

Розділ 5

ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ В ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННІ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

5.1. Перетворення вітрової енергії безпосередньо в теплоту

© **Жарков В. Я.**

к.т.н., доцент, Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь, Україна

© **Жарков А. В.**

інженер, Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь, Україна

© **Галько С. В.**

к.т.н., доцент, Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь, Україна

У всьому світі питання енергозбереження стоїть все більш актуальним. Це не тільки економічна вигода для споживачів та зменшення навантаження на електричні мережі, а також, збереження навколишнього середовища для наших нащадків. Європейський Союз зобов'язався знизити своє щорічне споживання первинної енергії на 20 % до 2020 р. [39].

Згідно з вимогами Європейського Союзу, частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у національному енерговиробництві країн, що прагнуть до вступу в Європейське співтовариство, повинна становити не менше 6 %, або з врахуванням великої гідроенергетики – не менше 12 %. За попередніми розрахунками, у 2017 р. у світі було встановлено рекордні 160 ГВт потужностей з ВДЕ. З них 98 ГВт дають сонячні електростанції, 56 ГВт – вітрові [12].

За станом на кінець 2014 р. у всьому світі було встановлено 945000 малих ВЕУ потужністю 830 МВт [41]. Найбільша частка малих ВЕУ, як і раніше, знаходиться в трьох країнах: Китай – 41 % нових потужностей, США – 30 % і Великобританії – 15 %. Китай продовжує залишатися лідером [34] за доданими ВЕУ – близько 64000 од., досягнувши 689000 од., встановлених до кінця 2014 р.

WWEA прогнозує, що до 2020 р. загальна встановлена потужність малих ВЕУ у світі досягне 5 ГВт, а ринок нових невеликих ВЕУ – близько 1 ГВт [40].

У більшості розвинених країн заплановано у першій половині XXI ст. довести частку ВДЕ в загальному енергобалансі до 20 – 50 %. Адже енергонезалежність країни полягає у ефективності споживання енергоресурсів та диверсифікації джерел енергії [41].

Досягнення ж України у впровадженні ВДЕ важко назвати суттєвими [9]. У табл. 5.1 наведені встановлені потужності та генерація електроенергії з ВДЕ. Вони генерують менше 2 % електроенергії, що споживається в Україні, хоча у нас один з найбільш вигідних “зелених” тарифів серед європейських країн [12].

Таблиця 5.1

**Встановлена потужність та обсяг виробленої
електроенергії об'єктами ВДЕ України, 2010 – 2014 рр.**

Напрямок відновлюваної енергетики	Встановлена потужність, МВт					Виробництво електроенергії, млн. кВт-год.				
	2010 р.	2011 р.	2012 р.	2013 р.	2014 р.	2010 р.	2011 р.	2012 р.	2013 р.	2014 р.
Вітроенергетика	76,6	146,4	193,8	334,1	513,9	49,2	89	257,5	636,5	1171,5
Сонячна енергетика	2,5	188,2	371,6	748,4	818,9	0,5	30,1	333,6	562,8	485,2
Мала гідроенергетика	62,5	70,8	73,5	75,3	80,3	192,5	203,4	171,9	286	250,7
Біомаса	4,2	4,2	6,2	17,2	35,2	0,002	9,6	17,7	32,4	60,9
Біогаз	–	–	–	6,5	13,9	–	–	–	5	39,3
Всього	145,8	409,6	645,1	1181,5	1462,2	242,2	332,1	780,7	1522,7	2007,6

Джерело: [41]

Збільшення обсягів використання ВДЕ в енергетичному балансі України дасть змогу підвищити рівень диверсифікації джерел енергоносіїв, що сприятиме зміцненню енергетичної незалежності держави. Передбачається збільшення частки ВДЕ у загальному балансі встановлених потужностей до рівня близько 20 % в до 2020 р.; забезпечити більш широке залучення об'єктів інтелектуальної власності до процесу розвитку сфери ВДЕ [45].

При вирішенні питання узгодження потреб споживачів з можливостями ВДЕ значно поліпшиться енергобаланс приватних домогосподарств і Об'єднаної енергетичної системи України (ОЕСУ).

Окрім розвитку комерційної відновлюваної енергетики, в Україні є необхідність розвивати некомерційну, в першу чергу, “сільську”, “фермерську”, “для двору”. Такі самостійні невеликі системи служать децентралізації енергопостачання, дозволяють диверсифікувати джерела енергії, зробити більш енергонезалежною Україну, і фермерів зокрема [15].

На опалення і гаряче водопостачання у світі витрачається близько третини палива. Витратити високоякісну електричну енергію на отримання низькопотенційної теплоти (НПТ) протирічить здоровому глузду. НПТ необхідно отримувати від ВДЕ – за рахунок енергії вітру, Сонця, біомаси, теплових насосів (ТН) та когенераційних технологій з енергоефективними засобами їх реалізації [4].

В Швеції запатентована установка для отримання гарячої води. Вода циркулює в замкнутому об’ємі з досить високою швидкістю, при цьому енергія руху за рахунок тертя перетворюється в теплову енергію, і може бути досягнута висока температура води [32].

На о. Гримсей (біля північних берегів о. Ісландія) випробовувалася установка прямого перетворення енергії вітру в теплоту за допомогою водяного гальма [36]. Недоліком таких установок є їх громіздкість, що утрудняє їх використання у фермерських господарствах.

Більш прийнятною, на наш погляд, є вітротеплова установка (ВТУ), що перетворює енергію вітру в теплоту при переміщенні густої рідини через невеликі отвори або щілини [37]. До складу такої ВТУ входить ВЕУ і шестерінчастий насос, який переміщає в’язку рідину через малі отвори, нагріваючи її при цьому. Приведена порівняльна оцінка ефективності ВТУ з фіксованими розмірами отворів і регульованими отворами для переміщення рідини [37]. Відмічений позитивний досвід застосування ВТУ з вертикальною віссю обертання для обігріву і гарячого водопостачання теплиць площею 1000 м² в пункті з середньорічною швидкістю вітру 4,5 м/с за результатами річних її випробувань [38].

У ТДАТУ запропонований індукційний спосіб перетворення енергії вітру в теплоту, який вигідно відрізняється від попередніх, та установки для його реалізації [4]. Останні засновані на збудженні вихрових струмів в магнітопроводах (МП). Розроблено декілька конструкцій ВТУ з індукційним перетворювачем енергії вітру в теплоту (ПЕВТ), які захищені патентами України [15].

Перші ПЕВТ містили індуктор у вигляді індукційної обмотки збудження, розташованої на нерухомому кільцевому МП, збудженої постійним струмом, та рухомий кільцевий МП, жорстко зв’язаний з валом вітродвигуна (ВД), що обертається за рахунок енергії вітру [15]. Кільцеві МП установлені співвісно з фіксованим зазором між прилеглими торцями в резервуарі з теплоакumulюючою рідиною. У прилеглих торцях МП виконано по кільцевій канавці і радіальні пази з постійним кроком. За рахунок енергії вітру вал ВД, а разом з ним і рухомий МП обертаються. Зубці МП намагнічуються магнітним полем збудження в одному напрямі одночасно. Із-за зубцевої будови торців магнітний потік, що замикається через них, буде змінюватися в часі: магнітний потік збільшується, коли зубець рухомого МП розташовується над зубцем нерухомого, і буде зменшуватися, коли зубець рухомого МП буде розташований над пазом нерухомого. При цьому між зубцями МП змінюється зазор, а отже і магнітна індукція в ньому [4; 15]. Індукція в зазорі пульсує, не змінюючи знаку від $B_{\delta_{\max}}$ до $B_{\delta_{\min}}$. Її можна представити у вигляді двох складових:

змінної з амплітудою:

$$B_{\delta-} = 0,5 (B_{\delta_{\max}} - B_{\delta_{\min}}), \quad (5.1)$$

і постійної, рівної:

$$B_{\delta=} = 0,5 (B_{\delta_{\max}} + B_{\delta_{\min}}). \quad (5.2)$$

Змінна складова магнітного поля індукуює в магнітопроводах ЕРС і вихрові струми частотою:

$$f = Zn, \quad (5.3)$$

де Z і n – кількість зубців і частота обертання рухомого МП, с⁻¹.

Вихрові струми за законом Джоуля – Ленца нагрівають МП, а ті нагріватимуть теплоакumulюючу рідину в резервуарі, яка може використовуватися для обігріву споруд, парників та теплиць [4; 15].

Постійна складова магнітного потоку ніяких ЕРС не індукуює, тому ця частина магнітного потоку не приймає участі в перетворенні вітрової енергії в теплову. Чим більша швидкість вітру і швидкість обертання вала ВД, тим більшою буде величина і частота індукованої ЕРС і вихрових струмів, що нагрівають МП, тим більше теплоти виділятиметься в них, а останні нагріватимуть теплоакumulюючу рідину в резервуарі.

Для усунення ЕРС самоіндукції в індукційній обмотці збудження запропоновано збільшити кількість зубців в рухомому МП в число разів кратне двом по відношенню до нерухомого МП. В результаті, змінний магнітний потік в зазорі індукуює ЕРС тільки в рухомому МП. При цьому через обмотку збудження буде проходити постійний магнітний потік, який ЕРС в ній не індукуює [4; 15]. Недолік таких конструкцій ПЕВТ є його початкова інерційність із-за збільшення моменту зрушення ротора при залипанні намагнічених зубців.

Цей недолік усунений в запатентованому пат. 22765, малоінерційному ПЕВТ, що містить нерухомий індуктор (рис. 5.1) у вигляді нерухомих МП (рис. 5.1, а) ідентичного виконання з

зубчастою будовою прилеглих поверхонь та індукційними обмотками збудження, розташованими в кільцевих канавках своїх МП та дисковий ротор (рис. 5.1, б) з немагнітного електропровідного матеріалу, розташований між МП і жорстко зв'язаний з валом ВД [15].

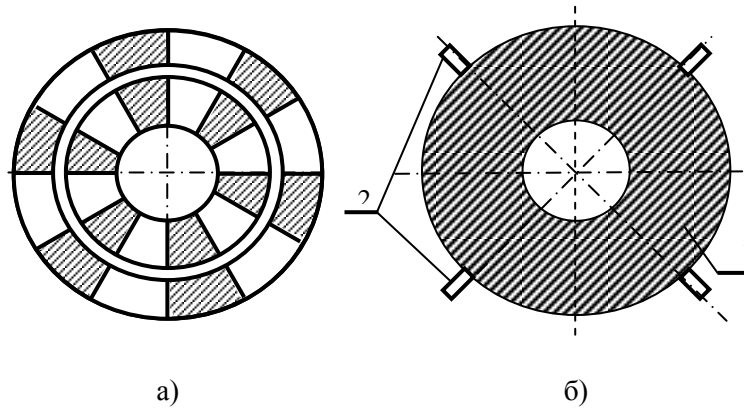


Рис. 5.1. Малоінерційний ПЕВТ, пат. 22765:

а) нерухомий МП з зубчастою поверхнею, б) дисковий ротор з лопатями

Джерело: авторська розробка

Проте виконання дискового ротора із немагнітного провідникового матеріалу призводить до збільшення магнітного опору магнітному потоку, що замикається через протилежні зубці магнітопроводів, а отже – до збільшення струму намагнічування індуктора [15]. Для усунення останнього недоліку запропоновано виконати дисковий ротор ПЕВТ в вигляді “Сандвічу” – сталюого диску із маловуглецевої сталі з відносно великою магнітною проникливістю, наприклад сталі 10, покритого з обох сторін шаром немагнітного матеріалу з високою електропровідністю, наприклад, сплаву на базі алюмінію чи міді (рис. 5.2).

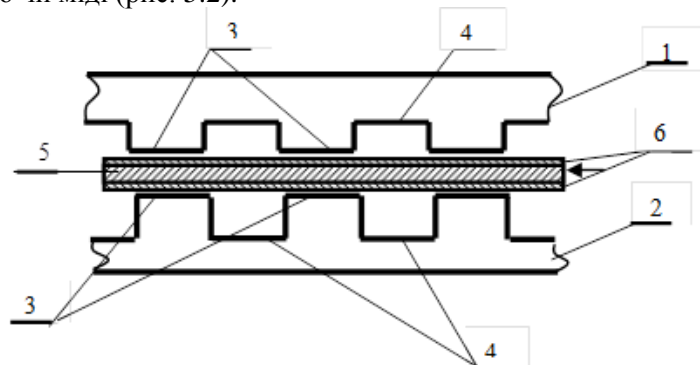


Рис. 5.2. Схематичне зображення малоінерційного ПЕВТ з ротором, пат. 22765

Джерело: авторська розробка

При обертанні дискового ротора 5 в його елементарних замкнутих контурах буде індукуватися вихрова ЕРС:

$$e = \frac{d\Phi}{dt}, \quad (5.4)$$

тобто ЕРС пропорційна швидкості зміни магнітного потоку Φ між полюсами 3 (зубцями) МП 1,2. Якщо ж розглядати наведення ЕРС в елементарних провідниках ротора 5, то буде справедлива формула:

$$e = Blv, \quad (5.5)$$

де Bl – активна довжина провідника, що рівна довжині полюса;

v – швидкість переміщення якоря відносно полюса.

Якщо величину магнітного потоку полюса Φ , що пронизує розглянутий контур, записати як:

$$\Phi = Blx, \quad (5.6)$$

а швидкість переміщення як:

$$v = \frac{dx}{dt}, \quad (5.7)$$

де x – координата переміщення якоря відносно полюса, то вирази (5.4) і (5.5) дадуть однакові результати.

Під дією елементарних ЕРС в якорі утворюються вихрові струми, які за законом Джоуля-Ленца нагрівають дисковий ротор (якір):

$$P = \frac{e^2}{R}. \quad (5.8)$$

Причому верхні шари ротора типу “Сандвіч” будуть нагріватися більш інтенсивно, оскільки вони виготовлені із матеріалу з більшою електропровідністю. Для покращення тепловіддачі і примусового переміщення теплоносія по ободу диска 1 розміщені лопаті 2 (рис. 5.1, б).

Для усунення динамічних навантажень на МП і фундамент запропоновано, нерухомий МП виготовляти з зубцями розташованими в шаховому порядку, розділеними канавкою на рівні за площею [15]. Якщо на зовнішні зубці нерухомого МП, установити додаткові обмотки збудження, з'єднати їх паралельно і через випрямляч підключити до кільцевої обмотки збудження, то отримаємо вітровий теплогенератор з самозбудженням, пат. 64568А [15].

Недоліком попередніх ВТУ з ППЕВТ є великі масогабаритні розміри. Вони придатні для обігріву парників та теплиць і проблематичні для обігріву інших сільськогосподарських будівель і житлових будинків.

Відома також ВТУ [33], запатентована в США, до складу якої входить електронагрівач, дія якого заснована на збудженні вихрових струмів. Вертикально розташований ротор електронагрівача приводиться в обертання від горизонтального вала крильчастого ВД через конічний редуктор, розміщеними на даху житлового будинку. Недоліком відомої ВТУ [33] є її низька надійність і негативний вплив на самопочуття мешканців, обумовлені розташуванням конструкції з конічним редуктором на даху житлового будинку.

Розроблений проточний коаксіальний вітроелектромеханічний нагрівач (рис. 5.3) містить [30] ВД 1 з вихідним валом 2, ППЕВТ 3 у вигляді рухомого МП 4 і нерухомого МП 5 циліндричної форми, розташованих коаксіально, з зубчатою будовою прилеглих поверхонь, і кільцевої обмотки збудження 6, розташованої в кільцевій канавці 7, підшипники 8, 9, які закріплені в підшипникових щитах 10, 11 з немагнітного матеріалу. На прилеглих поверхнях МП 4,5 розташовані повздовжні зубці 12, 13, утворені повздовжніми пазами 14, 15.

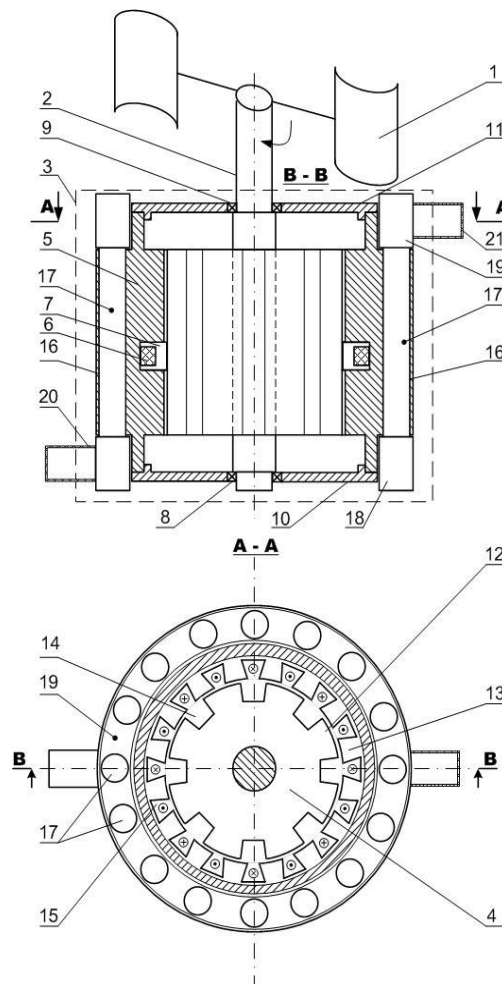


Рис. 5.3. Проточний коаксіальний вітроелектромеханічний нагрівач, пат. 118880
Джерело: авторська розробка

По периферії нерухомого МП 5 виконані крізні вертикальні отвори 16, в які поміщені охолоджувальні трубки 17 із антикорозійного матеріалу, герметично сполучені нижнім 18 і верхнім 19 трубчатими колекторами прямокутного перерізу з входним 20 і вихідним 21 патрубками холодної і нагрітої рідини (води). У пазах 15 нерухомого МП 5 розташовані якірні котушки 23, з'єднані паралельно і через регулювальний випрямляч 24 приєднані до обмотки збудження 11 (рис. 5.4).

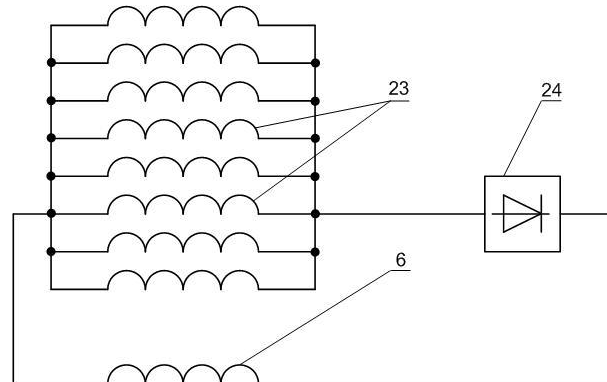


Рис. 5.4. Схема з'єднань обмоток збудження ПЕВТ, пат. 118880

Джерело: авторська розробка

Пристрій працює [30]. Перед установкою в експлуатацію МП 4, 5 намагнічуються ОЗ 6 від стороннього джерела живлення. Надалі МП залишаються в намагніченому стані за рахунок остаточного магнетизму. За рахунок енергії вітру вал 2 ВД 1 і рухомий МП 4 обертаються. Зубці 12, 13 МП 4,5 намагнічуються магнітним полем збудження в одному напрямі одночасно. Із-за зубчастої будови прилеглих поверхонь МП 4,5 магнітний потік, що замикається через них, не буде розподілятися рівномірно. Більша його частина проходить через ділянки, де зубець 12 рухомого МП 4 розташується проти зубця 13 нерухомого МП 5, а найменша – на ділянці, де зубець 12 МП 4 розташується проти паза 15 нерухомого МП 5. При цьому між зубцями 12 і 13 змінюється зазор, а отже і магнітна індукція B у ньому. В результаті цього крива розподілу магнітної індукції в зазорі між зубцями 12, 13 набуде пилковидного характеру. Змінний магнітний потік між зубцями МП 4,5 індукуює в якірних обмотках 23 ЕРС, в результаті чого сумарний випрямлений струм через регулювальний випрямляч 24 поступає на ОЗ 6 і додатково підмагнічує МП 4, 5 [30].

Для даного моменту часу в зазорі під зубцем 13 індукція має максимальне значення $B_{\delta \max}$. При обертанні рухомого МП 4, коли проти його зубця 12 розташується паз 15 нерухомого МП 5, індукція зменшиться до $B_{\delta \min}$. Отже, при обертанні рухомого МП 4, зв'язаного з валом 2 ВД 1, індукція в зазорі пульсує, не змінюючи знаку від $B_{\delta \max}$ до $B_{\delta \min}$. Її можна представити в вигляді двох складових: змінної з амплітудою $B_{\delta} \sim (1)$ і постійної $B_{\delta} = (2)$.

Змінна складова магнітного поля індукуює в МП 4,5 ЕРС і вихрові струми частотою f (3). Вихрові струми за законом Джоуля-Ленца нагрівають МП 4, 5 а нерухомий МП 5 за рахунок конвекції передає теплоту охолоджувальним трубкам 17 з проточною рідиною (водою), яка може використовуватися для обігріву споруд, миття посуду, для поливу рослин, або наповнювати резервуар.

Постійна складова магнітного потоку ніяких ЕРС не індукуює, тому ця частина магнітного потоку не приймає участі в перетворенні енергії вітру в теплоту. Виконання підшипникових щитів 10, 11 із немагнітного матеріалу виключає можливість шунтування магнітного потоку [30]. Для обґрунтування параметрів ПЕВТ досліджені зміни магнітного потоку Φ і магнітної індукції B у зубцях при різних параметрах магнітної системи [15].

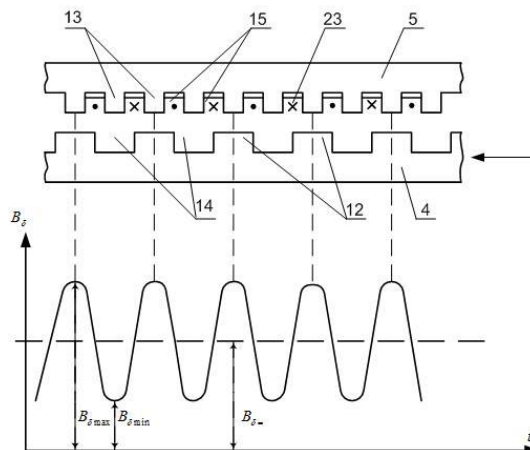


Рис. 5.5. Зміна магнітного потоку в повітряному зазорі, пат 118880

Джерело: авторська розробка

Для фізичного моделювання використаний електромагнітний макет магнітної системи і з'ємні пакети зубцевих зон з різною конфігурацією зубців набраних із електротехнічної сталі (рис. 5.6).

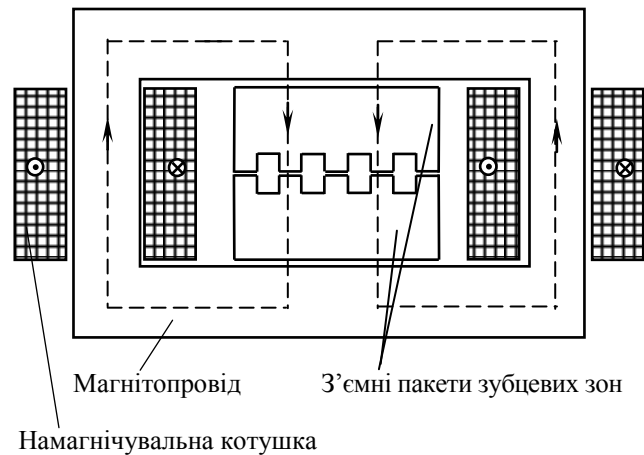


Рис. 5.6. Електромагнітний макет

Джерело: авторська розробка

Повітряний зазор між верхнім и нижнім пакетом можна змінювати від 0 до 10,5 мм, що відповідає δ_0 від 0 до 0,3. Дослідження проведені для зубцевих зон, які мали співвідношення в межах: $\delta_0 = \delta/\tau = 0,04 \dots 0,3$.

Потік у визначеній області створювався двома котушками при проходженні по них струму. Індукція в повітряному зазорі на ділянці зубцевого ділення 2τ визначалася балістичним методом. Під час дослідів положення одного зубця відносно іншого в межах одного зубцевого ділення змінювалося з дискретним кроком. Для кожного положення проводився замір індукції.

У літературі [4; 13] наведені залежності повного магнітного потоку зубцевого ділення в зазорі від переміщення зубців якоря відносно зубців індуктора при різних значеннях величини зазору δ , форми і ширини зубця b_{z0} : а) для прямокутного зубця $b_{z0} = 0,8$; б) для прямокутного зубця $b_{z0} = 1$; в) для трапецеїдального зубця з кутом нахилу $\gamma = 10^\circ$ і $b_{z0} = 0,715$. Оптимальна відносна ширина зубця знаходиться в досить вузьких межах: $b_{z0} = (0,65 \dots 0,8) \tau$.

Наведена зміна магнітної індукції B у зазорі для восьми положень зубців прямокутної форми шириною $b_{z0} = 0,715$, висотою $h_{z0} = 1$, при величині зазору $\delta_0 = 0,3$. Із рисунків [4; 13] видно, що магнітна індукція в зазорі пульсує від максимального значення $B = 0,5$ Тл, коли зубці МП розташовані один проти одного, до $B \approx 0,23$ Тл, коли зубець якоря розташований проти паза індуктора.

Проведена математична обробка [13] результатів виміру величини магнітного потоку в зазорі МП ПШВТ для безпосереднього перетворення енергії вітру в теплоту за рахунок збудження вихрових струмів. Розроблена комп'ютерна програма Lagrange, яка складається з одного файлу, і написана для консольної взаємодії [13].

Пронумеруємо залежності для різних величин зазорів δ_0 на рис. 5.6 від $r = 1$ до $r = 8$. Розглянемо одну із залежностей з індексом r . Нехай кількість дослідів для неї становило $nr + 1$. Припишемо кожному із цих дослідів індекс від 0 до nr . Отже, щоб кожному значенню переміщення x_{rk} ($k = 0, 1, 2, \dots, nr$) відповідав магнітний потік $f(x_{rk})$. Побудуємо поліном Лагранжа на $nr + 1$ вузлових точках x_{rk} і $f(x_{rk})$. Формула для полінома [13] має вид:

$$P_n(x) = \sum_{k=0}^n f(x_k) g_k(x), \quad (5.9)$$

де

$$g_k(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{nr} \frac{(x - x_j)}{(x_k - x_j)}. \quad (5.10)$$

Для виконання розрахунків складена програма на мові C++. Код програми містить: вихідний масив даних за результатом експериментів, тобто координати всіх вузлових точок x_{rk} і $f(x_{rk})$, $r = 1, 2 \dots 8$, x_{rk} ($k = 0, 1, 2, \dots, nr$); функцію для розрахунку магнітного потоку за формулою (5.4); процедуру для виводу інформації в вигляді таблиці; 4 процедуру для виводу інформації в вигляді графіка. Програма запускається через термінал, як і будь-яка подібна програма, наступним чином: Lagrange, і на екрані з'являється таблиця залежності магнітного поля від переміщення зубців для фіксованого зазору δ . Нижче неї буде запропоновано ввести значення зміщення, після чого буде розраховано

величину магнітного потоку при фіксованих зазорах. Далі пропонується ввести значення зазору, після чого програма розрахує для заданого переміщення та зазору величину магнітного потоку. Потім програма пропонує повторити ввід даних або завершити свою роботу.

Тестування програми проводилося на прикладі побудови полінома Лагранжа для функції $y = \sin(x)$. Тестові іспити показали, що при інтерполюванні функції поліномом (5.9) забезпечується точність до 6-го знака. У табл. 5.2 наведені результати розрахунків залежностей магнітного потоку для зазору $\delta_0 = 0,25$.

Таблиця 5.2

Залежність величини магнітного потоку від переміщення зубців для $\delta_0 = 0,25$

x_i , мм	0	5,2	7,8	15,0	20,0	25,4	30,0
y_i (експ.)	22,0000	–	–	20,0000	19,0000	–	17,0000
y_i (розрах.)	22,0000	21,5603	21,2233	20,0000	19,0000	17,8913	17,0000

Джерело: розрахунки авторів

Із даних табл. 5.2 видно, що розрахункові значення магнітного потоку y_i (розрах.) у вузлових точках $x_i = 0, 15, 20$ і 30 співпадають з експериментальними даними y_i (експ.), тому розроблений алгоритм може бути використаний при аналізі конструкції магнітної системи ІПЕВТ для вітрового теплогенератора.

Отримані результати можуть бути використані при побудові імітаційної моделі магнітопроводів та обґрунтуванні їхньої конструкції.

Методика розрахунку параметрів ІПЕВТ:

1. Вибір габаритних розмірів ІПЕВТ: товщини МП h_m , зовнішніх діаметрів D_3 і зазору δ між ними проводиться на основі теплотехнічних розрахунків, з урахуванням необхідної потужності і допустимої температури нагріву МП [15].

2. Вибір параметрів зубців. Оптимальна кількість зубців індуктора:

$$Z = (0,022 \dots 0,034) D_3 / \delta. \quad (5.11)$$

Відношення ширини паза b_n до кроку зубців t_z вибирають в межах:

$$b_n / t_z = 0,65 \dots 0,55. \quad (5.12)$$

А, знаючи крок зубців t_z , знаходять ширину паза:

$$b_n = (0,65 \dots 0,55) t_z. \quad (5.13)$$

Для дискових МП з радіальними зубцями крок зубців в градусах визначається за виразом:

$$t_z^{\circ} = 360 / Z. \quad (5.14)$$

Тоді ширина паза b_n в градусах буде:

$$b_n^{\circ} = (0,65 \dots 0,55) t_z, \quad (5.15)$$

а ширина зубця:

$$b_z^{\circ} = t_z^{\circ} - (0,65 \dots 0,55) t_z. \quad (5.16)$$

Глибину паза рекомендується брати із співвідношення:

$$h_n = (30 \dots 40) \delta. \quad (5.17)$$

3. Визначення оптимальних розмірів обмотки збудження. Економічно оптимальним співвідношенням між лінійними розмірами “міді” і “сталі” є $(0,37 \dots 0,4)$ [15]. Тоді оптимальна ширина кільцевої канавки для обмотки збудження:

$$b_k = (0,37 \dots 0,4) l_z, \quad (5.18)$$

де l_z – довжина радіального зубця.

Оптимальна глибина кільцевої канавки в МП:

$$A = (0,37 \dots 0,4) h_m, \quad (5.19)$$

для того, щоб магнітна індукція в зовнішніх і внутрішніх зубцях індуктора була однаковою, кільцева канавка повинна ділити зубці за площею навпіл:

$$S_1 = S_2 = S_z / 2. \quad (5.20)$$

5.2. Теплонасосна технологія

© **Жарков В. Я.**

к.т.н., доцент, Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь, Україна

© **Жарков А. В.**

інженер, Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь, Україна

© **Галько С. В.**

к.т.н., доцент, Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь, Україна

У багатьох розвинених країнах використання ТН є одним з ефективних напрямів політики енергозбереження. Значне розповсюдження отримали ТН в локальних системах опалення: США – 600 тис., Канада – 136 тис., Швеція – 200 тис., Німеччина – 40 тис., Японія та інші країни. За прогнозом Світового енергетичного комітету до 2020 р. використання ТН для опалення і гарячого водопостачання складе 75 % [42].