



DOI: 10.31388/2220-8674-2023-2-36

УДК 620.92

С. В. Галько¹, к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0001-7991-0311

І. М. Трунова², к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0001-7510-4291

О. О. Мірошник², д.т.н., проф.

ORCID: 0000-0002-6144-7573

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного²Державний біотехнологічний університет, м. Харків

e-mail: galkosv@gmail.com, тел.: 067-421-75-08

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОМОГОСПОДАРСТВ НА ОСНОВІ МАЛОПОТУЖНОГО ВІТРОЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА

Анотація. В статті розроблена функціональна схема системи енергозабезпечення домогосподарств на основі вітроелектричної установки малої потужності з електричним генератором зі збудженням від постійних неодимових магнітів та здвоєним ротором спрощеної конструкції, що забезпечує заданий рівень напруги у споживача при нестационарних стохастичних динамічних режимах, які характеризуються випадковою швидкістю вітру і величиною навантаження. Наведено принцип дії вітроелектрогенератора зі здвоєним ротором спрощеної конструкції та запропоновано методику визначення його розрахункової потужності при будь якій швидкості вітру і струмі навантаження. Виконане математичне моделювання режимів роботи і отримана адекватна математична модель, що описує стаціонарні та перехідні процеси у запропонованій системі.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, енергія вітру, вітроенергетика, перетворення енергії, вітроелектрогенератор, акумулятор, контроль напруги.

Постановка проблеми. Енергія вітру є одним з найпотужніших відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), що стрімко розвивається, в продовж останнього десятиріччя, забезпечуючи близько 3% світового споживання електроенергії [1-3].

Специфіка малих домогосподарств обумовлена відносно невеликим споживанням електроенергії і вимагає широкомасштабного розвитку малої вітроенергетики, техніка для якої, виходячи з технічних умов, обмежується потужністю у 10 кВт. [4] Маркетингові дослідження ринку вітроенергетичного обладнання свідчать про те, що невеликі



споживачі мають намір використовувати вітроустановки для забезпечення своїх потреб (наприклад, в якості джерел живлення виробничого і побутового обладнання, освітлення, зарядки автотракторних акумуляторів та інш.) [5].

Вітроелектрична установка (ВЕУ) перетворює кінетичну енергію вітру в електричну. Автономні ВЕУ виробляють електроенергію для побутових і промислових потреб і в сучасних умовах являють альтернативу традиційному електропостачанню.

Дослідження в галузі малої вітроенергетики показують, що світовий ринок цієї галузі знаходиться на початковому етапі і, відповідно дослідженням Всесвітньої вітроенергетичної асоціації, приріст світового сектору малої вітроенергетики з 2015 року складає 125 МВт у рік. ВВЕА прогнозує, що до 2030 р. загальна встановлена потужність малих ВЕУ у світі досягне 5 ГВт, а ринок нових невеликих ВЕУ - близько 1 ГВт [6].

Виробники обладнання для малої вітроенергетики зосереджені у п'яти країнах (Канада, Китай, Німеччина, Англія та США) і займають більше 50% світового ринку. В більшості розвинених країн заплановано у першій половині ХХІ ст. довести частку ВДЕ в загальному енергобалансі до 20...50% [4].

Досягнення ж України у впровадженні ВДЕ важко назвати суттєвими, тому передбачається збільшення частки ВДЕ у загальному балансі встановлених потужностей до 20%. Окрім розвитку комерційної відновлюваної енергетики, в Україні є необхідність розвивати некомерційну ("сільську", "фермерську", "для двору"). Такі самостійні невеликі системи служать децентралізації енергопостачання, дозволяють диверсифікувати джерела енергії, зробити більш енергонезалежною Україну, і фермерів зокрема [7-10].

Вирішення цієї проблеми неможливо без рішення науково-технічної задачі, яка полягає в розробці, дослідженні, обґрунтуванні параметрів та режимів функціонування вітроелектромеханічних систем для перетворення енергії вітру в інші види енергії. Одним з етапів вирішення цієї задачі є розробка, експериментальні дослідження і побудова математичних моделей одного з головних конструктивних елементів будь якої ВЕУ – електричного генератора, що підвищить надійність і загальний ККД ВЕУ.

Аналіз останніх досліджень. Головним елементом ВЕУ є вітроколесо (ВК), що характеризується коефіцієнтом швидкохідності. Можливості підвищення частоти обертання ВК обмежують аеродинамічні фактори. Використання для цієї мети редукторів і інших механічних пристроїв недоцільно з точки зору появи додаткових втрат енергії і погіршення масогабаритних показників. В малопотужних установках найбільш поширені багатополюсні генератори на постійних



магнітах [11,12]. Перспективними для цієї мети є генератори на постійних магнітах, які прості за конструкцією, надійні, не потребують додаткового живлення обмотки збудження [12,13].

Основною особливістю ВЕУ є необхідність роботи в умовах змінної швидкості вітру, окремі пориви якого можуть істотно перевищувати його середню швидкість, а в інші моменти часу швидкість може значно знижуватися. Ця обставина змушує використовувати в ВЕУ складні механічні або гідравлічні пристрої регулювання швидкості, а відповідно - вихідної напруги генератора, що істотно ускладнює і здорожує всю конструкцію і неприйнятно для автономної ВЕУ невеликої потужності [14-16]. Краще використовувати установки з проміжною ланкою постійного струму і буферним накопичувачем енергії з подальшим перетворенням її в напругу і струм промислової частоти [17-19]. В [20] рекомендується на підставі зіставлених характеристик потужностей генератора і вітроколеса виконувати регулювання потужності установки по колу збудження генератора, що неприйнятно для розроблених й запатентованих безредукторних вітроелектрогенераторів (ВЕГ) на постійних магнітах [12,13].

Серед різних типів накопичувачів енергії найбільш привабливим засобом для буферного накопичувача енергії в ВЕУ малої потужності є акумулятори [21,22], які при достатній швидкості вітру підзаряджаються, а при падінні швидкості вітру і дефіциті потужності віддають енергію навантаженню. Для оперативного регулювання потужності від генератора до навантаження доцільно застосовувати резистивне баластне навантаження, яке сприймає надлишки потужності при великих швидкостях вітру [23,29].

В сучасній літературі достатньо розроблені типові схеми ВЕУ великої і середньої потужності, а також режими роботи генератора з електромагнітним збудженням чи збудженням від постійних магнітів [4]. У меншій мірі досліджені нестационарні динамічні режими ВЕУ малої потужності, що характеризуються випадковою швидкістю вітру і випадковою величиною опору навантаження за умови стабілізації напруги за миттєвим значенням швидкості вітру і вихідної напруги генератора.

Формування цілей статті. Розробка функціональної схеми системи енергозабезпечення на основі ВЕУ малої потужності з електрогенератором на постійних магнітах та моделювання режиму її роботи в умовах випадкової швидкості вітру і випадкового характеру зміни опору навантаження.

Основна частина. Функціональна схема пропонованої системи енергозабезпечення з ВЕУ малої потужності на електрогенераторі з постійними неодимовими магнітами зображена на рисунку 1. Схеми

працює в такий спосіб. Фазна напруга з генератора G подається на мостовий некерований випрямляч VD і через демпфуючий фільтр F поступає на збірну шину $Ш$. Сюди ж підключається резистивне баластне навантаження $БН$ і акумуляторна батарея $АБ$ через контролер $К$ «заряду-розряду» батареї. Зі збірної шини $Ш$ напруга надходить на інвертор I , з виходу якого на навантаженні $Н$ знімається напруга 220 В промислової частоти.

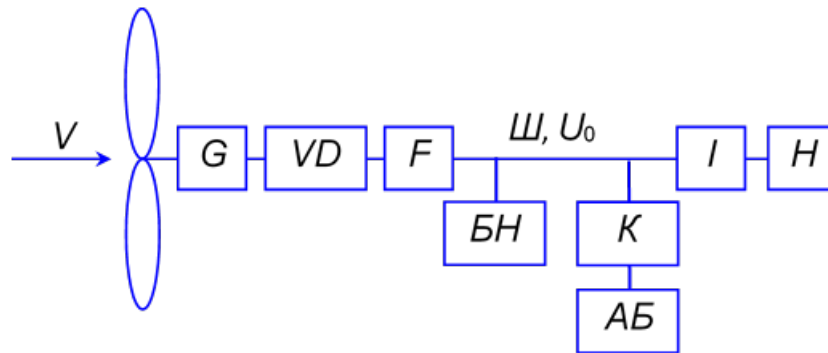


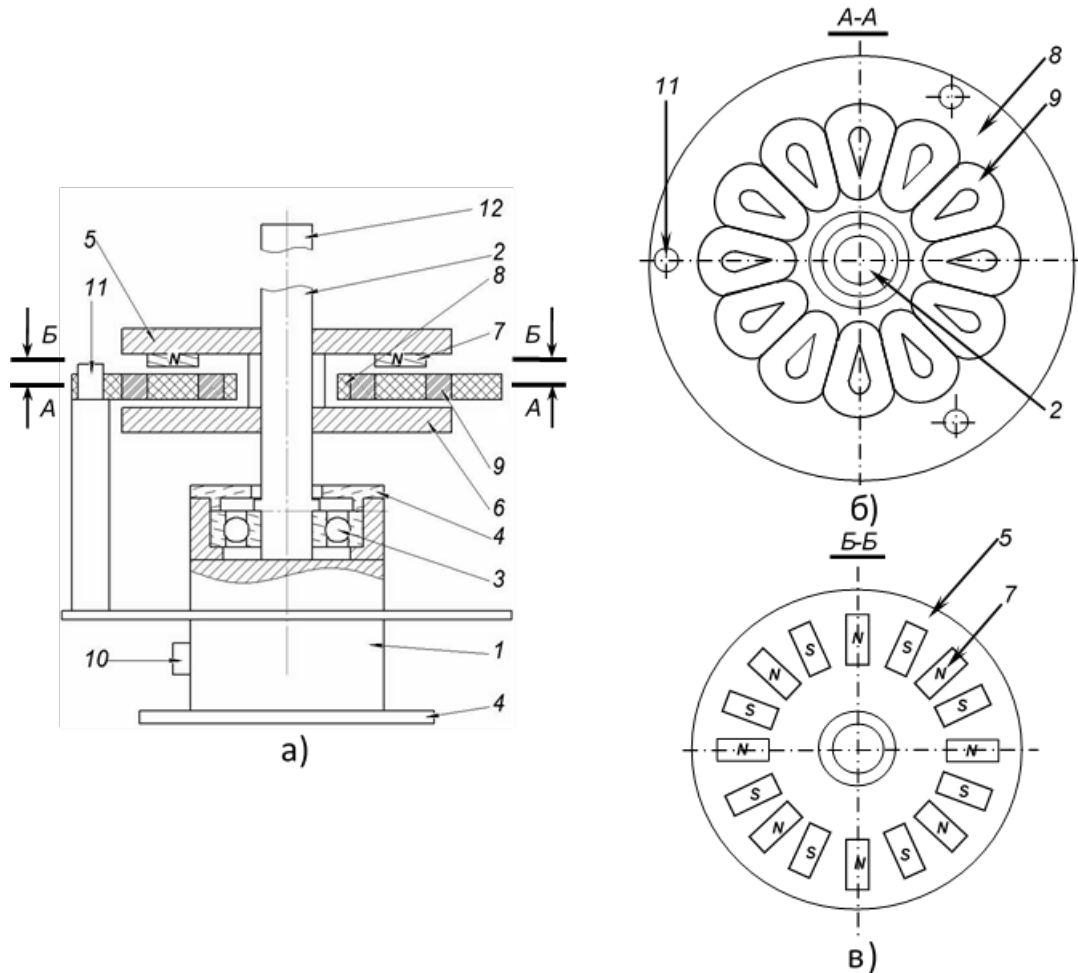
Рисунок 1. Функціональна схема системи енергозабезпечення на основі ВЕУ

При надлишку потужності генератора, що виражається у збільшенні напруги, внаслідок збільшення швидкості вітру, провідність баластного навантаження $БН$ збільшується, що приводить до відбору зайвої потужності. Крім того, в цих умовах є можливість підзарядки акумуляторної батареї $АБ$; її контролер $К$ забезпечує обмеження зарядного струму і повне його припинення при максимальному заряді. Внаслідок цього напруга на збірній шині $Ш$ зростає не суттєво. Аналогічна робота відбувається і при зниженні потужності, споживаної навантаженням $Н$. При повній втраті потужності навантаження $Н$ і повністю зарядженій батареї $АБ$ вітроколесо відводиться від вітру або гальмується, наприклад, системами, що наведені у [24]. Таким чином, у пропонованій системі не передбачається механічного регулювання швидкості вітроколеса; це відбувається шляхом регулювання навантаження генератора G .

Дефіцит потужності виникає при короткочасному зниженні швидкості вітру або накиді навантаження $Н$ на інвертор I . При дефіциті потужності на збірній шині $Ш$ провідність $БН$ знижується до нуля, а акумуляторна батарея $АБ$, що розряджається, підтримує напругу на незмінному рівні. Контролер $К$ обмежує розрядний струм акумуляторної батареї $АБ$ і припиняє його при максимально допустимому її розряді. Зміна провідності баластного навантаження $БН$ забезпечується підключенням до збірної шини $Ш$ низькоомних резисторів через пристрій широтно-імпульсної модуляції з частотою 4-6 кГц.

На основі виконаного аналізу існуючих ВЕГ малої потужності для

ВЕУ домогосподарств, розроблено і запатентовано малопотужний ВЕГ зі здвоєним ротором спрощеної конструкції [25], будова якого наведена на рисунку 2.



а) будова ВЕГ; б) статор; в) 16-ти полюсний ротор з неодимовими магнітами

Рисунок 2. Малопотужний ВЕГ зі здвоєним ротором спрощеної конструкції, пат. 116122

Малопотужний ВЕГ зі здвоєним ротором спрощеної конструкції складається з корпусу 1, валу 2, встановленого на підшипниках 3, що закриті з обох сторін кришками 4. На валу 2 розташований дводисковий ротор 5, 6. Диск 6 виконаний сталевим. На диску 5 рівномірно по колу закріплені 16 неодимових магнітів 7 з чергуванням полюсів, закріплені рівномірно по колу на периферії диска, що утворюють багатополісний дисковий ротор (рис. 1, в). Між роторними дисками 5 і 6 з зазором розташований нерухомий пластмасовий (бакелітовий) статор 8 з плоскими якірними котушками 9 трапецієвидної форми без осердя (рис. 1, б). Якірні котушки 9 з'єднані згідно послідовно. Статор 8 розташований перпендикулярно осі вихідного валу 2, і залитий разом



з котушками компаундом. Кінці обмоток 9 виведені на клемну коробку 10. Шпильками 11 пластмасовий статор 8 жорстко закріплений в корпусі 1. Вал 2 ВЕГ з'єднаний з вихідним валом 12 вітроколеса (не показано).

1. *Принцип дії ВЕГ.* Вихідний вал 12 вітроколеса, що приводиться у рух вітром, передає обертовий момент через кінематичний зв'язок валу 2, який, у свою чергу, обертає закріплені на ньому роторний диск 5 з неодимовими магнітами 7 і диск 6. Так як магніти 7 розташовані рівномірно на периферії роторного диску 5, то вони створюють потужний магнітний потік $\Phi_{зб}$, який пронизує плоскі якірні котушки 9 і замикається через сталі роторні диски 5 і 6. При обертанні дисків 5 і 6 магнітний потік $\Phi_{зб}$ постійних магнітів по черзі пронизує якірні котушки 9 і індукуює в них змінну ЕРС e_k . Для збільшення вихідної ЕРС якорю e_a котушки 9 з'єднані згідно послідовно в обмотки, кінці яких виведені на клемну коробку 10.

Переваги розробленого ВЕГ такі: не потребує мультиплікатора, так як багатополосне виконання ротора забезпечує збільшення частоти генерованої ЕРС; рівномірне закріплення по колу на периферії першого роторного диску неодимових постійних магнітів забезпечує надійне збудження магнітного поля і стабільність частоти генерованої ЕРС в якірних обмотках; виконання другого диска ротора у вигляді сталі пластины забезпечує спрощення конструкції, зменшення кількості магнітів, габаритів і вартості конструкції; виконання статорного диску пластмасовим, усуває втрати на нагрів диску, зменшує момент зрушення, що розширює діапазон робочої швидкості вітру; розташування обмоток на нерухомому статорі дозволяє уникнути рухомих контактів, а отже підвищити ККД і надійність генератора; виконання статорних котушок без осердя і сталюго магнітопроводу забезпечує зменшення моменту зрушення генератора, а отже його запуск при незначній швидкості вітру; виготовлення статорних котушок плоскими трапецеїдальної форми покращує компактність статора, збільшує коефіцієнт використання об'єму статора, а отже сприяє зменшенню габариту і маси генератора; з'єднання статорних котушок згідно послідовно забезпечує збільшення ЕРС в обмотках генератора; використання потужних неодимових магнітів сприяє зменшенню габариту і маси генератора.

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.

2. *Розрахунок ВЕГ.* Для розрахунку ВЕГ, який являє собою синхронний генератор (СГ) з постійними магнітами з урахуванням втрат у магнітопроводі існують методики, недоліками яких є:



складність розрахунків, генератор з статорним магнітопроводом буде мати значне залипання ротора, а виконання пазів під кутом, для зменшення залипання, збільшує втрати в самому генераторі; виконання обмоток з укороченим кроком, призводить до збільшення масогабаритних розмірів генератора. Отже, приведені недоліки методик розрахунку СГ з постійними магнітами не прийнятні для розрахунку ВЕГ, у яких відсутній магнітопровід на статорі. Тому для розробленого ВЕГ на неодимових магнітах пропонується інша методика розрахунку.

Для розрахунку розробленого ВЕГ необхідно знати середнє значення обертів при середньорічній швидкості вітру в даному регіоні. При виборі кількості магнітів треба орієнтуватися на середнє значення частоти обертання і на фінансові можливості, магніти з достатнім магнітним потоком недешеві. Потужність вітроколеса визначаємо за рівнянням [26]:

$$P_{\text{ск}} = C_p \pi D^2 \rho \frac{V_0^3}{8}, \quad (1)$$

де C_p – коефіцієнт потужності вітроколеса;

ρ – щільність повітря, кг/м^3 , ($\rho \approx 1,2 \text{ кг/м}^3$);

V_0 – швидкість вітру, м/с ;

D – діаметр вітроколеса, м .

У швидкохідних добре спроектованих ВЕУ C_p досягає 0,4 [27].

Діаметр вітроколеса рахуємо за формулою:

$$D = \sqrt{\frac{8P}{C_p \pi \rho V_0^3}}. \quad (2)$$

Оптимальна швидкохідність вітроколеса дорівнює:

$$Z_0 \approx 4\pi/n, \quad (3)$$

де n – кількість лопатей.

Для дволопатевого вітроколеса $Z_0 = 4\pi/2 \approx 6$; для 4-х лопатевого - $Z_0 = 4\pi/4 \approx 3$; для 3-х лопатевого - $Z_0 = 4\pi/3 \approx 4$ [28].

Найбільш економічні ВЕУ мають по 2 лопаті, але з метою зниження динамічних навантажень рекомендується виготовляти швидкохідні ВЕУ з 3 лопатями.

Частоту обертання вітроколеса дорівнює:

$$n = \frac{60V_0 Z_0}{\pi D}. \quad (4)$$

Фазну напругу холостого ходу СГ розраховуємо за виразом:



$$U_{\phi.x.x.} = 2n \cdot m \cdot N \cdot W_k \cdot B \cdot S, \quad (5)$$

де n – частота обертання ротора з магнітами, c^{-1} ;

m – число магнітних полюсів;

N – кількість котушок у фазі, а для однофазного - число котушок у статорі;

W_k – кількість витків в одній котушці статора;

B – магнітна індукція в зазорі, Тл;

S – площа поверхні одного магніту, m^2 .

З (5) знаходимо потрібну кількість витків котушки:

$$W_k = \frac{U_{\phi.x.x.}}{2n \cdot m \cdot N \cdot B \cdot S}. \quad (6)$$

Значення магнітної індукції в зазорі визначаємо з залежності, яка приведена у [27]. Співвідношення кількості полюсів магнітів до якірних котушок повинно бути 4:3 [27]. В нашому випадку кількість полюсів розміром 40x20x10 мм на неодимових магнітах становить $m = 16$, а кількість якірних котушок - 12, по 4 на кожен фазу обмотку, $N = 4$. При повітряному зазорі $\delta = 1$ мм, магнітна індукція B для магніту N35 дорівнює 0,5 Тл [30].

Використовуючи запропоновану методику розрахунку ВЕГ можна визначити розрахункову потужність при будь якій швидкості вітру і струмі навантаження. Нами виконані розрахунки ВЕГ при номінальному струмі навантаження $I_n = 25$ А, які наведені у таблиці 1. На рисунках 3 і 4 зображені розрахункові характеристики для 16-ти полюсного ВЕГ.

Таблиця 1

Розрахункова потужність ВЕГ при швидкості вітру 12 м/с і струмі навантаження 25 А

Кількість магнітних полюсів, m	4	8	12	16	20
Потужність ВЕГ, Вт	220	440	660	880	1100

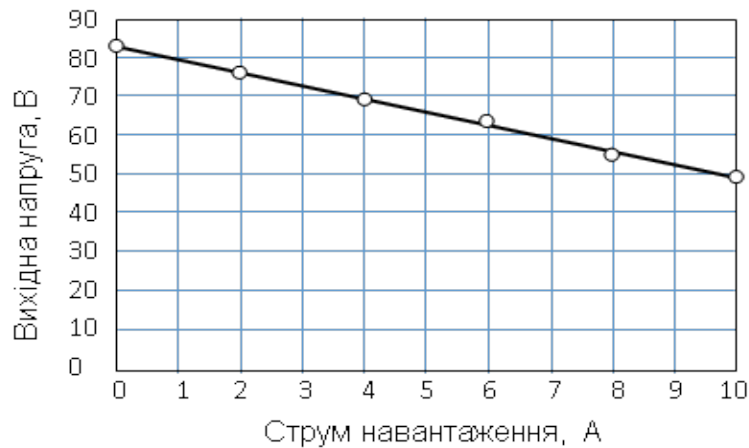


Рисунок 3. Зовнішня характеристика ВЕГ

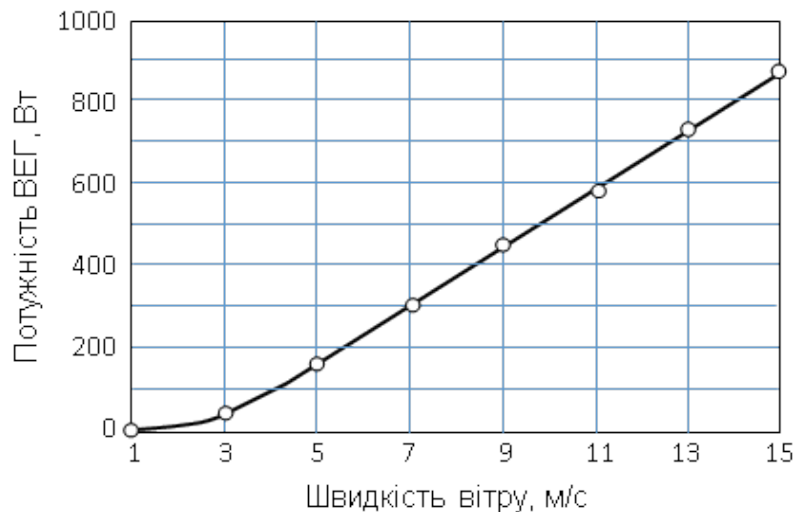


Рисунок 4. Залежність потужності ВЕГ від швидкості вітру при струмі навантаження 25 А

Результати та обговорення. Математичний опис режимів роботи генератора з постійними магнітами за умови синусоїдальної кривої вихідної напруги і ненасиченого магнітного кола виконується в ортогональних d, q - координатах з випереджаючим обертанням поздовжньої осі. У подібних генераторах немає спеціальних демпфуючих обмоток на роторі. За результатами дослідження [12], демпфуючі струми порівняно мало впливають на режим такого генератора, тому далі в математичній моделі вони не враховуються. Крім того, зміна магнітного потоку внаслідок часткового розмагнічування істотно проявляється лише при струмах, близьких до короткого замикання. Тому далі вважаємо, що магнітний потік магнітів залишається постійним. Відзначимо, що подібне допущення прийнято розробниками моделі машини з постійними магнітами в пакеті імітаційного моделювання MATLAB Simulink.



Таким чином, рівняння по поздовжній і поперечній складовій струмів і напруг генератора мають вигляд [16]:

$$\begin{cases} 1,5ri_d + 1,5L_d \frac{di_d}{dt} + 1,5L_q i_q \Omega p + u_d = 0; \\ 1,5ri_q + 1,5L_q \frac{di_q}{dt} - 1,5L_d i_d \Omega p - 1,5\Psi \Omega p + u_q = 0, \end{cases} \quad (7)$$

де i_d, u_d, i_q, u_q – повздовжні і поперечні складові фазних напруг і струмів на виході генератора;

L_d, L_q – індуктивності фазної обмотки статора генератора уздовж відповідних осей;

p – число пар полюсів;

r – активний опір фази обмотки статора;

Ψ – потокозчеплення магнітів вздовж поздовжньої осі генератора.

Нехтуючи електричною інерційністю обмоток генератора в порівнянні з його механічною інерційністю і вважаючи узагальнений опір навантаження R_n переважно резистивним, отримуємо останнє рівняння у вигляді

$$\begin{cases} 1,5ri_d + 1,5L_q i_q \Omega p + \frac{1}{\sqrt{3}} R_n i_d = 0; \\ 1,5ri_q - 1,5L_d i_d \Omega p - 1,5\Psi \Omega p + \frac{1}{\sqrt{3}} R_n i_q = 0, \end{cases} \quad (8)$$

звідки

$$i_q = \frac{1,5\Psi \Omega p \left(1,5r + \frac{1}{\sqrt{3}} R_n\right)}{L_d L_q (1,5\Omega p)^2 + \left(1,5r + \frac{1}{\sqrt{3}} R_n\right)^2} = \frac{1,5\Psi \Omega p L_d L_q}{1,5r + \frac{1}{\sqrt{3}} R_n}. \quad (9)$$

Рівняння динаміки механічної частини ВЕУ має вигляд рівняння рівноваги моментів

$$\begin{aligned} J \frac{d\Omega}{dt} + k_{mp} \Omega + M_{ген} &= M_{вк}; \\ M_{ген} &= 1,5 p i_q [1,5\Psi + (L_d - L_q) i_d], \end{aligned} \quad (10)$$

де J – момент інерції обертових мас;

k_{mp} – коефіцієнт тертя;

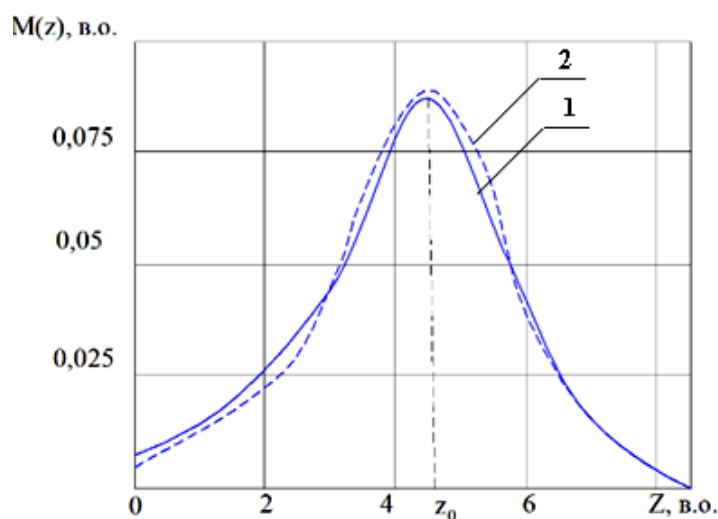
$M_{ген}$ – електромагнітний момент генератора;

$M_{вк}$ – обертовий момент вітроколеса, що залежить від швидкості його обертання і швидкості вітру [29]:

$$M_{вк} = M(z) \frac{D^3 \rho \pi V^3}{16}, \quad (11)$$

де $M(z)$ – відносний момент вітроколеса, що залежить від швидкохідності z .

Типовий графік відносного моменту для трилопатевого вітроколеса, зображений на рисунку 5 суцільною лінією 1 [26].



1 – типовий; 2 – апроксимований за (12)

Рисунок 5. Залежності відносного моменту $M(z)$ від швидкохідності z .

Для цілей моделювання цей момент апроксимується нелінійною залежністю

$$M(z) = k_1 e^{-k_2(z-z_0)^2} + k_3 e^{-k_4 z} + k_5 \sin z - k_6 z^5, \quad (12)$$

де $k_1 \dots k_6$ - коефіцієнти апроксимації.

На рисунку 5 апроксимована залежність (12) показана штриховою лінією 2 при значеннях параметрів:

$$k_1 = 0,09; k_2 = 0,35; k_3 = 0,006; k_4 = 0,03; k_5 = 0,009; k_6 = 3 \cdot 10^{-7}.$$

Як впливає з рисунку 5, апроксимація достатньою мірою відображає вихідну криву, особливо з урахуванням того, що сама вихідна крива $M(z)$ зазвичай представляється у вельми усередненому

вигляді [26].

Графік залежності опору баластного резистивного навантаження $r_{\delta n}$ від напруги U на збірній шині III зображений на рисунку 6, на якому позначено задану напругу $U_0 = 56$ В. При напрузі більшій U_0 , опір $r_{\delta n}$ зменшується, і баластове навантаження приймає надлишок потужності, що стабілізує напругу на збірній шині III. При дефіциті потужності, коли напруга зменшується, опір баластного навантаження $r_{\delta n}$ збільшується. Приведена на рисунку 6 залежність $r_{\delta n} = f(u)$ при $u > U_0$ апроксимується виразом

$$r_{\delta n} = \frac{2}{u - U_0 + 0,002}, \quad (13)$$

де u – поточне значення напруги на збірній шині.

Можлива також частково-лінійна апроксимація виразу (13). При реалізації системи закон високочастотної широтно-імпульсної модуляції конструюється таким чином, щоб забезпечити середнє значення опору $r_{\delta n}$ відповідно до кривої (13).

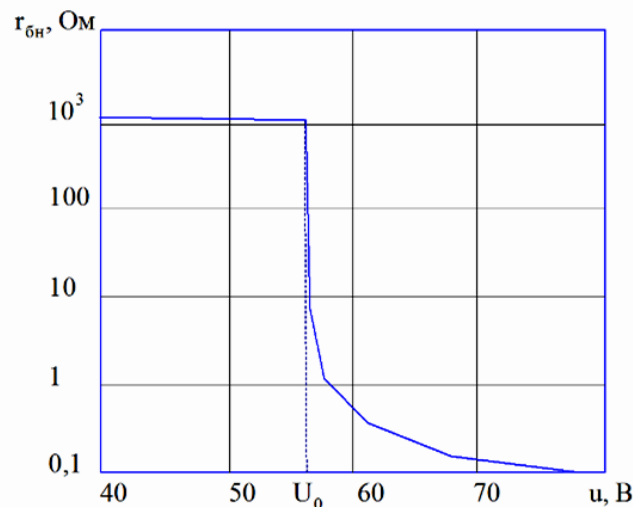


Рисунок 6. Опір баластного навантаження $r_{\delta n}$

Ідеалізована вольт-амперна характеристика (ВАХ) акумуляторної батареї $I = f(u)$ зображена на рисунку 7 штриховою лінією. Майже вертикальна ділянка цієї кривої при $I > 0$ відповідає режиму зарядки, а при $I < 0$ - режиму розрядки. Горизонтальні ділянки є неробочими і неприпустимі; контролер акумуляторної батареї виключає вихід на ці ділянки, обмежуючи струми заряду і розряду майже вертикальною частиною характеристики.

Провідність батареї $g_{a\delta} = f(u)$ (на рисунку 7 - суцільна лінія), відповідна даній ВАХ, апроксимується виразом

$$\begin{cases} g_{a\bar{b}}(u) = \frac{b_1}{u} - \frac{b_2}{U_0} e^{-b_2(u-U_0)}; u > U_0; \\ g_{a\bar{b}}(u) = \frac{b_1}{u} - \frac{b_1}{U_0} e^{b_2(u-U_0)}; u < U_0, \end{cases} \quad (14)$$

де b_1, b_2 – коефіцієнти апроксимації.

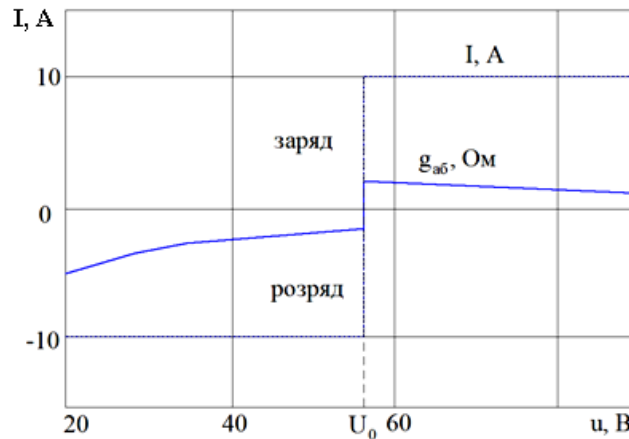


Рисунок 7. Вольт-амперна характеристика акумуляторної батареї

Перші доданки в цих виразах відображають горизонтальні ділянки ВАХ, а експонентні – забезпечують плавний перехід між цими ділянками по майже вертикальній лінії, що відповідає режимам “заряду-розряду” батареї. Коефіцієнт $b_1 = 20$ визначає граничний струм батареї; коефіцієнт $b_2 = 10$ визначає ступінь згладжування кутів характеристики і рівень нахилу від вертикалі робочої ділянки “заряду-розряду” батареї (підбирається дослідним шляхом). Таким чином, узагальнений опір навантаження визначається рівнянням:

$$R_n = R_n(t, u) = \left(\frac{1}{r_n(t)} + \frac{1}{r_{\bar{b}n}(u)} + g_{a\bar{b}}(u) \right)^{-1}, \quad (15)$$

де r_n – опір корисного навантаження (вхідний опір інвертора).

Спрощений математичний опис вузла “випрямляч – фільтр” має вигляд:

$$T_F \frac{du}{dt} + u = R_n I_n, \quad (16)$$

де T_F – постійна часу фільтра;

$I_n = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$ - струм навантаження.

Заряд q акумуляторної батареї залежить від її струму і описується рівнянням:



$$T_{a\bar{b}} \frac{du}{dt} = u g_{a\bar{b}}(u), \quad (17)$$

де $T_{a\bar{b}}$ – постійна часу, що характеризує ємність батареї, а отже, швидкість її заряду і розряду.

Права частина рівняння (15) - струм батареї, обмежуваний зверху і знизу при розряді і заряді, і рівний нулю: коли батарея розряджена $u < U_0$; а коли батарея повністю заряджена, $u > U_0$.

Таким чином, рівняння (7) - (15) описують механічну динаміку ВЕУ; рівняння (16) разом з (7), (13) - (15) описує напругу u на збірній шині; рівняння (17) разом з (14) характеризує поточний заряд батареї.

На рисунку 8 представлені графіки стаціонарного режиму ВЕУ на інтервалі тривалістю 70 с при випадковій швидкості вітру $V(t)$, величина якого змінювалася від 8,4 до 13,5 м/с, і випадковому характері зміни змінного опору навантаження $r_n(t)$ від 1,0 до 2,2 Ом, що відповідає коливанню потужності навантаження P_n від 1,8 до 3,0 кВт. Розрахунок виконаний за вище описаною математичною моделлю, для ВЕУ з генератором на постійних неодимових магнітах, конструкція якого запатентована авторами роботи [25], з номінальною потужністю $P_{ген.н} = 4$ кВт, з наступними чисельними значеннями параметрів: індуктивність і опір фази генератора $L_d = 0,0032$ Гн, $L_q = 0,0027$ Гн, $r = 0,3$ Ом; число пар полюсів $p = 16$; магнітне потокозчеплення постійних магнітів на полюс $\Psi = 0,165$ Вб; коефіцієнт тертя $k_{mp} = 0,01$; діаметр вітроколеса $D = 4,6$ м; момент інерції обертових мас $J = 11,1$ кг·м²; постійні часу: $T_{VD} = 1,1$ с, $T_{a\bar{b}} = 20$ с.

На рисунку 8,а зображено залежність основних параметрів режиму від часу, а на рисунку 8,б - потужності. Для наочності графік швидкості вітру показаний збільшеним в 5 разів, а графік опору навантаження $r_n(t)$ - збільшеним в 10 разів. Графіки показують, що ВЕУ в цілому успішно справляється із завданням підтримки напруги u на збірній шині на рівні 56 В. Невеликі відхилення напруги помітні лише при значних перепадах опору навантаження і швидкості вітру. Так, провал напруги на збірній шині стався в інтервалі від 12,3 с до 14 с внаслідок несприятливого впливу зниження швидкості вітру і опору навантаження, що призвело до швидкого розряду акумуляторної батареї.

Графіки показують, що зміна швидкості вітру супроводжується кидками моменту вітроколеса, які пояснюються інерційністю обертових мас ВЕУ і вимагають підвищеної уваги до проектування її механічної частини. В інтервалах сталості швидкості вітру момент вітроколеса незначно перевищує момент генератора через наявність моменту тертя. Швидкість генератора відстежує зміну швидкості вітру з запізненням, пояснюється моментом інерції обертових мас, і мало

залежить від поставлених значень опору навантаження. Струм генератора відчуває значні коливання, що пояснюється як зміною опорів $r_n(t)$ і $r_{bn}(t)$, так і струмом акумуляторної батареї $i_{аб}$ (на рисунку 8,а зарядний струм прийнятий позитивним, а розрядний - негативним). Заряд батареї в цілому підтримується на достатньому рівні, крім зазначеного випадку провалу напруги на навантаженні, і в інтервалі від 14 с до 23 с через низький опір навантаження.

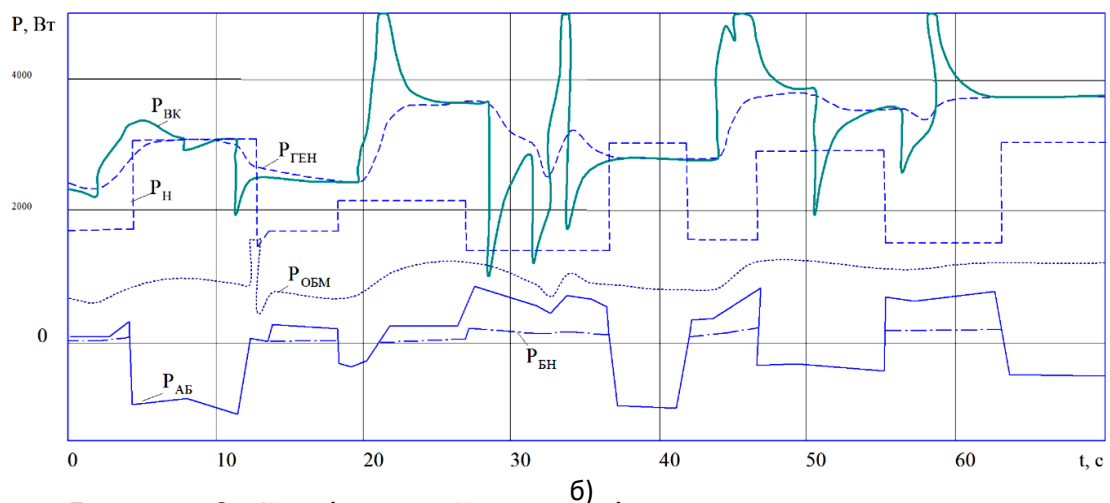
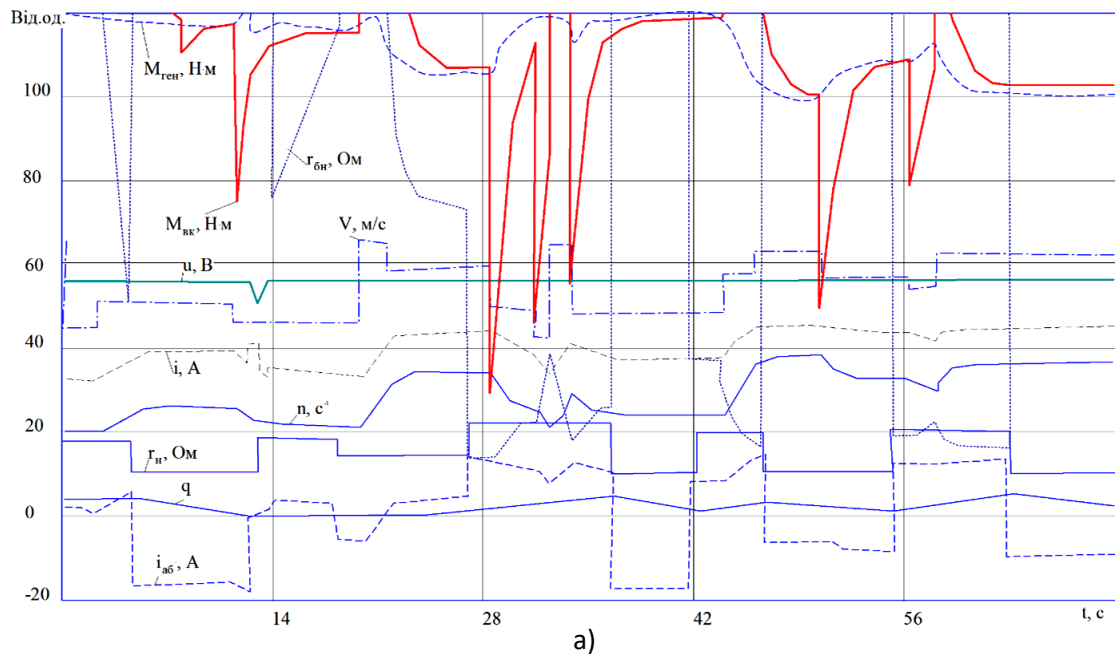


Рисунок 8. Стаціонарний режим вітроенергетичної установки

Потужність вітроколеса $P_{BK} = \Omega \cdot M_{BK}$ (рис. 8,б) має різкі коливання відповідно до зміни швидкості вітру. Потужність генератора складається з потужності навантаження, потужності баластного опору, потужності акумуляторної батареї і потужності нагріву обмоток генератора. В силу інерційності системи потужність генератора $P_{ген} =$



$\Omega \cdot M_{ген}$ змінюється плавно і коливається в межах від 2,5 кВт до 3,7 кВт. Так як напруга на збірній шині практично незмінна, графік потужності навантаження $P_n = u^2/r_n(t)$ практично точно повторює графік зміни опору навантаження $r_n(t)$. Потужність акумуляторної батареї $P_{аб} = u^2 \cdot q_{аб}$ під час заряду має позитивний знак, а під час розряду – негативна, і підживлює навантаження при дефіциті потужності генератора. На граничний розрядний струм 20 А батарея виходить тільки в момент $t = 13$ с. У цей час потужність її становить 1,3 кВт. На рис. 5,б зображені також графіки потужності баластного навантаження $P_{бн} = u^2/r_{бн}(t)$ і втрат в обмотках генератора $P_{обм} = r \cdot u^2/r_n$.

Висновки.

1. Запропонована функціональна схема системи енергозабезпечення на основі ВЕУ малої потужності з генератором на постійних магнітах забезпечує заданий рівень напруги на збірній шині, а значить і на затискачах навантаження, при значних коливаннях швидкості вітру від 8,4 до 13,5 м/с (на 62%) і випадковому характері зміни змінного опору навантаження від 1,0 до 2,2 Ом (у 2,2 рази), що відповідає коливанню потужності навантаження від 1,8 до 3,0 кВт.

2. Отримані математичні моделі адекватно описують стаціонарні та перехідні режими ВЕУ.

3. Використання безредукторних ВЕГ значно покращує масогабаритні показники системи і приводить до її здешевлення.

4. Застосування буферної акумуляторної батареї достатньої ємності, постійно приєднаної до навантаження, забезпечує більш стабільну напругу ВЕУ в умовах випадкових коливань швидкості вітру і потужності навантаження.

Список використаних джерел

1. Yang Z., Chai Y. A survey of fault diagnosis for onshore grid-connected converter in wind energy conversion systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. Vol. 66. P. 345–359.

2. Gan L. K., Echenique Subiabre E. J. P. A realistic laboratory development of an isolated wind-battery system. *Renewable Energy*, 2019. P. 645-656.

3. Merizalde Y., Hernández-Callejo L., Duque-Perez O., Alonso-Gómez V. Maintenance models applied to wind turbines. A comprehensive overview. *Energies*, 2019. Vol. 12, No 2. P. 15-21. Article number 225.

4. Галько С. В., Жарков В. Я., Жарков А. В. Технології та засоби перетворення відновлюваних джерел енергії для приватних домогосподарств : монографія. Мелітополь: Люкс, 2019. 215 с.

5. Kabir E., Kumar P., Kumar S., Adelodun A. A., Ki-Hyun Kim. Solar energy: Potential and future prospect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82, No 1. P. 894-900.



<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>.

6. World Wind Energy Report 2012_final. URL: <http://www.wwindea.org/wwea-half-year-report-worldwind> (дата звернення: 26.02.2023).

7. Ciriminna R., Meneguzzo F., Pecoraino M., Pagliaro M. Rethinking solar energy education on the dawn of the solar economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 63. P. 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.008>.

8. Sansaniwal S., Sharma V., Mathur J. Energy and energy analyses of various typical solar energy applications: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82, No 1. P. 1576–1600. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.003>.

9. Галько С. В. Використання когенераційних фотоелектричних модулів для зарядки електромобілів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 19, Т. 3. С. 130–141.

10. Галько С. В. Експериментальне дослідження і визначення параметрів когенераційного фотоелектричного модуля для гібридних сонячних електростанцій. *Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень: матеріали міжнар. наук. конф., м. Луцьк, 10 квіт. 2020 р. м. Луцьк: МЦНД, 2020. Т. 1. С. 83–90*. <https://doi.org/10.36074/10.04.2020.v1.10>.

11. Fu Y., Hu W., Xu F. Clean Heating Scheduling Optimization with Wind Power in Northern China. *Journal of Energy Engineering*. 2017. Vol. 143, No. 6. P. 28–35. Article number 04017056.

12. Безредукторний малопотужний вітроелектрогенератор: пат. 104467 Україна: МПК F03D 7/06 (2006.01), F03D1/06. №201400015; заявл. 30.12.2014; опубл. 10.02.2016, Бюл. №3. 4 с.

13. Електричний генератор плоскої конструкції: пат. 116576 Україна: МПК H02K21/00, H02K16/00. №201612745; заявл. 25.10.2016; опубл. 25.05.2017, Бюл. №10. 4 с.

14. Будько В. І. Розроблення математичної моделі роботи автономної зарядної станції електромобілів від вітроелектричних установок. *Відновлювана енергетика*. 2017. № 3. С. 6–13.

15. Islam M., Choi S., Elbuluk M. E., Bonthu S. S. R., Arafat A., Baek J. Design of external rotor ferrite-assisted synchronous reluctance motor for high power density. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No 7, P. 3102. <https://doi.org/10.3390/app11073102>.

16. Жарков В. Я., Жоров В. І., Жоров С. В. Аналіз роботи вітроелектричного зарядного агрегату. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2012. Вип. 2, Т. 1.

17. Boubzizi S., Abid H., Elhajjaji, A., Chaabane, M. Comparative study of three types of controllers for DFIG in wind energy conversion system. *Protection and Control of Modern Power Systems*. 2018. Vol. 3, No



1. P. 57–68.

18. Siniscalchi-Minna S., Bianchi F.D., De-Prada-Gil M. A wind farm control strategy for power reserve maximization. *Renewable Energy*. 2019. Vol. 131. P. 37–44.

19. Peng G., Wei J., Shi Y., Shao Z., Jian L. A novel transverse flux permanent magnet disk wind power generator with H-shaped stator cores. *Energies*. 2018. Vol. 11, Issue 4. P. 58–69. Article number 810.

20. Жарков В. Я. Сучасні проблеми розвитку присадибної вітроенергетики. *Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів: матеріали І всеукр. наук.-техн. конф., м. Донецьк, 18-19 жовт. 2012 р. Донецьк: "ДВНЗ" ДонНТУ, 2012. С. 127–128.*

21. Juangsa F. B., Budiman B. A., Aziz M., Soelaiman T.A.F. Design of an airborne vertical axis wind turbine for low electrical power demands. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 8, Issue 4. P. 293–301.

22. Bi H., Wang P., Wang Z. Common grounded H-type bidirectional DC-DC converter with a wide voltage conversion ratio for a hybrid energy storage system. *Energies*. 2018. Vol. 11, No 2. P. 54–68.

23. Cetrini A., Cianetti F., Corradini M., Ippoliti G., Orlando G. On-line fatigue alleviation for wind turbines by a robust control approach. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2019. Vol. 1, No 9. P. 384–394.

24. Njiri J. G., Beganovic N., Do M. H., Söffker D. Consideration of lifetime and fatigue load in wind turbine control. *Renewable Energy*. 2019. Vol. 131. P. 818–828.

25. Малопотужний вітроелектрогенератор зі здвоєним дводисковим ротором спрощеної конструкції: пат. 116122 Україна: МПК H02K21/26, F03D7/06, F03D1/06. №201611504; заявл. 14.11.2016; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10. 4 с.

26. Twidell J., Weir T. *Renewable Energy Resources*. London and New York: Taylor & Francis, 2006. 601 p.

27. Qawaqzeh M. Z., Szafraniec A., Halko S., Miroshnik O., Zharkov, A. Modelling of a household electricity supply system based on a wind power plant. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2020. Vol. 96, No 11. P. 36-40. <https://doi.org/10.15199/48.2020.11.08>.

28. Szafraniec A., Halko S., Miroshnik O., Figura R., Zharkov A., Vershkov O. Magnetic field parameters mathematical modelling of wind-electric heater. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021. Vol. 97, No 8. P. 36-41. <https://doi.org/10.15199/48.2021.08.07>.

29. Halko, S., Suprun, O., Miroshnyk, O. Influence of temperature on energy performance indicators of hybrid solar panels using cylindrical cogeneration photovoltaic modules. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on*



Advanced Technology, KhPI Week 2021 – Conference Proceedings. 2021. P. 132-136. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569975>.

30. Olatomiwa S., Mekhilef A., Olayinka S. Economic evaluation of hybrid energy systems for rural electrification in six geo-political zones of Nigeria. *Renewable Energy*. 2015. Vol. 83. P. 435–446.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2023 р.

S. Halko¹, I. Trunova², O. Miroshnik²

¹**Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

²**State Biotechnological University**

DEVELOPMENT OF AN ENERGY SUPPLY SYSTEM FOR HOUSEHOLDS BASED ON A LOW-POWER WIND GENERATOR

Summary

The article develops a functional scheme of the household energy supply system based on a low-power wind turbine with an electric generator with excitation from permanent neodymium magnets and a dual rotor of a simplified design that provides a given voltage level for the consumer under non-stationary stochastic dynamic modes, which are characterized by random wind speed and load.

The principle of operation of a wind turbine with a dual rotor of a simplified design is given and a method for determining its calculated power at any wind speed and load current is proposed.

A mathematical description of the operating modes of a generator with permanent magnets under the condition of a sinusoidal curve of the output voltage and an unsaturated magnetic circuit is made in orthogonal d, q - coordinates with a leading rotation of the longitudinal axis.

Mathematical modeling of operating modes is performed and an adequate mathematical model describing stationary and transient processes in the proposed system is obtained. Graphical dependencies of the stationary wind turbine mode at a time interval from 0 to 70 s at a random wind speed, the value of which varied from 8.4 to 13.5 m/s (by 62%) and the random nature of the change in variable load resistance from 1.0 to 2.2 ohms (2.2 times), which corresponds to a fluctuation in load power from 1.8 to 3.0 kW, were obtained. The power of the wind wheel has sharp fluctuations in accordance with changes in wind speed. Generator power consists of load power, ballast resistance power, battery power and heating power of the generator windings. Due to the inertia of the system, the generator power changes smoothly and ranges from 2.5 kW to 3.7 kW.

The obtained mathematical models adequately describe the stationary and transient modes of the wind power plant. The use of gearless wind turbines significantly improves the weight and size indicators of the system and leads to its cheapening. The use of a buffer battery of sufficient capacity, permanently connected to the load, provides a more stable voltage of the wind power plant in conditions of random fluctuations in wind speed and load power.

Key words: renewable energy, wind energy, wind energy, energy conversion, wind turbine, battery, voltage control.