання електроенергії у СП «Праця»

Точне обчислення потреб в електроенергії визначається за формулами [38]:

$$Q_i = W_i * D_i * T_i \quad (2.14)$$

$$Q_i = W_i * Q_p / P_i \quad (2.15)$$

де:  $Q_i$  – потреба конкретної електроустановки в електроенергії

$W_i$  – потужність електроустановки

$D_i$  – кількість днів роботи установки

$T_i$  – тривалість роботи протягом доби

$Q_p$  – плановий обсяг робіт

$P_i$  – виробнича потужність установки

У взятому для прикладу підприємстві сільського господарства «Праця» необхідність в електроенергії розраховують за першим способом, тобто за допомогою виразу 2.14. Таким чином, отримують сумму необхідної електроенергії для всіх електроустановок:

$$Q = \sum Q_i = \sum (W_i * D_i * T_i) = 120\,000 \text{ кВт} * \text{год}$$

За ціновою політикою 2020 року дана кількість електроенергії буде коштувати:

$$N = Q * F = 120\,000 * 1.68 = 201\,600 \text{ грн}$$

## 2.6. Дослідження вітрових потоків на території України

Аналіз досліджень вітрових потоків на території України доцільно почати з загальної інформації. Так, територія України знаходиться в зоні дії західних вітрів помірного поясу. Водночас на вітрові потоки України впливають процеси глобальної циркуляції атмосфери [43]. Хоча вітри часто змінюють свої напрямки, однак все ж можна встановити деякі особливості залежно від пори року. Так, влітку на всій території України переважають західні та/або південно-західні вітри. Узимку ці вітри також часто трапляються, однак оскільки в цей пору року підсилюється вплив Азійського антициклону, в південній та східній частині України частота саме східних вітрів є найвищою (50-60%) [12].

З точки зору території України можна виокремити такі особливості: на півдні та Крим дмуть переважно північні та північно-східні вітри; на заході протягом року вітри переважно не змінюються, західні та південно-західні [19].

Згідно з даними Global wind energy council близько 40% територій України придатні до генерування енергії з вітру. При цьому, за оцінками експертів, Україна має потенціал розвинути потужності такого вітрогенерування аж до 5 000 МВт забезпечуючи потреби країни в електро енергії на понад 20-30%. При цьому, найвищий вітроенергетичний потенціал мають узбережжя Чорного та Азовського морів, південь Криму, вершини Українських Карпат, Кримських гір, а також область Донбасу [20].

Окрім гірської та прибережної місцевості, високим вітроенергетичним потенціалом відзначаються Подільська та Придніпровська височини. Адаже умови для генерації енергії вітру тут сприятливі, передусім, в холодні пори року [18].

Щодо півночі України - Поліської та Придніпровської низовин – то ця територія не має значного потенціалу для розвитку вітрової електроенергетики, адже вітри протягом року тут розподіляють нерівномірно та мають невисоку силу для генерації енергії [21]. Тут натомість рекомендується розміщення

тихохідних вітроенергетичних установок, рентабельність яких підвищуватиметься у холодний період року [27].

Потужність вітрового потоку залежить як від сили вітру, так і від густини повітря. Залежність густини повітря  $\rho_{п}$  від температури повітря  $\vartheta$  і висоти над рівнем моря  $h$ , показана на (Рис. 2.8).

Як видно з графіка зі зростанням висоти, густина повітря падає. Тому на великих висотах потужність, що може зніматися з валу вітрової турбіни менша, ніж на рівні моря [25].

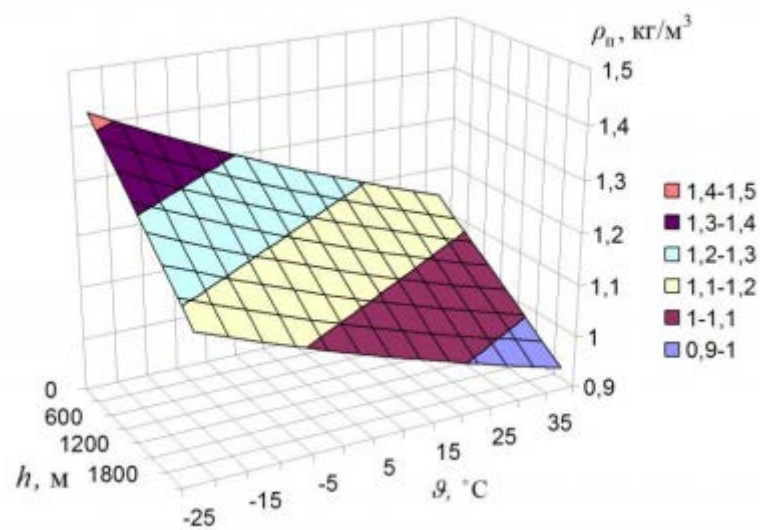


Рис. 2.8. Залежність густини повітря  $\rho_{п}$  від температури повітря  $\vartheta$  і висоти над рівнем моря  $h$

Відтак можна зробити висновок, що за умови, що щільність повітря була б сталою величиною та не залежала від висоти місцевості, висота атмосфери мала б дорівнювати 8000 м (висота однорідної атмосфери).

### Розділ 3. Дослідження особливостей експлуатації ВЕУ в сільському господарстві

#### 3.1 Робота вітрових турбін різної потужності на турбулентних вітрах

Порівняння енергетичної ефективності ВЕУ, керованої за принципом ОТС, і системою керування з комбінованим регулятором, проведено комп'ютерним симулюванням їхньої роботи протягом 300 с на турбулентному вітрі зі середньою швидкістю 3 м/с (рис. 3.1) при температурі навколишнього середовища +5 °С. Для отримання вірних результатів симулювання починається та закінчується в усталеному режимі роботи при стабільній швидкості вітру 3 м/с.

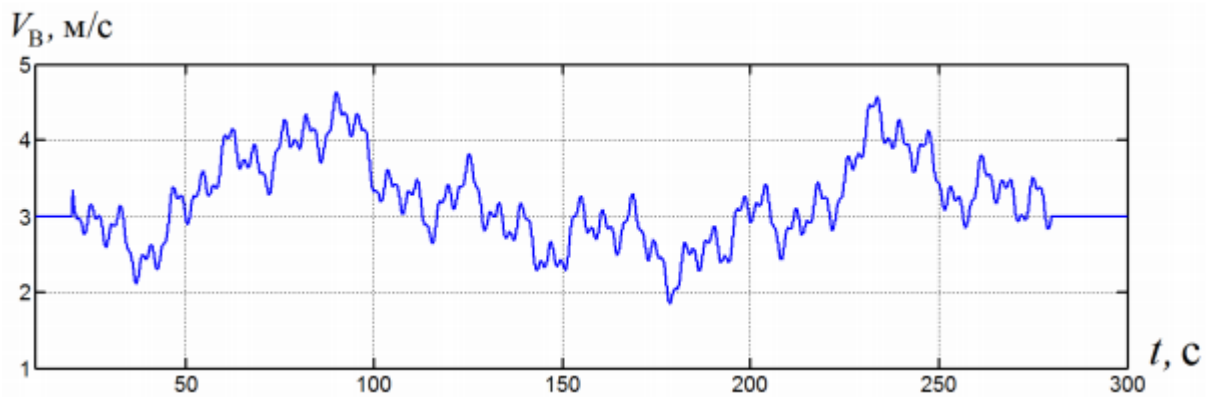


Рис. 3.1. Осцилограма змодельованого турбулентного вітропотoku з середньою швидкістю вітру 3 м/с.

На (рис. 3.2) наведено отримані осцилограми основних координат роботи ВЕУ. Як видно з осцилограм кутової швидкості ВЕУ, керовану комбінованим регулятором, характеризує краща динаміка, порівняно з керуванням за класичним принципом ОТС, і значно краще наближення до оптимальної з електроенергетичної точки зору кутової швидкості ВР.

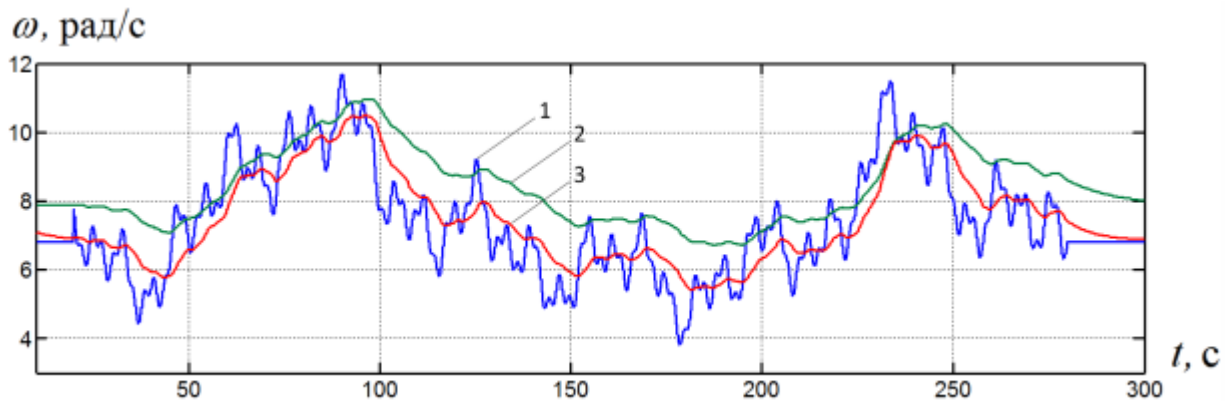


Рис. 3.2. Осцилограми кутової швидкості ВР: 1 – оптимальна з електроенергетичної точки зору  $\omega_{opt.e}$ ; 2 – ВЕУ, керованої за принципом ОТС; 3 – ВЕУ, керованої комбінованим регулятором.

З аеродинамічної точки зору система класичного ОТС керування має гірше наближення до оптимального режиму відбору потужності вітру. Показані на (рис. 3.2) осцилограми електричної потужності на виході ВЕУ та втрат потужності в СГПМ, демонструють значно вищу швидкодію автоматичного керування комбінованим регулятором порівняно з регулюванням за принципом ОТС. Але встановлення автоматичного регулятора вимагає більших фінансових затрат, порівняно з класичною системою керування. Тому автоматичний регулятор відбору потужності як правило встановлюється тільки на великих вітроенергетичних комплексах. Для потреб сільського господарства цілком достатньо ефективності, що надає класична система керування за принципами ОТС.

### 3.2 Дослідження можливості накопичення електроенергії

Накопичення енергії – це відстрочення споживання електричної енергії до моменту, який не співпадає з моментом її виробництва, або перетворення електричної енергії у іншу форму енергії (фізичні, інерційні, хімічні, водневі та інші технології), котра може бути збережена, з можливістю подальшого її перетворення назад у електричну електроенергію чи використання як іншого носія енергії [43].

Наразі, існують такі технології накопичення електроенергії (рис.3.3.) [37]:

твердотільні акумулятори	<ul style="list-style-type: none"> <li>•ряд електрохімічних накопичувачів, у тому числі сучасні хімічні акумулятори та конденсатори;</li> </ul>
проточні акумулятори	<ul style="list-style-type: none"> <li>•акумулятори, в яких енергія накопичується безпосередньо в розчині електроліту для збільшення терміну служби і миттєвого спрацювання;</li> </ul>
маховики	<ul style="list-style-type: none"> <li>•механічні пристрої, що використовують енергію обертання для миттєвої подачі електричного струму;</li> </ul>
сховище теплової енергії	<ul style="list-style-type: none"> <li>•акумулявання тепла і холоду для створення енергії на вимогу та її виділення в зручний для споживачів час;</li> </ul>
насосна гідроаккумулявальна електростанція	<ul style="list-style-type: none"> <li>•створення та зберігання енергії з використанням двох резервуарів із водою, розташованих на різних висотах;</li> </ul>
система зберігання енергії на основі стисненого повітря.	

Рис. 3.3. Види технології накопичення електроенергії

Найбільш придатними до використання в сільському господарстві є системи накопичення на основі літій - іонних акумуляторів [40].

Сумарна напруга усіх послідовно-підключених акумуляторних батарей повинна дорівнювати витікаючій напрузі вітрогенератора [30].

Якщо напруга на виході з генератора складає  $U = 120$  Вольт, то:

$$N = 120V / 12V = 10$$

- тобто тобто десять акумуляторів по 12 Вольт, які сполучені послідовно;  
або:

$$N = 120V / 24V = 5$$

- 5 акумуляторів по 24 Вольт, що також сполучені послідовно;

Місткість акумуляторів впливає на термін автономної роботи навантаження від них при низькій швидкості вітру або повній його відсутності [31]. Одного акумулятора з параметрами: 12 Вольт, 100 Ампер/годин вистачає приблизно на 1 годину роботи при навантаженні 1 кВт, тобто 1 кВт/година. (відповідно: 12В, 40А / год - 24 хвилини при навантаженні 1 кВт, 12В, 150А / год - 1 година 30 хвилин при навантаженні 1 кВт, 12В, 200А / год - 2 години при навантаженні 1 кВт).

$$T = 2 \text{ год} * 20 \text{ шт} = 40 \text{ годин} \quad (2.18)$$

З виразу (2.18) слідує, що блок акумуляторів з 20 штук, з параметрами 12В, 200А / год може безперервно та без підзарядки забезпечувати струмом живлення навантаження 1кВт протягом 40 годин.



### 3.3. Експлуатація вітрогенератора в безвітряну погоду

На разі вже існують розробки, що дозволяють отримувати корисну потужність з вітрогенератора навіть у безвітряну погоду. Зокрема, Американська компанія Hybrid Turbines розробила вітрові турбіни, що працюють навіть за повного штилю, коли швидкість вітру рівна нулю. Нова розробка отримала назву – SmartGen [44]. На відміну від дорогих систем акумулювання енергії електrolітними батареями дана система використовує стиснене повітря, що подається турбокомпресорами, які працюють на природному газі або на біогазі.

Перевагою системи SmartGen є можливість монтувати її на вже існуючі вітряки [45]. По-перше, це дозволить підлаштовувати вихідну потужність в залежності від потреб електромережі. По-друге, зробити вітроенергетику більш привабливою для інвесторів. Також, подібна система дозволяє використовувати турбіни більш ефективно, так як згідно зі статистичними даними, вітрогенератори виробляють електроенергію лише протягом 30% часу свого існування [41].

Така технологія буде особливо корисною для сільських регіонів, які є основними виробниками біогазу та можуть стати повністю незалежними за рахунок впровадження гібридних систем, що використовують енергію вітру та біогаз [42].

### 3.4. Розрахунок економічної ефективності переходу сільських господарств на вітрову енергетику

Як було розраховано у пункті 2.5 затрати на електроенергію взятого за приклад підприємства сільського господарства за один рік є рівними:

$$N = Q * F = 120\ 000 * 1.68 = 201\ 600 \text{ грн}$$

Норма електропостачання до даного підприємства дорівнює:

$$Q = \sum Q_i = \sum (W_i * D_i * T_i) = 120\ 000 \text{ кВт * год,}$$

тому при розрахунках потужності вітрогенератора потрібно відштовхуватися саме від норми електропостачання на рік.

Тобто, в середньому підприємство за один місяць споживає:

$$120\ 000 \text{ кВт * год} / 12 = 10\ 000 \text{ кВт * год}$$

=>за один день:

$$10\ 000 \text{ кВт * год} / 30 = 335 \text{ кВт * год}$$

=>за одну годину:

$$335 \text{ кВт * год} / 24 = 13.95 \text{ кВт * год}$$

тобто, джерело живлення повинне мати потужність  $P = 14 \text{ кВт}$ .

В якості вітрогенератора для енергетичної установки доцільно взяти вітряк марки MRC, а саме WG-5000 [46]. Він має наступні параметри:

- номінальна потужність вітрогенератора (Вт) - 5000
- напруга вітрогенератора (В) - 240
- діаметр ротора (м) - 5.8
- стартова швидкість вітру (м/с) - 2
- номінальна швидкість вітру (м/с) - 12
- максимально допустима швидкість (м/с) - 60
- гальмування лопастей вітрогенератора (захист від вітру) - автоматика
- номінальна кількість обертів (об/хв) - 200
- матеріал вітрогенератора - алюміній
- матеріал лопастей вітрогенератора - скловолокно
- кількість лопастей – 3 шт

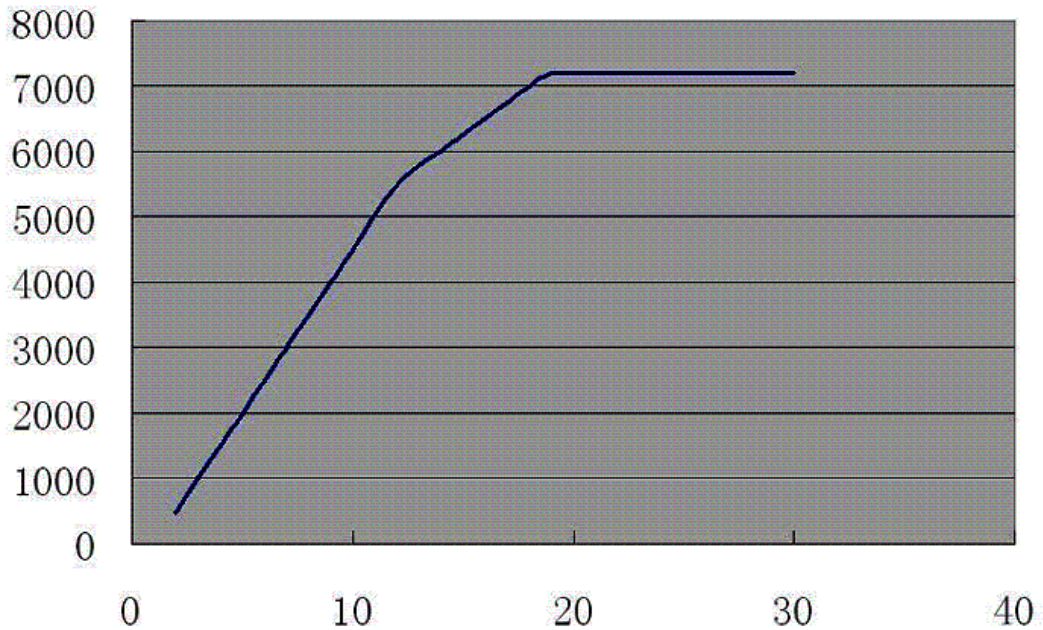


Рис. 3.4. Графік залежності потужності вітрогенератора WG-5000 від швидкості вітру

Ціна одного такого генератора складає 180 000 грн. Так як номінальна потужність складає 5 кВт, для стабільної роботи візьмемо 4 таких генератори.

$$N = 4 * 180\ 000 \text{ грн} = 720\ 000 \text{ грн}$$

Обладнання MRC - WG-5000 для керування генератором, відбору потужності, транспортування та накопичення електроенергії за даними на їх офіційному сайті для кожного вітряка складає приблизно 80% його вартості. Тому маємо:

$$N = 720\ 000 + 720\ 000 * 0.8 = 1\ 296\ 000 \text{ грн}$$

Тобто, з розрахованої щорічної норми затрат на електроенергію в 201 600 грн, сума на купівлю 4 вітрогенераторів для забезпечення повної енергетичної автономності розглянутого підприємства окупиться за:

$$1\ 296\ 000 / 201\ 600 = 6.42 \text{ року}$$

Тобто, приблизно за 6 років та 5 місяців. Після цього періоду власна вітроенергетична станція буде приносити чистий прибуток.

## Висновки

В даній роботі було проведено аналіз можливості та доцільності експлуатації вітрогенераторів фермерами сільського господарства, а також вибір найбільш ефективної потужності генератора, з точки зору ціна / потужність. Проведено аналіз процесу виробництва електроенергії одиничним вітрогенератором, з дослідженням постійних вітрових потоків на території України.

За результатами роботи можна зробити висновок, що вітроенергетика для сільськогосподарських підприємств є дуже перспективним напрямком розвитку, що забезпечить автономність та незалежність від зовнішніх постачальників електроенергії.

При проведенні аналізу вітрових потоків України, було зроблено висновок, що найбільше підходять для встановлення вітрогенераторів підприємства, що знаходяться на узбережжі Чорного та Азовського морів, Південному березі Криму, вершинах Українських Карпат, Кримських гір, а також області Донбасу. Загалом близько 40% території України придатні до використання для генерування вітрової енергії.

За розрахунками затрати на купівлю, транспортування та встановлення вітрогенераторів та допоміжного обладнання окупляться за 5 – 7 років, що є дуже прийнятним терміном, з точки зору бізнесу.

### Список використаних джерел

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. – К.: ТОВ “ВіолаПрінт”, 2008. – 55 с.
2. Безруких П.П. Ветроэнергетика / Справочное и методическое пособие / П. П. Безруких. - М.: - ИД “ЭНЕРГИЯ”, 2010. - 320 с
3. Білецький Ю. О. Енергоформуєче керування електромеханічними системами на базі синхронної машини з постійними магнітами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / Ю. О. Білецький. – Львів, 2014. – 20 с.
4. Буров О. М. Електромеханічна система імітатора вітротурбіни: автореф. дис. ... на здобуття наук.ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / О. М. Буров. – Дніпропетровськ, 2013. – 22 с.
5. Вашкевич К. П. Аэродинамические характеристики ветродвигателей ветроэлектрических установок / К. П. Вашкевич // Известия РАН. Энергетика. – 1997. – № 3. – С. 4-17.
6. Веклинець І. І. Аналіз топологічних особливостей активних випрямлячів / І. І. Веклинець // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». 202 Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2008. – № 613. – С. 230-239.
7. Відновлювані джерела електричної енергії (аналіз, перспективи, проекти) / І. О. Сінчук, С. М. Бойко, І. А. Луценко, Г. І. Ткаченко ; під ред. Сінчука О. М. — Кременчук: Вид-во ПП Щербатих О. В., 2013. — 102 с.
8. Волобринский С.Д., Каялов Г.М., Клейн П.К, Мешель Б.С. Электрические нагрузки промышленных предприятий. – Л.: Энергия, 1971. – 164 с.
9. Гайдайчук В. В., Носенко В. П. Динаміка вітроенергетичних установок під дією вітрових та інерційних навантажень // Опір матеріалів і територія споруд – 2008. – № 82. – С. 31 - 38.

10. Зінько Р.В. Особливості роботи вітряків з лопатями вітрильного типу // Науковий вісник НЛТУ України. Збірник наукових праць, 2011. – Вип. 21.14. – С. 101 - 111.

11. Дзензерский В.А. Ветроустановки малой мощности / В.А. Дзензерский, С.В. Тарасов, И.Ю. Костюков. – К.: Наук. думка, 2011. – 592 с.

12. Елистратов В.В. Использование возобновляемой энергии / В.В. Елистратов. : Учеб. пособ. – СПб. Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 250 с.

Елистратов В.В. Расчет фундаментов ветроэнергетических установок: учеб.пособ. / В.В. Елистратов, И.А. Константинов, А.Н. Панфилов; Ч. 1. –К: Изд-во СПб ГТУ, 2001.

13. Жуков О. А. Математичні моделі та пристрої для автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом з вертикальною віссю обертання: автореф. дис. ... на здобуття наук.ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / О. А. Жуков – Вінниця, 2011. – 17 с.

14. Забарний Г.М. Енергетичний потенціал нетрадиційних джерел енергії України / Г.М. Забарний, А. В. Щурчков// – К.: ІТТФ, 2002. □□С. 151 - 159.

15. Климко В. І. Вітросонячні системи електроживлення малопотужних споживачів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / В. І. Климко. – Львів, 2016. – 20 с.

16. Ковальчук А. І. Електромеханічна система безконтактної контрроторної вітроелектроустановки з вертикальною віссю обертання: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / А. І. Ковальчук. – Львів, 2015. – 20 с.

17. Козирський В. В. Обґрунтування принципів адаптивного регулювання навантаження сільськогосподарських автономних вітроелектричних установок / В. В. Козирський, М. І. Трегуб, А. В. Петренко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів та природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – К., 2013. – Вип. 166, ч.3. – с. 22 – 31.

18. Кривцов В.С. Ветроэлектрогенераторы / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И.Яковлев. Неисчерпаемая энергия: уч.: кн. Харьк. нац. аэрокосм. ун-т. —Х: – С: Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. — 400 с.

19. Кувшинов В. В. Підвищення потужності серійних сонячних установок при комбінованому виробленні теплової і електричної енергії: автореф. дис. ... на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.14.08 «Перетворювання відновлюваних видів енергії» / В. В. Кувшинов. – Київ, 2012. – 19 с.

20. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: Підручник / С.О. Кудря. - К.: НТУУ “КПІ”, 2012. - 492 с.

21. Кузьо І. В. Обґрунтування розвитку вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності / І. В. Кузьо, В. М. Корендій // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка»: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – № 679. – Львів: Вид-во Націон. ун-ту «Львівська політехніка», 2010. – С. 61–68.

22. Легошин Д. В. Енергетична ефективність автономної вітроелектроустановки зі стабілізацією частоти обертання ротора за умов косого обдування: автореф. дис. ... на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.14.08 «Перетворювання відновлюваних видів енергії» / Д. В. Легошин. – Київ, 2012. – 19 с.

23. Лозинський А. О. Система керування вітроустановкою на базі нечіткого регулятора з врахуванням зміни аеродинамічних параметрів вітроротора / А . О. Лозинський, В. І. Щур // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Вип. 3/2015 (31). – Кременчук: Кременч. націон.ун-т ім. М. Остроградського, 2015. – С. 10–21.

24. Маляренко В.А. Енергетика і навколишнє середовище/ В. А. Маляренко. – Харків: Видавництво Сага, 2008. 343 с.

25. Марченко О.С. Довідник по монтажу і налагодженню електрообладнання в сільському господарстві / О. С. Марченко. – К.: Урожай, 1994. – 240 с.

26. Організація і планування сільськогосподарського виробництва : підручник для студентів економічних спеціальностей вищих аграрних закладів освіти III-IV рівнів акредитації. М.М. Ільчук, Л.Я. Зрібняк та ін. За ред. М.М. Ільчука, Л.Я. Зрібняка. К.: 2008. – 757 с.

27. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О. Н. Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн.ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.

28. Павлишин О.О. Аналіз доцільності переходу сільських господарств на вітрову енергетику / О.О. Павлишин // Актуальні проблеми сучасної науки та освіти : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції м. Львів, 9-10 листопада 2020 року. – Львів : Львівський науковий форум, 2020. – Ч. III. – С. 19–20.

29. Павлишин О. О. Генерування енергії з вітру та вітрові потоки на території України / О.О. Павлишин // Актуальні питання та перспективи проведення наукових досліджень: мат. міжнар. студ. наук. конф. 6 листопада, 2020. —Вінниця : Молодіжна наукова ліга, 2020. – Т.2. – С. 26–28.



30. Павлишин О. О. Сучасна вітроелектро установка: потенціал використання для сільського господарства / О.О. Павлишин // Інновації науки XXI: LIV Міжнародна науковопрактична інтернет-конференція. м Київ, 2 листопада 2020 року. — Київ : Наука та практика, 2020. — С. 252-254.

31. Патент на винахід № 103262, МПК F03D 7/04 (2006.01), F03D 9/02 (2006.01). Спосіб перетворення механічної енергії вітроколеса та система для його реалізації / Щур І. З., Щур В. І.; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка». – № а 2012 05125; заявл. 25.04.2012; опубл. 25.09.2013, Бюл. №18.

32. Перспективы мировой ветроэнергетики. Доклад GWEC, Greenpeace International, DLR и EcofysConsultancy / [под ред. Crispin Aubrey, Angelika Pullen, Arthouros Zervos, Sven Teske], Berlin. 2007. – 31 с.

33. Петренко А. В. Комбінована електроводопостачальна вітроустановка з магнітоелектричним лінійним генератором зворотно-поступального руху: автореф. дис. ... на здобуття наук.ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / А. В. Петренко. – Київ, 2012. – 24 с.

34. Побігун О.В., Лижичка Б.М., Фоменко Н.В. Вітроенергетичні установки як альтернатива використання нафтогазових ресурсів // Нафтогазова енергетика, 2010. – № 2(13).

35. Рудий Т. В. Дослідження методами математичного моделювання електромеханічної системи вітроенергетичної установки з оптимальним відбором потужності вітродвигуна і стабілізацією частоти на виході інвертора струму: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» / Т. В. Рудий. – Львів, 1995. – 308 с.

36. Сабинин Г.Х. Теория и аэродинамический расчет ветряных двигателей / Г. Х. Сабинин / Тр. ЦАГИ 1931. - Вып. 104. - 70 с.

37. Стратегічні напрями розвитку сільського господарства України на період до 2020 року / за ред. Ю. О. Лупенка, В. Я. Месель-Веселяка. – К. :ННЦ «ІАЕ», 2012. – 182 с.

38. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки / В.П. Харитонов. - М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006 - 280 с.
39. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра / Я. И. Шефтер. - М.: Энергоатомиздат, 1983 - 201 с. 10.
40. Энергетика: история, настоящее и будущее. От огня и воды к электричеству: Монография / [Бондаренко В.И., Варламов Г.Б., Вольчин И.А. и др]. - К., 2005. - 304 с.
41. Яхно О. Н., Таурит Т. Г., Грабар И. Г. Ветроэнергетика: конструирование и расчет ВЭУ: учеб. пособие. Житомир, 2003. 220с.
42. Ветрогенераторы // MaterialsResearchCentre. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа до ресурсу: <http://mrc.org.ua/new-energy/337-vetrogenerator>
43. Globalcoalpower [Электронный ресурс]. - Режим доступа до ресурсу: <https://www.carbonbrief.org/mapped-worlds-coal-power-plants>
44. GlobalOffshoreWindReport 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://gwec.net/global-offshore-wind-report-2020/>
45. Overview of CAP Reform 2014-2020 [Electronic resource] /Agricultural Policy Perspectives Brief – Режим доступа до ресурсу: [http://ec.europa.eu/agriculture/policy-perspectives/policy-briefs/05\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/agriculture/policy-perspectives/policy-briefs/05_en.pdf)
46. Renewables 2020: global status report [Электронный ресурс]. - Режим доступа до ресурсу: <https://www.ren21.net/gsr-2020/>