

## 5.3. Когенераційна технологія перетворення енергії вітру

© 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 даний час у всьому світі велика увага приділяється процесам когенерації, що забезпечує комбіноване (сумісне) виробництво електричної і теплової енергії від одного джерела [4].

Перед власниками невеликих ВТУ постає проблема: що робити з вітровою електроенергією, коли в теплоті немає потреби, а вітер дме. Разом з тим, близько 40 % енергії селянинові потрібні у вигляді НПТ. Для реалізації когенераційної технології в ТДАТУ запатентована, пат. 64568, присадибна когенераційна ВЕУ на базі ШПЕВТ з самозбудженням [15]. Її достоїнством є автономність і можливість одночасно генерувати НПТ і електричну енергію, наприклад, для обігріву і освітлення приватного парниково-тепличного господарства, залежно від потреби в них [2; 6].

Когенераційний вітропарк [28] містить декілька ВТУ з ШПЕВТ 1 (рис. 5.11) і, принаймні, один автономний вітроелектрогенератор (ВЕГ) з випрямлячем змінного струму [10]. Кожна ВТУ 1 містить ВД 4 та ШПЕВТ 5, який складається з нерухомих сталевих МП 6,7 з зубчастою будовою прилеглих дзеркально розташованих торцевих поверхонь і індукційними обмотками збудження 8 в кільцевих канавках 9 кожного МП. На вихідному валу 10 ШПЕВТ 5 жорстко закріплений металевий дисковий ротор 11 з можливістю вільного обертання між нерухомими, співвісно розташованими МП 6, 7 в циліндричному резервуарі 12 з теплоакмулюючою рідиною (рис. 5.11).

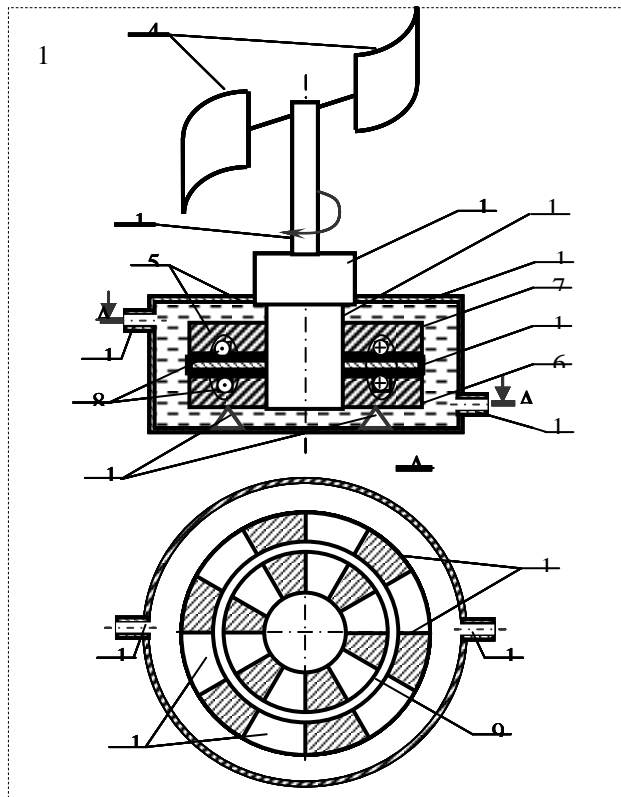


Рис. 5.11. Будова ШПЕВТ когенераційного вітропарку, пат. 116602

*Джерело: авторська розробка*

Металевий дисковий ротор 11 виконаний із маловуглецевої сталі з високою магнітною проникливістю, покритий з обох боків шаром металу з високою електропровідністю. МП 6, 7 і дисковий ротор 11 установлені співвісно і поміщені в циліндричний резервуар 12 з вхідним 15 та вихідним 16 патрубками. Резервуар 12 виготовлений із немагнітного матеріалу, наприклад, із термопластика, і заповнений рідиною. Зубчасті поверхні прилеглих торців МП 6, 7 розташовані дзеркально (тобто зуб проти зуба, а паз проти паза), а їхні ОЗ збуджені постійним струмом в одному напрямку. МП 6, 7 закріплені в циліндричному резервуарі 12 на опорах 19.

Малопотужний вітроелектрогенератор, пат. 116122 [23], зі здвоєним дводисковим ротором спрощеної конструкції містить (рис. 5.12) співвісно розташовані дводисковий ротор 5, 6 з сталевим магнітопроводом, з'єднаний з вихідним валом 12 ВД, і дисковий статор 8 з якірними котушками 9 без осердя, перший диск ротора виконаний багатополосним з рівномірно закріпленими по колу на периферії диска постійними магнітами 7 з чергуванням полюсів, а статор з якірними котушками розташований з повітряним зазором між дисками ротора, згідно корисної моделі, другий диск ротора (нижній) 6 виконаний у вигляді сталевий пластини. Статор 8 виготовлений у вигляді пластмасового диска, наприклад, бакелітового, з розташованими по внутрішньому периметру плоскими якірними котушками 9 трапецеїдальної форми, залитих компаундом, котушки з'єднані згідно послідовно; використані неодимові магніти [14].

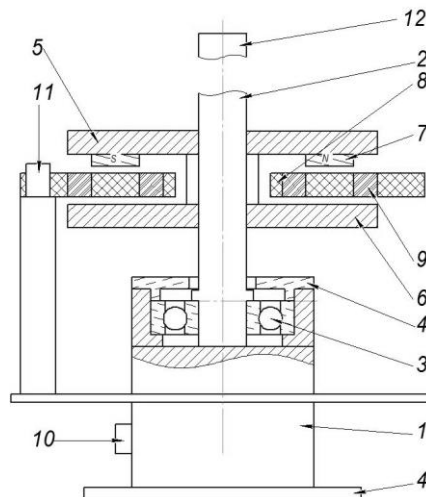


Рис. 5.12. Малопотужний ВЕГ зі здвоєним ротором спрощеної конструкції, пат. 116122

*Джерело: авторська розробка*

Виконання ротора багатополосним забезпечує збільшення частоти генерованої ЕРС, тобто обійтися без мультиплікатора. Рівномірне закріплення по колу на периферії першого роторного диска постійних магнітів забезпечує надійне збудження магнітного поля і стабільність частоти генерованої ЕРС в якірних обмотках. Виконання другого диска ротора у вигляді сталевий пластини забезпечує спрощення конструкції, зменшення кількості магнітів, габаритів і вартості конструкції. Виконання статорного диска пластмасовим, усуває втрати на нагрів диска, зменшує момент зрушення, що розширює діапазон робочої швидкості вітру. Розташування якірних обмоток на нерухомому статорі дозволяє уникнути рухомих контактів, а отже, підвищити ККД і надійність генератора. Виконання якірних котушок без осердя і сталевий магнітопроводу забезпечує зменшення моменту зрушення генератора, а отже – його запуск при незначній швидкості вітру. Виготовлення якірних котушок плоскими трапецеїдальної форми покращує компактність статора, збільшує коефіцієнт використання об'єму статора, а отже сприяє зменшенню габариту і маси генератора. З'єднання якірних котушок згідно послідовно забезпечує збільшення ЕРС в обмотках генератора. Використання потужних неодимових магнітів сприяє зменшенню габариту і маси генератора.

Пристрій працює наступним чином [17]. Вихідний вал 11 ВД, що приводиться у рух вітром, передає обертовий момент через кінематичний зв'язок валу 2, який, у свою чергу, обертає закріплені на ньому сталевий роторні диски 5 з закріпленими на них постійними неодимовими магнітами 6 [14]. Так як магніти 6 розташовані дзеркально з різнойменними полюсами один до одного, то створюють потужний магнітний потік, який замикається через сталевий статорні диски 5 і плоскі якірні котушки 8. При обертанні роторних дисків магнітний потік постійних магнітів по черзі пронизує якірні обмотки 8 і індукуює в них ЕРС. Для збільшення вихідної ЕРС якірні котушки 8 з'єднані згідно послідовно в обмотки, кінці яких виведені на клемну коробку.

Напряга з статорної обмотки ВЕГ надходить на діодний міст 31 випрямляча змінного струму 3, пульсація струму згладжується конденсатором 32. Температура навколишнього середовища через датчик 35 контролюється блоком регулювання 34. Коли температура середовища нижче від уставленого значення блок регулювання 34 відкриває електронний ключ 33 і регулює ним струм в ОЗ 8 ШПЕВТ 5, в залежності від відхилення температури середовища від уставленого значення (рис. 5.13). Сталевий диски

6,7 ШЕВТ 5 намагнічуються магнітним полем збудження в одному напрямі одночасно. Із-за зубчастої будови торців сталевих дисків 6, 7 магнітна індукція в зазорі буде неоднорідною і матиме пилкоподібний вигляд: від мінімального значення  $B_{\text{мін}}$  між пазами 17 до максимального значення  $B_{\text{макс}}$  між зубцями 18.

Цей генератор може бути однофазним (всі обмотки з'єднані послідовно) або трифазним (три групи обмоток). Останній варіант кращий, оскільки в такому разі буде більш висока частота струму при однаковій частоті обертання ротора. З'єднані попередньо згідно обраної схеми обмотки (переважно в "зірку") укладають у спеціально заготовлену форму і заливають для скріплення компаундом.

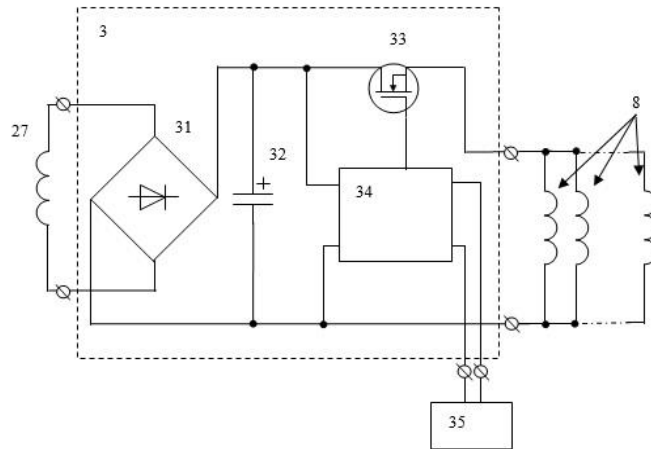


Рис. 5.13. Керований випрямляч для живлення ОЗ ШЕВТ, пат 116602

Джерело: авторська розробка

Використання багатополосного синхронного ВЕГ [17] із збудженням від постійних неодимових магнітів [14] дозволяє обійтися без додаткового мультиплікатора і без електромашинного збуджувача, що підвищує надійність і загальний ККД ВЕГ. Задача проектувальника полягає у визначенні величини проміжку та параметрів якірної котушки при наявній кількості магнітів.

Відомо, що в невеликих ВЕУ найбільш розповсюджені багатополосні генератори з постійними магнітами [35, с. 312 – 314]. Перевагою машин з постійними магнітами є простота конструкції, відсутність контакту ковзання, високий ККД і менше нагрівання із-за відсутності втрат в обмотці збудження і в контактні ковзання [34].

Розроблено і запатентовано декілька конструкцій ВЕГ з аксіальним магнітним полем на неодимових магнітах [104467, 116122, 116482, 116497, 116510, 116576]. На рис. 5.14, 5.15, 5.16 зображені деякі з них.

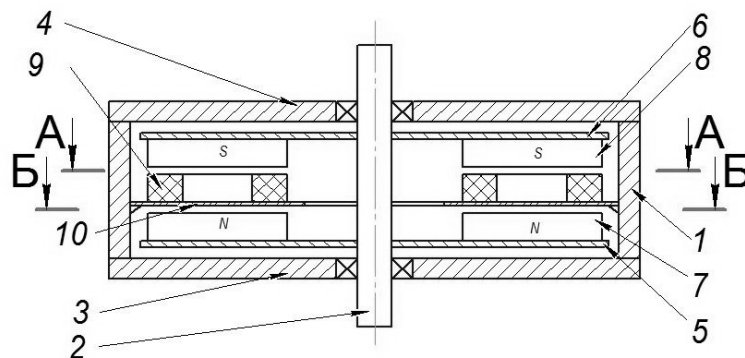


Рис. 5.14. Малопотужний ВЕГ з дводисковим ротором, пат. 116482

Джерело: авторська розробка

Недоліком масових ВЕУ з одним генератором, розрахованому на свій діапазон робочого вітру, є недовикористання енергії вітру, при іншій швидкості вітру. Це призведе до відхилення його швидкості  $Z$  від оптимальної величини  $Z_{\text{опт}}$  і до зменшення коефіцієнта використання енергії вітру  $C_p$  [35, рис. 9.12].

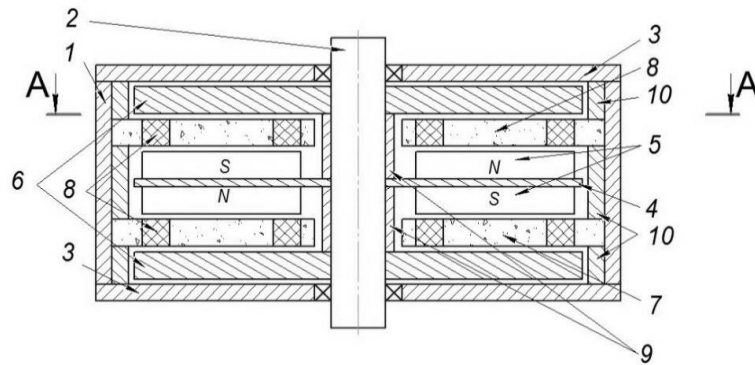


Рис. 5.15. Двостаторний ВЕГ з дисковим з'явним ротором, пат. 116510

Джерело: авторська розробка

В основу корисної моделі за пат. 116497 [25] поставлена задача створення ВЕУ (рис. 5.16) з розширеним діапазоном використання енергії вітру за рахунок зміни кількості полюсів статорної обмотки, залежно від швидкості вітру: збільшення кількості полюсів статорної обмотки вдвоє при кожному подвоєнні швидкості вітру, і навпаки, зменшення кількості полюсів вдвоє при відповідному зменшенні швидкості вітру шляхом перекомутації статорної обмотки ВЕГ.

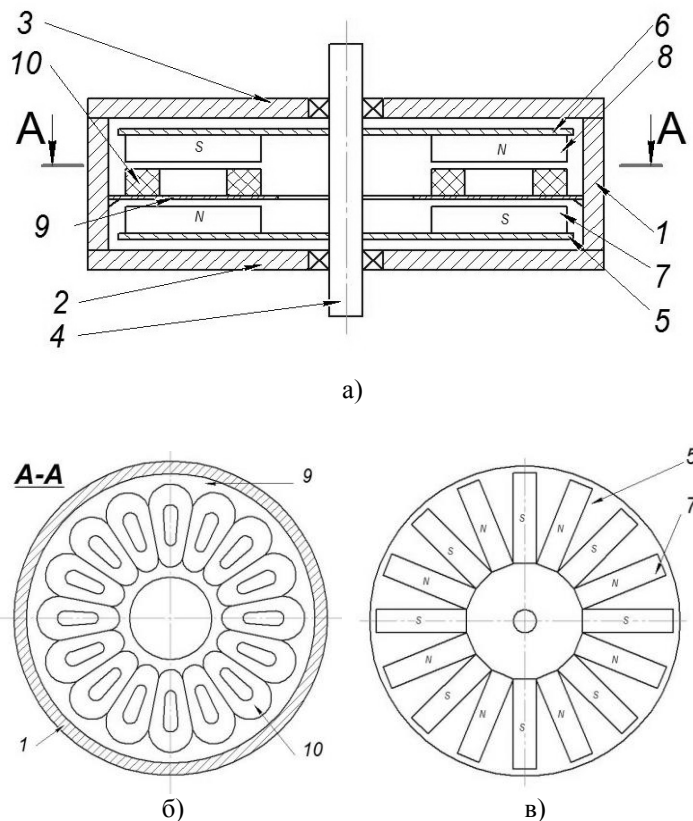


Рис. 5.16. ВЕГ зі здовбеним ротором, пат. 116497:

а) будова ВЕГ, б) статор, в) багатополосний ротор з неодимовими магнітами

Джерело: авторська розробка

Корисна модель [25] складається з циліндричного корпусу 1, закритого підшипниковими щитами 2, 3, вала 4, дводискового багатополосного ротора 5, 6 з неодимовими магнітами 7, 8, бакелітового статорного диска 9 з якірними котушками 10, груп комутаційних контактів 11, 12, 13 (рис. 5.17).

ВЕУ працює наступним чином [25]. При появі вітру вал 4, з'єднаний з вихідним валом ВД, установлений в підшипникових щитах 2, 3 циліндричного корпусу 1, починає обертатися разом з дводисковим багатополосним ротором 5, 6. Обертове магнітне поле неодимових магнітів 7, 8, закріплених відповідно на нижньому 5 і верхньому 6 сталевих дисках, по черзі пересікають якірні котушки 10, установлені на бакелітовому статорному диску 9, закріпленому в корпусі 1, генеруючи в них ЕРС. Узгоджене послідовне з'єднання шістнадцяти якірних котушок забезпечує збільшення ЕРС в статорній обмотці 10. Частота цієї ЕРС залежить від кількості пар полюсів і частоти обертання ротора.

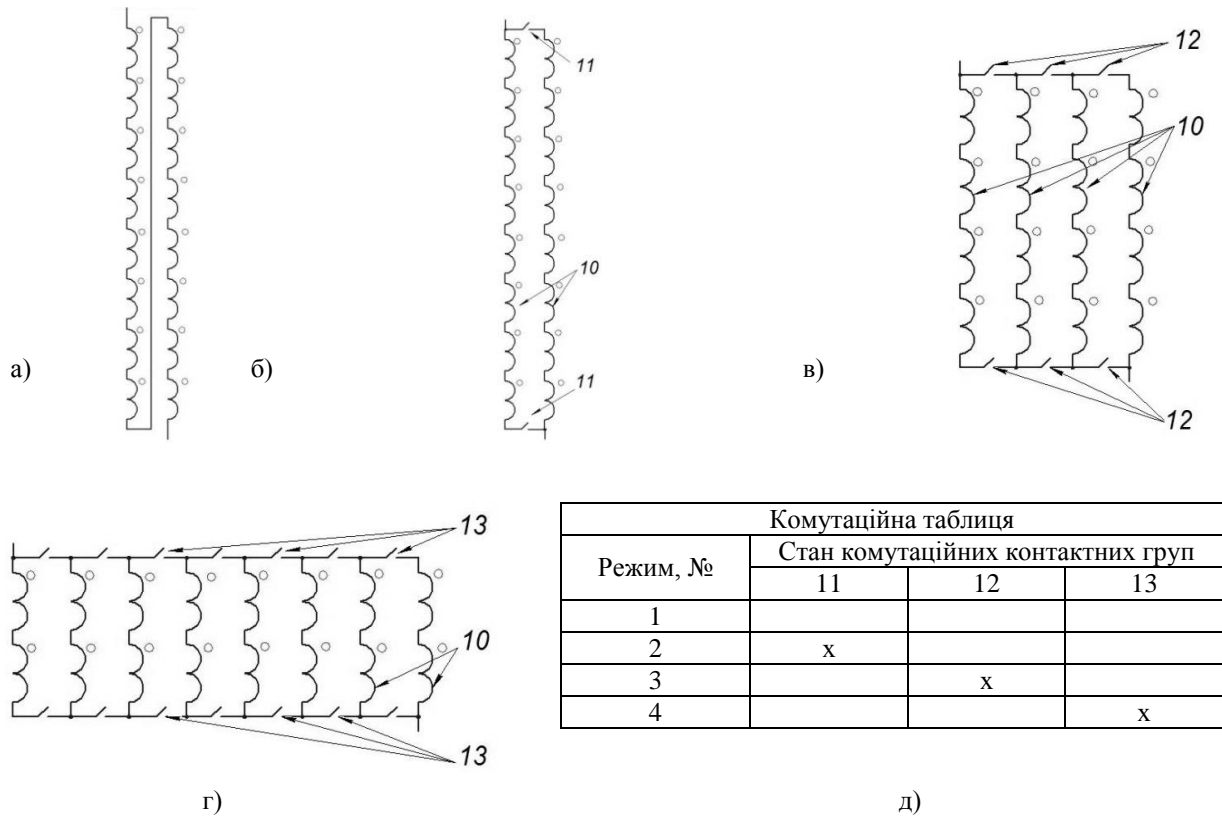


Рис. 5.17. Схема перекомутації котушок статорної обмотки, пат. 116497

Джерело: авторська розробка

Для отримання стандартної частоти 50 Гц для восьми пар полюсів (рис. 5.17, а) необхідно мати частоту обертання ротора:

$$N = 60 f/P = 60 \cdot 50 / 8 = 375 \text{ хв}^{-1}.$$

Чим більша кількість пар магнітних полюсів, тим менша потрібна частота обертання ротора. При незначній швидкості вітру вал 4, а з ним і дводисковий ротор 5, 6 починає обертатися, магнітне поле кожної пари магнітів 7, 8 по черзі пересікають витки 16-полюсної статорної обмотки 10, індукуючи ЕРС в кожній з шістнадцяти якірних котушок (режим 1 на рис. 5.17, д).

Бакелітовий статорний диск 9, на якому закріплені епоксидною смолою якірні котушки 10, забезпечує міцність конструкції. При збільшенні швидкості вітру вдвоє надходить сигнал від датчика швидкості 28 на електромагнітне реле комутаційного апарата (не показано), замикається група контактів 11, утворюючи дві паралельні гілки по вісім якірних котушок (режим 2). Частота обертання зростає до  $750 \text{ хв}^{-1}$ . При подальшому збільшенні швидкості вітру замкнеться група комутаційних контактів 12, потім – 13, і частота обертання ротора досягне максимальної величини  $3000 \text{ хв}^{-1}$ . При зменшенні швидкості вітру, навпаки – кількість якірних котушок в кожній гільці збільшується: 2 : 4 : 8 : 16 (рис. 5.18), а частота обертання ротора, відповідно, зменшується (режими 4; 3; 2; 1) до мінімальної величини.

Отже, корисна модель забезпечує розширення діапазону робочої швидкості вітру, збільшення коефіцієнта використання енергії вітру  $C_p$ , [35, с. 276 – 277] спрощення і здешевлення конструкції:

1. ВЕУ зі зміною частоти обертання перекомутацією статорної обмотки, що містить співвісно розташовані дводисковий багатополіусний ротор з постійними магнітами, дзеркально розташованими один до одного різномісними полюсами, і дисковий статор з декількома якірними котушками без осердя, з'єднаними в статорну обмотку, закріплені на периферії статорного диска, розташованого з зазором між дисками ротора, яка відрізняється тим, що статорна обмотка містить парну кількість якірних котушок і контакти для зміни кількості паралельних гілок з окремих груп послідовно з'єднаних якірних котушок при суттєвій зміні швидкості вітру.

2. ВЕУ зі зміною частоти обертання перекомутацією статорної обмотки за п. 1, яка відрізняється тим, що статорна обмотка містить  $n$  якірних котушок, кратне 4, і декілька груп комутаційних контактів для подвоєння кількості паралельних гілок з послідовно з'єднаних якірних котушок шляхом з'єднання їх в групи при кожному подвоєнні швидкості вітру, і навпаки.

3. ВЕУ зі зміною частоти обертання перекомутацією статорної обмотки за будь-яким з пп. 1, 2, яка відрізняється тим, що статорна обмотка містить 16 котушок і декілька груп комутаційних контактів для зміни кількості полюсів статорної обмотки у співвідношенні 16 : 8 : 4 : 2 шляхом подвоєння кількості паралельних гілок з послідовно попарно з'єднаних якірних котушок при кожному подвоєнні швидкості вітру у співвідношенні 1 : 2 : 4 : 8, і навпаки.

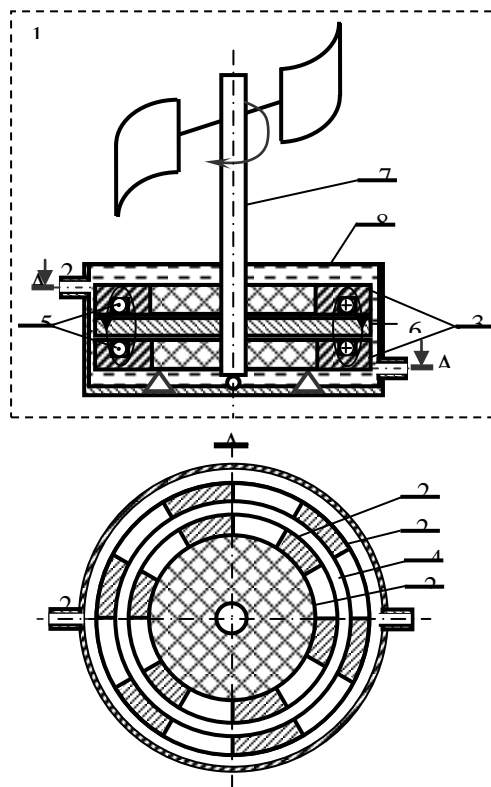


Рис. 5.18. Будова ППЕВТ підвищеної продуктивності, пат. 123117

*Джерело: авторська розробка*

Когенераційний вітропарк підвищеної продуктивності.

Недоліком описаного в п. 3.1 когенераційного вітропарку [28], взятого за прототип, є низька продуктивність ППЕВТ із-за малої ЕРС в металевому роторі, обумовлена його малою окружною швидкістю за малого діаметра, і малий діапазон робочої швидкості, обумовлений незмінною кількістю полюсів статорної обмотки, відхиленням швидкохідності  $Z$  від оптимальної величини  $Z_{\text{опт}}$  і, відповідно, до зменшення коефіцієнта використання енергії вітру  $C_p$  [35, с. 276 – 277].

В основу пат. 123117 поставлена технічна задача створення когенераційного вітропарку підвищеної ефективності [31], шляхом збільшення індукованої ЕРС в металевому диску за рахунок збільшення діаметрів активної зубчастої зони нерухомих дискових МП кільцевої форми і металевого дискового ротора, а також розширення діапазону ефективного використання вітрової енергії і коефіцієнта  $C_p$  [35, с. 276 – 277] за рахунок зміни кількості полюсів статорної обмотки 10 перекомутацією, залежно від швидкості вітру.

Кожен ППЕВТ 1 [31] містить нерухомий індуктор у вигляді дискових МП 3 кільцевої форми, із феромагнітного матеріалу з зубчастою будовою прилеглих поверхонь, з кільцевими канавками 4 і ОЗ 5 в них, і рухомий диск 6, розташований з подвійним зазором між ними, жорстко зв'язаний з валом 7 свого ВД, співвісно розташовані в резервуарі 8 з рідинним теплоносієм, наприклад з водою, а їхні кільцеві ОЗ 5 збуджені постійним струмом в одному напрямі. Сталевий диск 6 кожного ППЕВТ жорстко зв'язаний з валом 7 ВД, вкритий з обох боків шаром металу з підвищеною електропровідністю (міддю чи алюмінієм), обладнаний радіальними лопатями 21, розташованими симетрично на його ободі під кутом з робочим зусиллям в напрямку до вихідного патрубку 22. Дискові МП 3 нерухомого індуктора мають кільцеву форму з зубчастою структурою торцевих поверхонь і розташовані на периферії центральних дисків 23 збільшеного діаметра, виконаних із міцного немагнітного матеріалу, наприклад, із текстоліту, причому кільцеві канавки 4 ділять радіальні зубці дискових МП 3 кільцевої форми на внутрішні 24 і зовнішні 25, рівновеликі за площею прилеглих поверхонь.

Синхронний ВЕГ (рис. 5.17) з аксіальним магнітним потоком, містить статор 9 з якірними котушками 10 трапецеїдальної форми без осердя і дводисковий багатополосний ротор з рівномірно закріпленими по периферії сталених дисків 5, 8 неодимових магнітів 7, 8 переміжної (S-N) полярності. Роторні диски жорстко закріплені на валу, зв'язаному з вихідним валом свого ВД. До виходу статорної обмотки 10 через випрямляч змінного струму 19 і електронний ключ 20 (рис. 5.19) блока регулювання приєднані обмотки збудження 5 кожного ПЕВТ 1, датчики температури 27 і швидкості вітру 28.

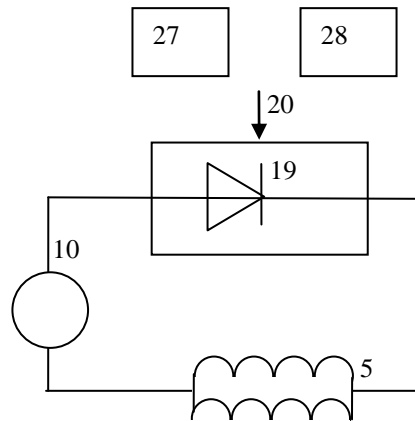


Рис. 5.19. Схема приєднання кільцевих обмоток збудження кожного ПЕВТ до статорної обмотки спільного ВЕГ, пат 123117

Джерело: авторська розробка

В запропонованому варіанті статорна обмотка 10 складається з 16-ти котушок, розташованих по внутрішньому периметру статорного диска 9, і групи комутаційних контактів 26 для зміни кількості полюсів статорної обмотки шляхом зміни схеми з'єднання котушок 10 при суттєвій зміні швидкості вітру, наприклад, з 16 полюсів на 8 (рис. 5.17).

Пристрій працює. Від вітрового потоку ВД 7 приводять в дію свої ПЕВТ 1 та ВЕГ, до статорної обмотки 10 якого через випрямляч 19 приєднані обмотки збудження 5 декількох ПЕВТ 1. При обертанні диска 6 збільшеного діаметра  $D$  в неоднорідному магнітному полі МП 3 кільцевої форми відбувається його інтенсивний нагрів вихровими струмами збільшеної частоти, оскільки окружна швидкість збільшена до величини:

$$V = 3,14Dn, \quad (5.22)$$

де  $n$  – частота обертання вала,  $\text{хв}^{-1}$ .

Одночасно, при появі вітру починає працювати ВЕГ (рис. 5.18). Вал, з'єднаний з вихідним валом свого ВД, починає обертатися разом з дводисковим багатополосним ротором. Обертове магнітне поле неодимових магнітів 7, 8, закріплених на сталених дисках 5, 8, по черзі пересікають якірні котушки 10, установлені на бакелітовому статорному диску 9, закріпленому в циліндричному корпусі 1, генеруючи в них ЕРС. Узгоджене послідовне з'єднання шістнадцяти якірних котушок забезпечує збільшення ЕРС в статорній обмотці 10. Частота ЕРС  $f$  залежить від кількості пар полюсів  $P$  і частоти обертання ротора  $n = P/60$ .

Для отримання стандартної частоти 50 Гц при кількості пар полюсів  $P = 8$  необхідно мати частоту обертання ротора  $n = 60f/P = 3000/8 = 375 \text{ хв}^{-1}$ .

При температурі середовища нижче від уставленого значення (холодно) блок регулювання електронним ключем 20 регулює струм в обмотки збудження 5 ПЕВТ, в залежності від відхилення температури середовища від уставленого значення.

Сталеві МП 3 кільцевої форми намагнічуються магнітним полем збудження в одному напрямі одночасно. Из-за зубчастої будови торців магнітна індукція в зазорі  $B_{\delta}$  буде неоднорідною і матиме пилкоподібний вигляд: від мінімального значення  $B_{\delta\text{min}}$  між пазами до максимального значення  $B_{\delta\text{max}}$  між протилежними зубцями 24, 25.

Отже, при обертанні в неоднорідному магнітному полі індукція  $B$  сталевому диску 6 пульсує зі збільшеною частотою, не змінюючи знак від  $B_{\delta\text{max}}$  до  $B_{\delta\text{min}}$ . Її можна представити у вигляді двох складових: змінної, з амплітудою  $B_{\delta} \sim (1)$  і постійної, рівною  $B_{\delta} = (2)$ .

Вихрові струми за законом Джоуля – Ленца нагрівають диск 6, переважно його поверхню, а від нього нагрівається рідинний теплоносій в резервуарі 8, який може використовуватися для обігріву споруд, парників та теплиць.

Бакелітовий статорний диск 9, на якому закріплені епоксидною смолою якірні котушки 10, забезпечує міцність конструкції. При збільшенні швидкості вітру вдвоє надходить сигнал від датчика швидкості вітру 28 на електромагнітне реле комутаційного апарата (не показано), замикається група комутаційних контактів, утворюючи дві паралельні гілки по вісім якірних котушок (рис. 5.17, б). Частота обертання зростає до  $750 \text{ хв}^{-1}$ . При подальшому подвоєнні швидкості вітру група комутаційних контактів утворить 4 паралельних гілки, а потім – 8 (два полюса), і частота обертання ротора досягне максимальної величини  $3000 \text{ хв}^{-1}$ . При зменшенні швидкості вітру, навпаки – кількість якірних котушок в кожній гільці збільшується: 2 : 4 : 8 : 16, а частота обертання ротора відповідно зменшується до мінімальної величини.

Отже, корисна модель забезпечує підвищення ефективності ПЕВТ, розширення діапазону робочої швидкості вітру, збільшення коефіцієнта використання енергії вітру, спрощення і здешевлення конструкції.

Для автоматичного регулювання температури в теплиці в жарку погоду запатентовано, пат. 117783, привід фрамуги з ефектом пам'яті форми [29], а для опромінення розсади – регульовану світлодіодну систему [22].

Ефективність роботи вітроенергоустановки (ВЕУ) суттєво залежить від правильності вибору системи керування генератором. При мінімальному керуванні генератором напруга на його виході (і частота, в разі генератора змінного струму) буде нестабільною. Електроенергію з такими параметрами можна безпосередньо застосовувати в нагрівачах [3]. В багатьох випадках такі ВЕУ задовольняють споживачів [35, с. 311]. Відносно малі потреби в електроенергії зі стабільними параметрами (наприклад 220 В/50 Гц) можна в такому випадку задовольняти спеціальними перетворювачами від акумуляторних батарей (рис. 5.20).

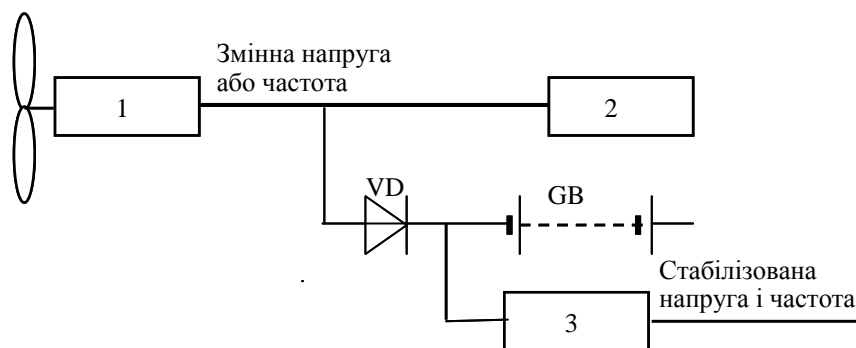


Рис. 5.20. Схема узгодження присадибної ВЕУ з електроспоживачами:

1 – вітроелектрогенератор, 2 – електронагрівачі, 3 – інвертор,  
VD – випрямляч, GB – акумуляторна батарея

Джерело: [3, рис. 2]

#### 5.4. Технології використання сонячної енергії для ПДГ

© **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*

Сонячна енергетика розвивається у напрямках генерування електрики і тепла. Для селянської садиби найбільш прийнятними на сьогоднішній день є перетворення сонячного випромінювання в електрику за допомогою фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) і в теплоту за допомогою сонячних колекторів (СК) [9].

Вакуумний СК "Атек з 2013 р. працює на даху власника будинку в с. Семенівка Мелітопольського району [15]: Вакуумних трубок – 15 шт., довжиною по 180 см, об'єм бака – 150 л. Контролер: напруга живлення 220 В, потужність – до 5 Вт. Інформація від господаря: Продуктивність 500 ... 600 л за добу температурою 70 ... 98°C. Заправка – у квітні, злив восени (перед заморозками); Вартість – 5600 грн. разом з монтажем (2013 р.).

Розроблена і виготовлена конструкція компактного плоского СК для власної квартири (дачі) [15]. Корпус компактного СК зібраний із двох здвоєних віконних рам з подвійним склінням. В якості абсорбера взято плоску батарею водяного опалення. Холодна вода підведена до батареї знизу, а з