

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті

Використання вентиляційного потоку шахт для вітроенергетичної установки, як засобу аварійного живлення споживачів електричної енергії

Бакалаврська дипломна робота

Виконав студент гр. ЕМ – 17 б.м.с. Лимарчук Б. А.

Керівник Кутін В. М.

Вінниця – 2020 р.

Актуальність теми

Використання нетрадиційних джерел електричної енергії, зокрема вітру дозволяє підвищити енергоефективність та екологічність виробленої електроенергії. Передбачається, що до 2020 року частка їх у світовому виробництві енергії досягне 12% проти 1,2% у 2011 році. В Україні у 2012 році нетрадиційними джерелами згенеровано лише 0,01%, а в 2019 році 2,3% .

Оцінка стану провітрювання залізрудних шахт приведено в ряді публікацій [за результатами комплексних обстежень їх вентиляційних систем, а також в науково-дослідних роботах, присвячених аналізу ефективності функціонування провітрювання шахт. Серед значної кількості проблем, які мають місце при підземній розробці рудних родовищ, особливе місце займає задача створення ефективного провітрювання гірничих робіт.

Витрати на вентиляцію шахт і рудників сягають до 7% вартості валового національного продукту, причому більшу частину з них становить вартість електроенергії, яку споживають вентиляторні установки. Оскільки при цьому на 75% вентиляторів головного провітрювання не здійснюється оперативне й плавне регулювання продуктивності, близько 20 % вентиляторів узагалі не регулюються, що призводить до значних перевитрат електроенергії й передчасного зносу устаткування, то можна розглядати економічну ефективність роботи вітроустановки, з позиції перетворення надлишкового вентиляційного потоку в електричну енергію.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є підвищення ефективного використання вентиляційного потоку залізорудних шахт, шляхом застосування вдосконаленого електромеханічного комплексу вітроенергетичної установки, що дозволяє перетворювати турбулентний вентиляційний потік, в місцях розгалуження виробки, в електричну енергію.

Для вирішення вказаної мети були поставлені і розв'язати такі **основні задачі**:

- аналіз існуючих систем вентиляції залізорудних шахт;
- аналіз відомих структур електромеханічних комплексів ВЕУ, їх систем керування та оцінка перспектив використання шляхом встановленням в підземних виробках залізорудних шахт;
- теоретичне обґрунтування та розробка методу енергоефективного електромеханічного перетворення вентиляційних повітряних потоків шахт в електричну енергію та розробка методики розрахунку його параметрів для підземної ВМЕ;
- розробка комп'ютерної моделі електротехнічного комплексу ВЕУ та дослідження її на стійкість з метою визначення робочих параметрів автоматичного регулятора вихідної напруги;
- обґрунтування економічної ефективності використання та можливості впровадження ЕМК ВМЕ в умовах промислових підприємств та в навчальний процес.

Об'єктом дослідження – є процес утворення турбулентних вентиляційних потоків у підземних виробках залізорудних шахт та перетворення їх в електричну енергію.

Предметом дослідження – є електротехнічний комплекс вітрогенератора з вертикальною віссю обертання вітрового колеса та процеси управління ним, з метою регулювання його енергетичних характеристик.

Характеристика об'єкта дослідження

Далекобійність вільного струменя визначається по формулі:

$$L_c = 0,5(1 + 0,5a)\sqrt{S} = 0,5b(1 + 0,5a) \quad (1)$$

де $a = 0,06 \dots 0,08$ – коефіцієнт, що враховує структуру струменя; S – площа поперечного перерізу виробки м^2 ; b – максимальна відстань від поверхні виробки, що подає повітря (або від вентиляційної труби) до бічної поверхні виробки, в якому розповсюджується «вільний» струмінь.

Витрата повітря в довільному перерізі основної ділянки круглого струменя, що знаходиться на відстані x від вихідного отвору, визначимо по формулі:

$$Q = 2,18Q_n \left(\frac{a \cdot x}{R_{от}} + 0,29 \right) \quad (2)$$

де Q_n – витрата повітря в початковому перерізі струменя, $\text{м}^3/\text{хв}$; $R_{от}$ – радіус вихідного отвору, м , x – відстань від вихідного отвору, a – коефіцієнт, що враховує структуру струменя; Q – витрати повітря в довільному перерізі.

Характеристика аеродинамічного опору гірничих підземних виробок залізорудних шахт

6

Аеродинамічний опір тертя визначається по формулі:

$$R = \frac{\alpha PL}{S^3} \quad (3)$$

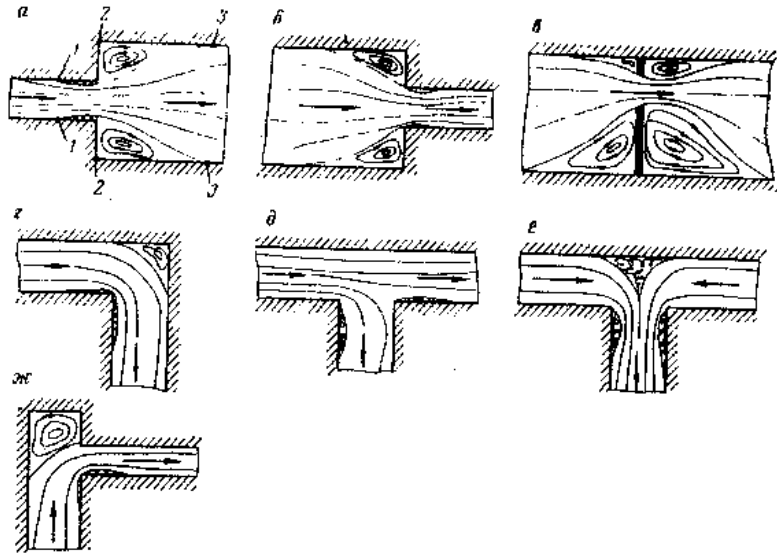
де α – коефіцієнт аеродинамічного опору тертя, Н с²/м⁴; P, L, S – периметр (м), довжина (м) і площа (м²) поперечного перерізу виробки

Ступінь шорсткості поверхні виробок можна охарактеризувати її відносною шорсткістю:

$$\varepsilon = k / D \quad (4)$$

де k – висота виступів шорсткості; D – гідравлічний діаметр виробки.

Характеристика аеродинамічного опору 7 гірничих підземних виробок залізорудних шахт



Схеми місцевих опорів у виробках: а – раптове розширення, б – раптове звуження, в – вентиляційне вікно, г – поворот, д – поділ потоку, е – об'єднання потоків, ж – поворот з одночасним звуженням (наприклад, спряження каналу вентилятора зі стволом).

Для розрахунку депресії місцевих опорів використовується емпірична формула

$$h = R_m Q^2 \quad (5)$$

де R_m – аеродинамічний опір ділянки вироблення з місцевим опором, $\text{H c}^2/\text{m}^8$; Q – витрата повітря, m^3/c ,
 h – депресія місцевих опорів.

Класифікація існуючих вітроенергетичних установок

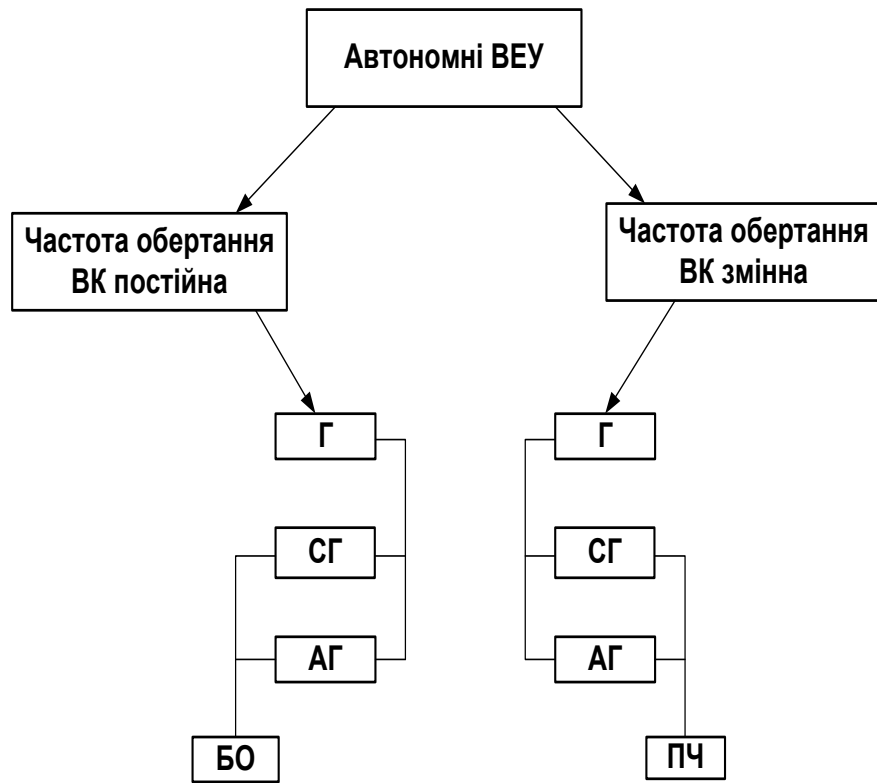


Рисунок 1 – Структурна схема автономних вітроенергетичних установок: Г – генератор; СГ – синхронний генератор; АГ – асинхронний генератор; БО – баластний опір; ПЧ – перетворювач частоти

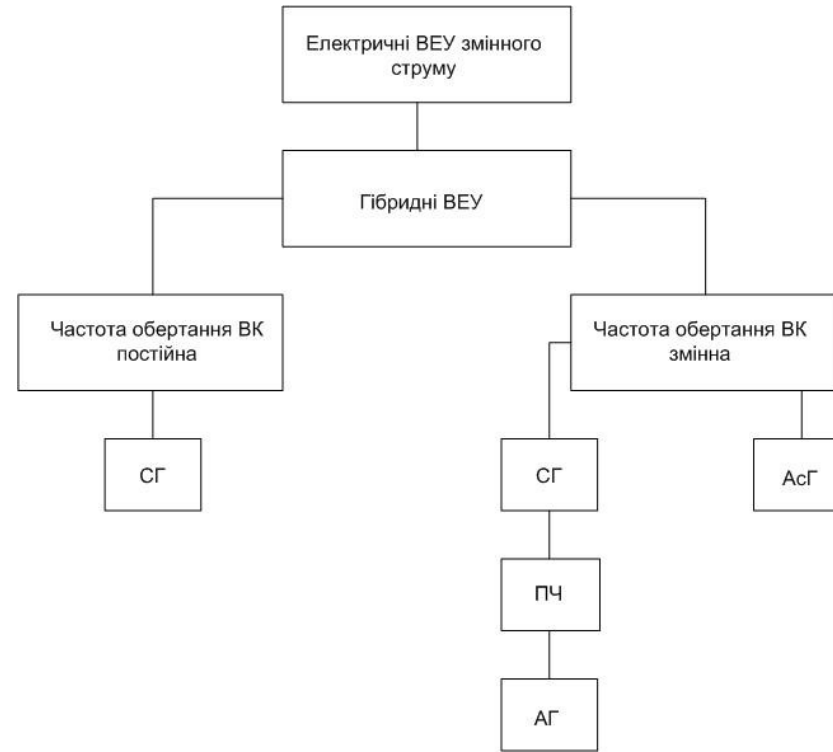


Рисунок 2 – Структурна схема гібридних вітроенергетичних установок: СГ – синхронний генератор, АсГ – асинхронізований генератор; ПЧ – перетворювач частоти, АГ – асинхронний генератор.

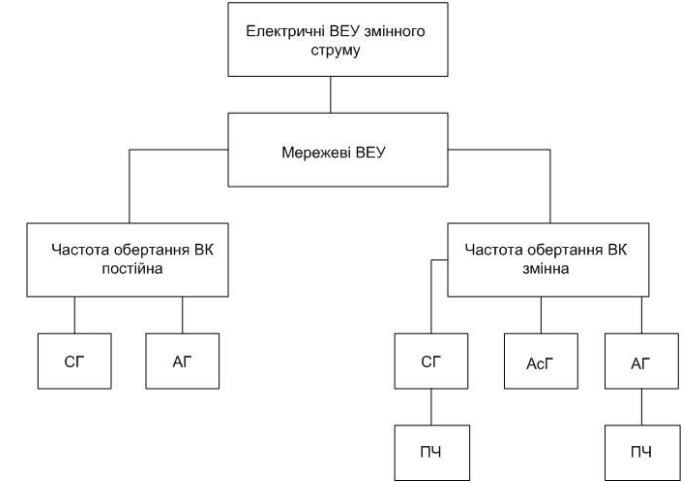


Рисунок 3 – Структурна схема мережевих вітроенергетичних установок: СГ – синхронний генератор; АГ – асинхронний генератор; АсГ – асинхронізований генератор; ПЧ – перетворювач частоти

Оцінювання недоліків і переваг розглянутих типів генераторів 9

Таблиця 1 – Оцінка переваг та недоліків типів роторів асинхронних генераторів

Тип ротора	Переваги	Недоліки
Асинхронний генератор з фазним ротором	Якісні регульовальні характеристики	Висока вартість, потребують кваліфікованого обслуговування, високі масогабаритні показники
Асинхронний генератор з короткозамкненим ротором	Легкість у виготовленні, відсутність механічного контакту зі статичною частиною машини, що гарантує довговічність і знижує витрати на обслуговування	Складність регулювання швидкості обертання

Оцінювання недоліків і переваг розглянутих типів генераторів

9a

Таблиця 2 – Оцінка переваг та недоліків розглянутих типів генераторів

Тип генератора	Переваги	Недоліки
Синхронний генератор	Витримує короточасні 3-кратні навантаження, підтримка напруги в мережі з високою точністю.	Низький ступінь захисту від зовнішнього впливу: пилу бруду, води; можливість перевантаження за струмом.
Синхронний генератор на постійних магнітах	Надійність, простота конструкції, надійне збудження, покращені вихідні характеристики, мала інерційність при перехідних процесах.	Висока вартість, великі масогабаритні показники і, як наслідок, обмежена величина потужності.
Асинхронізований синхронний генератор	Стійке перетворення кінетичної енергії в електричну, стабільна частота генерованої напруги.	Потужність збудження складає основну частину потужності навантаження, дорога система контролю та керування, через наявність ковзних контактів знижується надійність.
Генератор на постійних магнітах	Низька вартість кіловат-години, висока ефективність, можливо отримати велику потужність, міцна конструкція.	Трудомісткий, складний проект, що вимагає обробки на токарському верстаті, великі масогабаритні показники.
Асинхронний генератор	Низький коефіцієнт гармонік; стійкість до коротких замикань; забезпечують ефективний пуск електромоторів з великим стартовим струмом; незначний нагрів ротора, що дозволяє герметизувати внутрішню порожнину генератора; невисокі масогабаритні показники, вартість; проста конструкція; легкість обслуговування; низька вартість	Гірша, ніж у синхронних генераторів стабільність напруги на виході та здатність до пускових перевантажень.

Обґрунтування діаграми і математичних залежностей для ВЕУ з ВВО

10

Швидкість вітрового потоку

$$u = u_0 [1 + k_n \cos(\omega_u t + \beta_u)] \quad (6)$$

де u_0 – середнє значення швидкості вітрового потоку; k_n , ω_u – коефіцієнт і колова частота пульсацій швидкості вентиляційного потоку, які визначається за відомими залежностями: $k_n = 0,2 + 7,2/u_0$, $\omega_u = \pi \cdot 0,0038 u_0^{2,28}$

Потужність ВМЕ:

$$N = C_p \frac{\rho u_p^3}{2} D H \eta_{заг} \quad (7)$$

де C_p – коефіцієнт потужності; u_p – розрахункова швидкість вітру, м/с; ρ – густина повітря, кг/м³; $\eta_{заг}$ – що задається заздалегідь КПД; D – діаметр ВК; H – висота ВК.

Пусковий момент

$$M_{пуск} = C_M \rho u_p^2 D^2 H \quad (8)$$

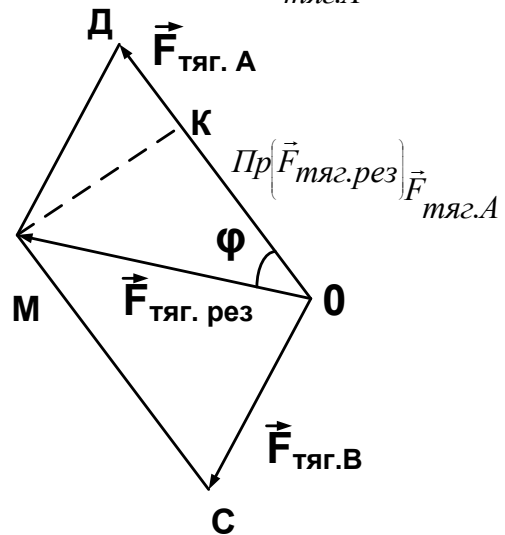
де C_M – коефіцієнт моменту; u_p – розрахункова швидкість вітру, м/с; ρ – густина повітря, кг/м³; D – діаметр ВК, H – висота ВК.

Напрямки дії сил і швидкості в різних точках ВК

б) Вітроколесо обертається проти годинникової стрілки

$$\vec{F}_{\text{тяг.А}} + \vec{F}_{\text{тяг.В}} = \vec{F}_{\text{тяг.рез}} = \vec{OM} \quad |\vec{F}_{\text{тяг.А}}| > |\vec{F}_{\text{тяг.В}}|$$

$$\text{Пр}(\vec{F}_{\text{тяг.рез}})_{\vec{F}_{\text{тяг.А}}} = |\vec{F}_{\text{тяг.рез}}| \cdot \cos\varphi > 0$$



$$\text{Пр}(\vec{F}_{\text{тяг.рез}})_{\vec{F}_{\text{тяг.А}}} = |OK|$$

$\text{Пр}(\vec{F}_{\text{тяг.рез}})_{\vec{F}_{\text{тяг.А}}}$ – проекція

результуючої сили тяги на напрямок дії сили тяги в точці А.

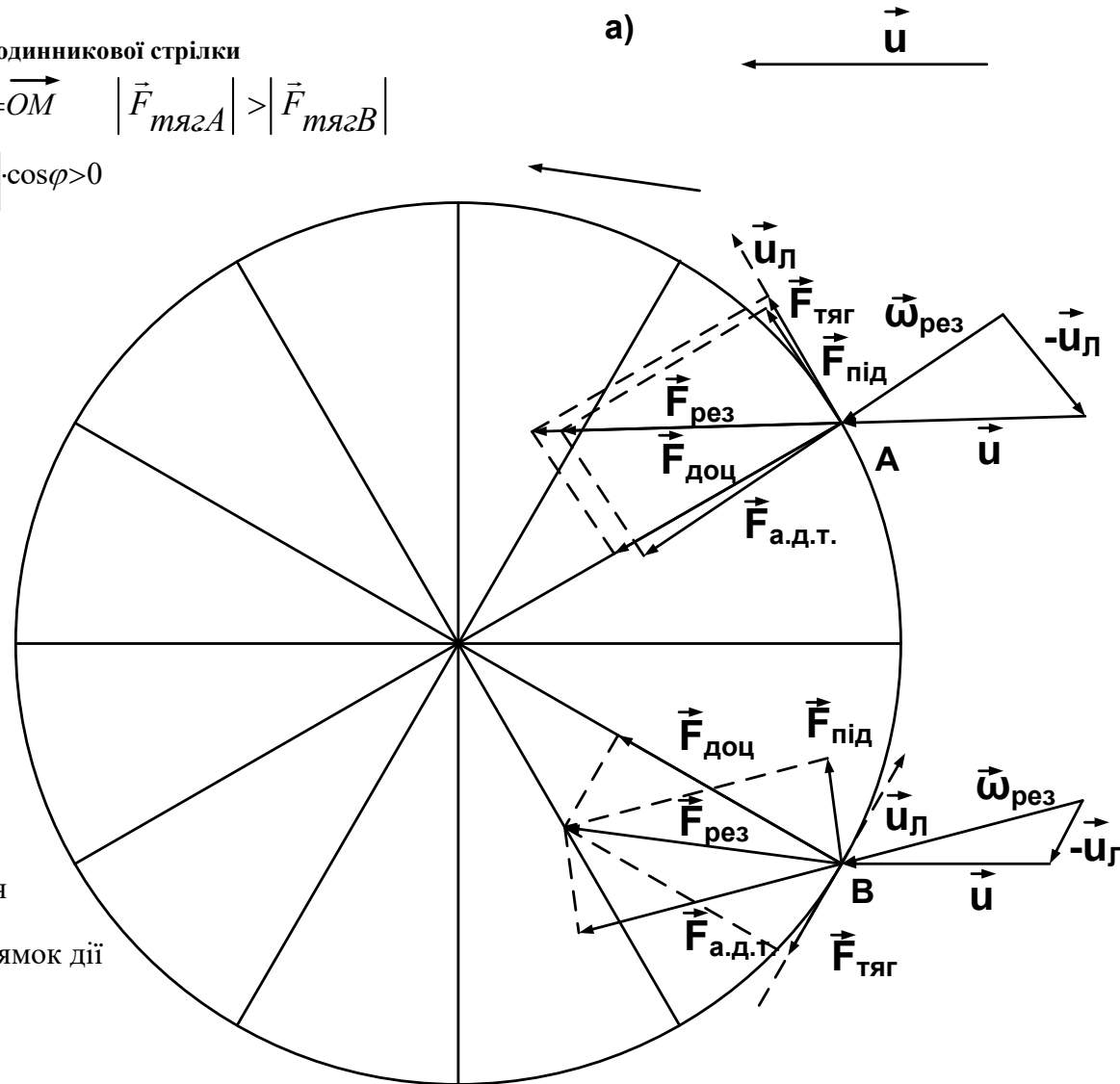


Рисунок 2.1 – Напрямки дії сил і швидкості в різних точках траєкторії:

- \vec{u} – швидкість вітру;
- $\vec{F}_{\text{тяг}}$ – сила тяги;
- $\vec{F}_{\text{під}}$ – підйомна сила;
- $\vec{F}_{\text{доц}}$ – доцентрова сила;
- $\vec{F}_{\text{а.д.т.}}$ – сила аеродинамічного тиску;
- $\vec{F}_{\text{рез}}$ – результуюча сила;
- $\vec{u}_{\text{л}}$ – лінійна колова швидкість;
- $\vec{\omega}_{\text{рез}}$ – кутова швидкість

Напрямки дії сил і швидкості в різних точках ВК

На рис. 2.1 зображено напрямки дії сил і швидкості в різних точках траєкторії (т. А і т. В)

Якщо $\vec{u} = \text{const}$ та $|\vec{F}_{доц}| = \text{const}$, $\vec{r}_n = R$, $\omega = \text{const}$, $\vec{r}_д = m\vec{\omega}$, то

$$\vec{r}_n - \vec{r}_{доц} = m\omega_n = \frac{mv^2}{R} \quad (9)$$

$$\vec{F}_\tau = m\omega_\tau \quad (10)$$

Результуюча сила тяги буде направлена в сторону увігнутості площини лопаті вітроколеса, тобто

$$\vec{F}_{тяг..рез} = \vec{F}_{тя.A} + \vec{F}_{тя.B} \quad |\vec{F}_{тя.A}| < |\vec{F}_{тя.B}| \quad (11)$$

Доцентрову силу тяги можна обчислити за формулою:

$$F_{доц} = C_R \cdot S \cdot \rho \cdot u_B^2 \quad (12)$$

Аеродинамічні характеристики вітроустановки 13 в умовах шахти

Потужність на валу ВК

$$P = \frac{\pi}{2} \rho R^2 u^3 C_p \quad (13)$$

де R – радіус ВК; u – швидкість повітряного потоку; ρ – середня густина повітря; C_p – коефіцієнт використання енергії вітру.

Момент на валу ВК

$$M = \frac{\pi}{2} \rho R^2 u^3 \frac{C_p}{z} \quad (14)$$

Середня потужність, вироблена ВМЕ

$$\bar{P} = M(P) = \int_0^{+\infty} P(V) \cdot f(V) dV \quad (15)$$

де $f(V)$ – функція розподілу швидкостей повітряного потоку.

$$\bar{P} = P_i \left[\frac{e^{-\left(\frac{u_1}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{u_0}{c}\right)^k}}{\left(\frac{u_0}{c}\right)^k - \left(\frac{u_1}{c}\right)^k} + \frac{e^{-\left(\frac{u_2}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{u_m}{c}\right)^k}}{\left(\frac{u_m}{c}\right)^k - \left(\frac{u_2}{c}\right)^k} \cdot (1-s) - s \cdot e^{-\left(\frac{u_m}{c}\right)^k} \right] \quad (16)$$

де k, c – параметри розподілення Вейбула, u_0 – швидкість запуску ВМЕ, u_1, u_2 – діапазон швидкостей повітряного потоку, при якому виробляється номінальна потужність, u_m – максимальна швидкість повітряного потоку для даної ВМЕ; s – коефіцієнт, рівний відношенню потужності при максимальній швидкості повітряного потоку до номінальної потужності ВМЕ.

Вибір місця розташування та потужності вітрогенераторних ліній електростанцій

Спряження квершлагів при швидкості вітрового потоку $u=8...15$ м/с $N_{vey} = 0,5\rho S u^3 E$ (17)

де E – коефіцієнт використання енергії вітру (КВЕВ), %; ρ – густина повітря, м³/кг; u – швидкість вітру, м/с; S – площа, описана лопатями вітрового колеса, м².

Площа, описана лопатями вітрового колеса $S = 2\pi Rb$ (18)

де R – радіус вітрового колеса, м; b – висота вітрового колеса, м.

Параметри для розрахунку вітрового генератора з горизонтальною віссю обертання (Pha):	Параметри для розрахунку вітрового генератора з вертикальною віссю обертання першого типу (бочка) (Pva):	Параметри для розрахунку вітрового генератора з вертикальною віссю обертання другого типу (Nvret):
<ul style="list-style-type: none"> – довжина лопаті – 0,8 м; – швидкість повітря – 5...15 м/с; – коефіцієнт використання енергії вітру – 20 %; – площа, описана лопатями, – 2,0096; – ККД генератора – 85 %; ККД редуктора – 90 %; густина середовища – 1,22 кг/м³. 	<ul style="list-style-type: none"> – ширина лопаті – 0,8 м; – висота лопаті – 1,5 м; – описана площа – 9,891 м²; – швидкість повітря – 5...15 м/с; – коефіцієнт використання енергії вітру – 20 %; – ККД генератора – 85 %; – густина середовища – 1,22 кг/м³. 	<ul style="list-style-type: none"> – ширина лопаті – 0,8 м; – висота лопаті – 1,5 м; – описана площа – 7,54 м²; – швидкість повітря – 5...15 м/с; – коефіцієнт використання енергії вітру – 20 %; – ККД генератора – 85 %; – густина середовища – 1,22 кг/м³.

Вибір місця розташування та потужності вітрогенераторних ліній електростанцій

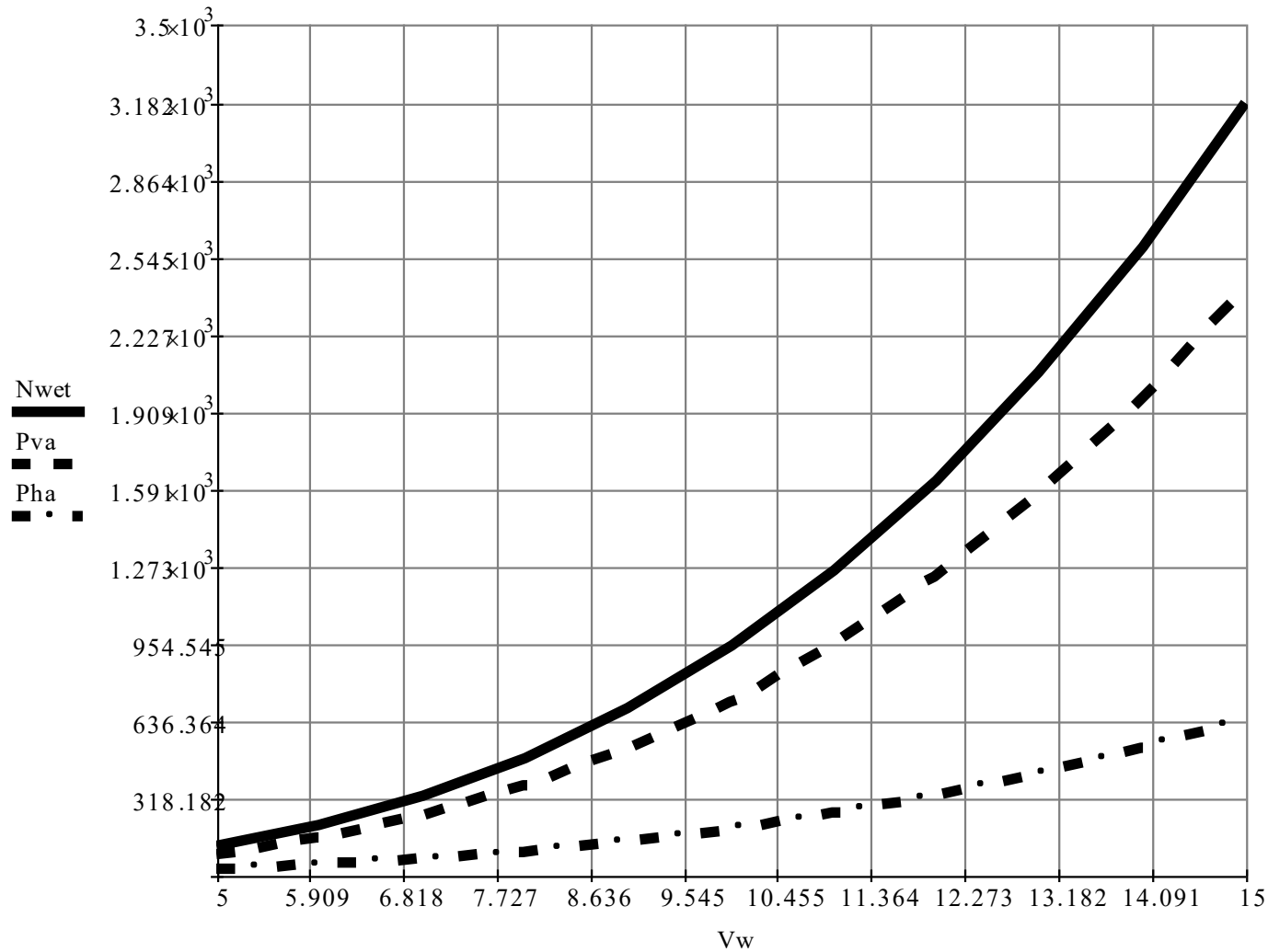


Рисунок – Графік залежності потужностей розглянутих вітрогенераторів від швидкості вітру: P_{ha} – вітрогенератор з горизонтальною віссю обертання, P_{va} – вітрогенератор з вертикальною віссю обертання типу «бочка»; P_{nwet} – вітрогенератор з вертикальною віссю обертання

Структурна схема автоматизованої системи керування АГ у складі електромеханічної частини вітроелектротехнічного комплексу 16

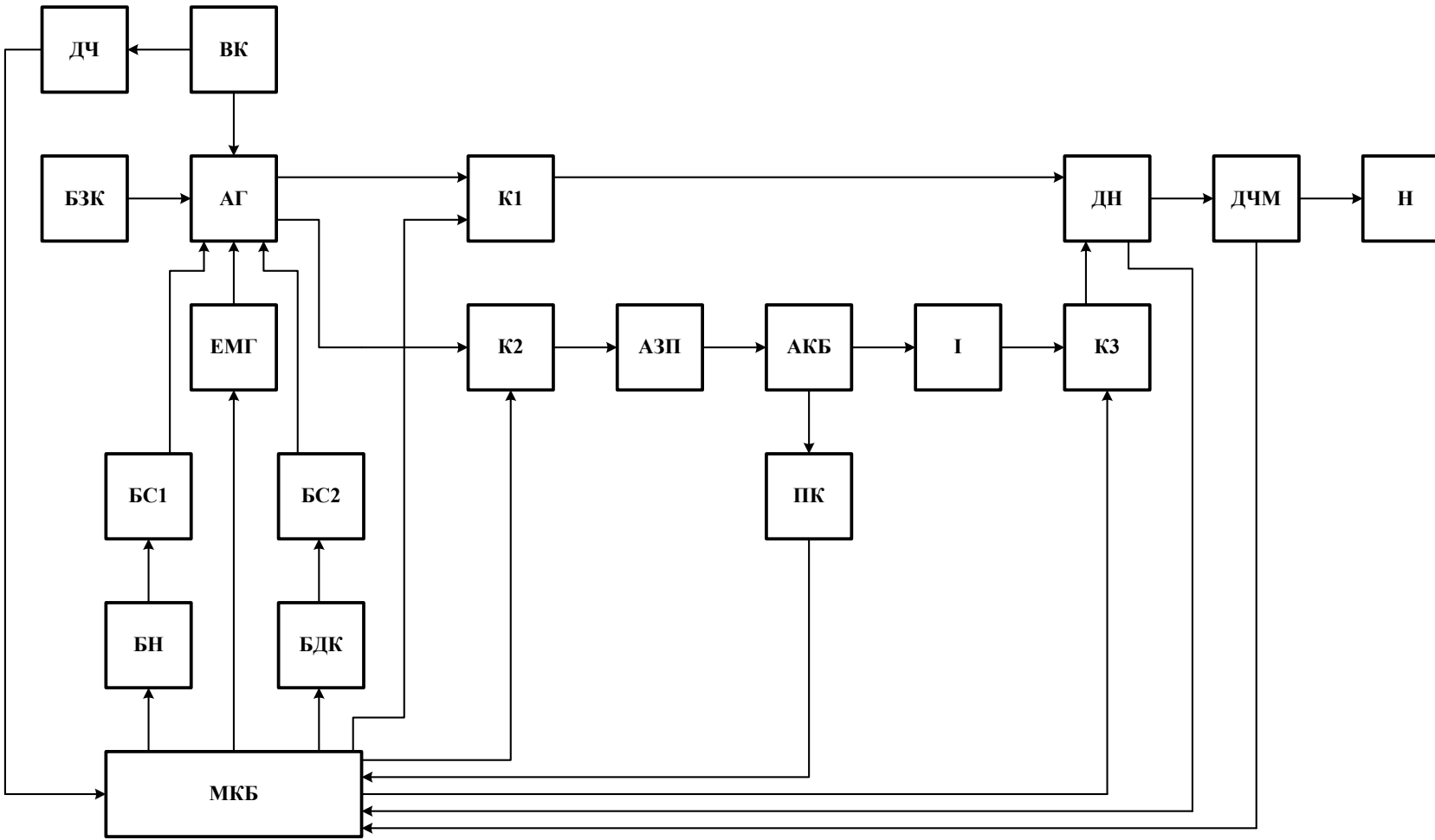


Рисунок – Структурна схема автоматизованої системи керування асинхронним генератором у складі електромеханічної частини вітроелектротехнічного комплексу: ВК – вітрове колесо; АГ – асинхронний генератор з короткозамкненим ротором; БЗК – батарея збуджуючих конденсаторів; ЕМГ – електромагнітне гальмо; ДН – датчик напруги; ДЧ – датчик частоти обертів ВК; ДЧМ – датчик частоти напруги мережі; АЗП – автоматичний зарядний пристрій; АКБ – акумуляторна батарея; ПК – пристрій контролю стану АКБ; І – інвертор; БДК – батарея додаткових конденсаторів; БН – баластне навантаження; БС1, БС2 – блок симісторів; МКБ – мікропроцесорний блок; К1-К3 – керовані комутатори; Н – навантаження.

Розробка законів керування

Математичну модель контуру підтримання заданої кутової швидкості вітрового колеса ВМЕ можна подати як:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\omega = \begin{cases} |\omega(t) - \omega_{opt}| - k_u \cdot u_{в.п.}(t), \text{ якщо } \frac{du_{в.п.}}{dt} < 0, \\ |\omega(t) - \omega_{opt}| + k_u \cdot u_{в.п.}(t), \text{ якщо } \frac{du_{в.п.}}{dt} > 0, \end{cases} \\ U_{завд}(t) = k_\omega \cdot \Delta\omega + \int_0^{2T} \Delta\omega dt. \end{array} \right. \quad (19)$$

де $\Delta\omega$ – різниця між заданим і поточним значенням кутової швидкості; ω_{opt} – значення оптимальної швидкості обертання; $\omega(t)$ – значення кутової швидкості в поточний момент часу; k_u – коефіцієнт передачі по швидкості вентиляційного повітряного потоку; $u_{вк}(t)$ – значення швидкості вентиляційного повітряного потоку в поточний момент часу; $u_{вк}$ – змінне за $2T$ значення швидкості вентиляційного повітряного потоку (усереднення за $2T$); $du_{вк}/dt$ – похідна від ковзного за $2T$ значення швидкості вентиляційного повітряного потоку; $U_z(t)$ – завдання напруги ВМЕ в поточний момент часу; k_ω – коефіцієнт передачі по кутовій швидкості обертання колеса; T – період обертання вітрового колеса

Розробка законів керування

Зовнішній контур представлений контуром регулювання напруги, вхідним сигналом для якого є $U_3(t)$. Його математичну модель подамо у вигляді:

$$\begin{cases} \Delta U = U_{завд.}(t) - (U(t) - k_I I_H(t)), \\ I_{упр.сигн.}(t) = k_{роб} \cdot \left(k_u \cdot \Delta U + \int_0^T \Delta U dt \right), \text{де} \begin{cases} \Delta U > 0, \text{ то } I_{\epsilon мн} \\ \Delta U < 0, \text{ то } I_{БН} \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

де ΔU – різниця між заданим і поточним значенням напруги; k_I – коефіцієнт передачі по струму навантаження; I_H – поточне значення струму навантаження вітрової мініелектростанції, А; $I_{\epsilon мн}$ – поточне значення ϵ мнісного струму вітрової мініелектростанції, А; k_u – коефіцієнт передачі по напрузі, $k_{роб}$ – дискретна величина, при якій можлива генерація електричної енергії при мінімально допустимій швидкості обертання ВК.

ВИСНОВКИ

В бакалаврській роботі обґрунтовано нове рішення актуальної наукової задачі для розробки системи автоматичного керування електротехнічним комплексом вітроенергетичної установки з адаптивним регулюванням стабілізованого рівня напруги на виході вітрової установки, та його технічною реалізацією в умовах залізорудних шахт.

За результатами виконаного дослідження, при написанні бакалаврської роботи отримані наступні результати:

1. Теоретично обґрунтовано доцільність застосування електромеханічного комплексу вітрової генеруючої установки в умовах підземних виробок залізорудних шахт. Показано, що найбільшого ефекту, від застосування вітрових електротехнічних комплексів з вертикальною віссю обертання вітрового колеса, можна досягти при їх застосуванні для електропостачання в умовах ЗРШ.

2. Побудовано векторні діаграми фізичних сил, що діють на вітрове колесо з вертикальною віссю обертання, під час його обертального руху та розглянуто аеродинамічні умови роботи вітрогенератора в умовах шахт.

3. Розроблений метод управління вихідною напругою асинхронного генератора з короткозамкнутим ротором, в складі вітрового електромеханічного комплексу дозволяє плавно регулювати значення вихідних параметрів генератора, при цьому система ВМЕ, буде відчувати найменші зміни швидкості вентиляційних потоків або величини навантаження.

ВИСНОВКИ

4. Запропоновано структуру ЕМК ВМЕ, яка дозволяє збільшити надійність і якість електропостачання споживачів, забезпечувати своєчасні заміни елементів, що вийшли з ладу, а також підтримувати безперебійність електропостачання споживачів електричної енергії.

5. Обґрунтовано та запропоновано використання у запропонованій системі керування ВМЕ ПІ-регулятора та нечіткого регулятора, які виконують керування ВМЕ по чергово, в залежності від швидкості повітряного потоку, що в свою чергу дозволяє здійснювати ефективне керування ВМЕ за різних умов.

6. З метою отримання якісної згенерованої електричної енергії, виробленої за допомогою електротехнічного комплексу ВМЕ, запропоновано керування на базі теорії нечітких множин.

7. Проведено дослідження, з використанням комп'ютерного моделювання, роботи ЕМК ВМЕ при збуреннях вітрового потоку, яке дозволило визначити характеристики ЕМК ВМЕ з використанням системи керування та без використання системи керування за однакових умов при постійному навантаженні.

8. Вперше в практиці використання ВЕУ з вертикальною віссю обертання, запропоновано структуру електромеханічного перетворювача з повітровідбивачем, для збільшення значення коефіцієнта використання вентиляційного повітряного потоку.