



ТРЕГУБ М.І., докт. техн. наук,
ВАСИЛЕНКО О.С., ДЕМЕЩУК В.А., асистенти,
 Білоцерківський національний аграрний університет,
 м. Біла Церква

НИЗЬКОНАПІРНІ ГЕС У КОМПЛЕКСІ ПОНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОГО ГЕНЕРУВАННЯ

У роботі показано доцільність та принципи створення енергетичного комплексу поновлюваних джерел розосередженого генерування у складі низьконапірних гідроелектростанцій малої потужності і співрозмірних сонячних та вітрових електростанцій, а також описано розробки комбінованого генератора індукторного та вентильно-реактивного типу, перспективного для низьконапірних ГЕС.

К л ю ч о в і с л о в а: комплекс поновлюваних енергоджерел, низьконапірні гідроелектростанції, індукторний генератор, вентильний реактивний генератор, каскадна електрична машина.

Вступ. Сучасний рівень систем розподіленого генерування на базі поновлюваних джерел енергії не в повній мірі відповідає високим технічним вимогам, що пред'являються до малих гідро- та вітрогенераторів. Новітній тренд стрімкого нарощування потужностей сонячних електричних станцій (СЕС) приватними власниками призводить до різкої циклічності потоку виробленої електроенергії, тому для зменшення нерівномірності є велика потреба спільної їх роботи з місцевими гідро- та вітроелектростанціями.

Гідроелектростанції (ГЕС) мають більшу стабільність генерованої потужності порівняно з вітроелектроустановками (ВЕУ) і СЕС, хоча також спостерігаються виражені сезонні нерівномірності. Особливостями роботи ГЕС у спільному генеруючому комплексі з ВЕУ і СЕС є узгодження графіків генерування та споживання.

Актуальність досліджень. За умови спільної роботи ГЕС з ВЕУ та СЕС вони повинні мати відмінності від традиційних систем. Так генерована електроенергія ГЕС подається на вхід інвертора, до якого підключаються ВЕУ та СЕС, на виході яких постійна напруга. Це суттєво спрощує систему генерування і дозволяє застосовувати надійніші та низькообертові генератори вентильного реактивного типу, які також суттєво простіші та дешевші навіть від асинхронних електричних машин.

Мета даної роботи полягає в обґрунтуванні доцільності роботи низьконапірних малих ГЕС з генераторами індукторного та вентильного реактивного типів у складі енергетичного комплексу поновлюваних джерел розподіленого генерування.

Результати досліджень. Енергетичний комплекс поновлюваних джерел у загальній структурі енергетичного балансу, що найбільш характерний, наприклад, для аграрного виробництва, показано на Рис. 1.

У загальній структурі енергетичного балансу аграрного виробництва роль сонячної енергії та глобального руху атмосферної вологи і повітряних мас є визначальною для процесів фотосинтезу і отримання врожаю. Одночасно є великі можливості використання беземісійних поновлюваних джерел енергії сонця, вітру, річок для локального заміщення традиційних енергоносіїв. За ступенем розосередження на площах сільськогосподарських угідь найбільше покриття має вітер, оскільки майже скрізь буває над відкритими місцевостями і не є об'єктом конкурування для рослин, як, наприклад фотосинтезуюча сонячна радіація ($W_{\text{фap}}$), або атмосферна волога. Одночасно можливості для встановлення СЕС обмежені потребами світла для рослин і найбільш доцільно їх розташовувати на будівельних конструкціях та непридатних для рослинництва площах. Гідралічна енергія річок також є похідною від глобальної дії енергії сонця та залежить від площі водозбору і кліматичних та геологічних умов. Отже основним обмеженням локалізації комплексу

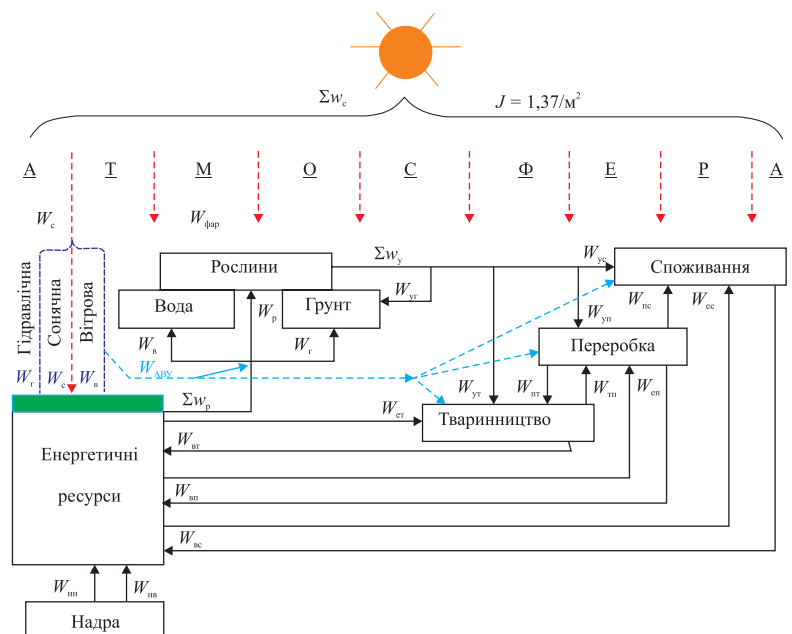


Рис. 1. Схема заміщення традиційних енергоносіїв джерелами поновлюваної енергії у структурі енергетичного балансу аграрного виробництва.

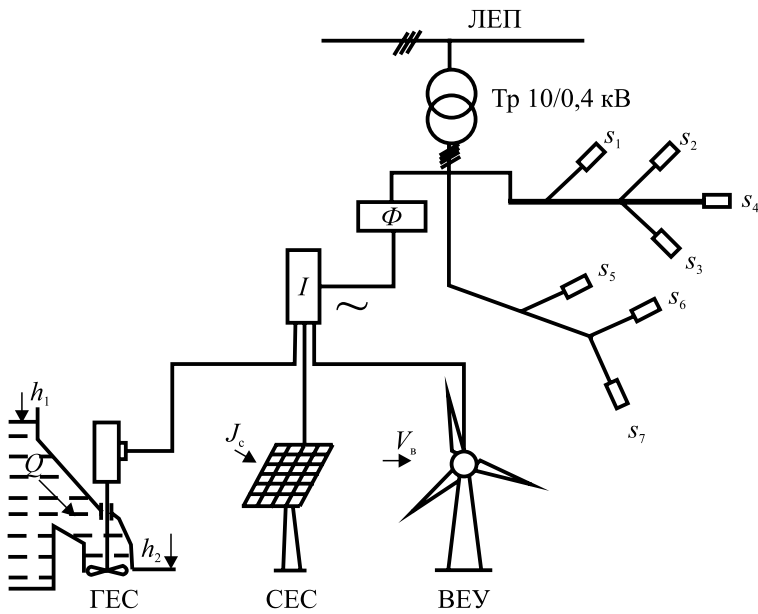


Рис. 2. Загальна схема енергетичного комплексу поновлюваних джерел у складі ГЕС, СЕС, ВЕУ.

поновлюваних енергетичних джерел розосередженого генерування слід вважати обґрунтоване місце побудови гідроелектростанції, а місце встановлення СЕС та ВЕУ раціонально проектувати поблизу ГЕС. Така підпорядкованість умов локалізації створення енергетичного комплексу поновлюваних джерел розосередженого генерування звичайно ще коригується потребами енергоспоживання та цілим рядом інших вимог.

Важливо проаналізувати можливості внеску енергетичних джерел поновлюваної енергії у структурній схемі енергетичного балансу. Сумарний енергетичний вміст отриманого врожаю, позначений на схемі ΣW_y , далі розподіляється у тваринництво W_{yt} , на переробку W_{yp} і безпосередньо на споживання W_{yc} , а також частково повертається у ґрунт енергетично вираженою W_{yt} масою залишків рослинної органіки. Частина розподіленої енергії врожаю з тваринництва, переробки та споживання повертається у формі утилізованих відходів та біопалив (відповідно W_{bt} , W_{bp} , W_{bc}) на поповнення енергетичних ресурсів. Аналогічно позначені всі зображені енерговитрати. Наприклад, сумарні енергетичні витрати у рослинництві визначаються виразом:

$$\Sigma W_p = W_b + W_p + W_r, \quad (1)$$

де W_b – прямі та матеріалізовані енерговитрати на добрива і водозабезпечення; W_r – на механічний оброботок ґрунту; W_p – на безпосередню обробку рослин при їх вирощуванні.

Витрати енергоресурсів W_t , W_p , W_c – відповідно у тваринництві, переробних технологіях та сфері споживання.

Поповнення енергоресурсів відбувається головним чином за рахунок непоновлюваних видобутих з надр енергоносіїв W_{np} , а також у незначних обсягах поновлюваних видів енергії з надр W_{nb} .

На схемі Рис. 1 також показано напрями технічного використання енергії сонця W_c , та похідних від неї форм поновлюваної енергії води річок W_r та вітру W_v . Причому, названі енергоносії можуть використовуватися як централізовано для поповнення енергоресурсів через енергосистему, так і автономно для розосередженого енергозабезпечення технологічних процесів у рослинництві, тваринництві та сфері споживання.

Побудова енергетичного комплексу поновлюваних джерел на базі ГЕС, ВЕУ та СЕС (Рис. 2) потребує також узгодження за параметрами генерованої електроенергії. Тут важливо враховувати, що сучасні СЕС виробляють електричну енергію з постійним струмом, тому для перетворення його у синусоподібний змінний струм частотою 50 Гц необхідний інвертор (I). Це обумовлює доцільність використання на малих ГЕС у складі загального енергетичного комплексу таких генераторів, які за параметрами генерованої напруги і струму задовольняють адаптивну вхідну систему спільного інвертора. Саме тому проводились дослідження розробленого і запатентованого в [1] генератора індукторного типу з кільцевим ротором для роботи на малих низьконапірних ГЕС.

Низьконапірні ГЕС будують без значного підняття рівня води h_1 верхнього б'єфу, тобто без затоплення значних площ вище греблі. Однак потужність вільного потоку води пропорційна добутку водовитрат Q на перепад рівнів $(h_1 - h_2)$, а швидкість витікання за рівнянням Торрічеллі залежить від кореня квадратного від цього параметра. Названі умови вимагають розробляти гідрогенератори з відповідними технічними характеристиками. Такий генератор був запропонований для встановлення на безтрансмійних вітроустановках і низьконапірних ГЕС. У комбінованій електричній машині був реалізований запатентований в [2] спосіб каскадного перетворення механічної енергії в електричну.

Узагальнена модель комбінованої електричної машини, яка є бездавачевою електромехатронною системою, показана на Рис. 3.

Каскадність даного типу електричної машини полягає у тому, що на спільному кільцеподібному немагнітному корпусі ротора встановлені феромаг-



нітні полюсні елементи, а статор являє собою електромехатронну систему з окремих різних статорних модулів (1) індукторного типу з магнітоелектричним збудженням та вентильного реактивного типу (2) з електромагнітним збудженням. Модуль 1 одночасно з генеруванням електрорушійної сили (ЕРС) дозволяє виконувати більш надійно ніж функцію бездавачевої ідентифікації положення феромагнітних полюсних елементів ротора [4]. Програмований мікроконтролер МК дозволяє формувати керовані струми збудження в обмотках електромагнітних модулів 2, що надає можливості регулювати режим їх роботи.

Можливо змінювати кут між віссю провідності феромагнітного полюсного елемента ротора d_p і магнітною віссю d_e електромагнітного модуля статора шляхом зміни фази імпульсу струму збудження в обмотці. Кількість модулів індукторного типу (1) та вентильного реактивного типу (2) може бути різною залежно від потреб. Варіант з мінімальними витратами магнітного матеріалу буде за мінімальної кількості індукторних магнітоелектричних модулів (1) і максимальної кількості вентильних реактивних електромагнітних модулів (2). За протилежного співвідношення з максимальною кількістю або повністю виконаним статором з індукторними магнітоелектричними модулями генератор регулюється лише методом переключення кількості послідовних і паралельних обмоток, однак це повністю задовольняє гідрогенератори.

Для підвищення енергетичних показників індукторного генератора з магнітним збудженням запропоновано біпакетний тип статорного модуля з кільцевим ротором (Рис. 4).

На Рис. 4 магнітопровід статорного модуля розгалужений на два пакети 1 і 2 відносно спільних ділянок 3, до яких приєднані полюси N і S постійного магніту. Кільцевий ротор складається з однакових за просторовими розмірами b, h, l немагнітних 4 і магнітопровідних 5 ділянок з полюсним поділом τ . На кожний з пакетів намотано якірні обмотки (відповідно 6 і 7) для індуктування в них ЕРС e_1 і e_2 у протифазі.

Принцип дії біпакетного індукторного модуля показано на схемі розгортки Рис. 5.

Рис. 5 представляє схему розгортки біпакетної магнітоелектричної системи дугостаторного індукторного генератора з кільцевим ротором (Рис. 5, а); суміщений зі схемою координатний графік магнітної провідності (Рис. 5, б); суміщені графіки магнітних потоків у магнітопроводах (Рис. 5, в); графіки ЕРС в якірних обмотках пакетів (Рис. 5, г).

В якірних обмотках кожного з пакетів наводяться змінні ЕРС, які визначаються за наступними формулами:

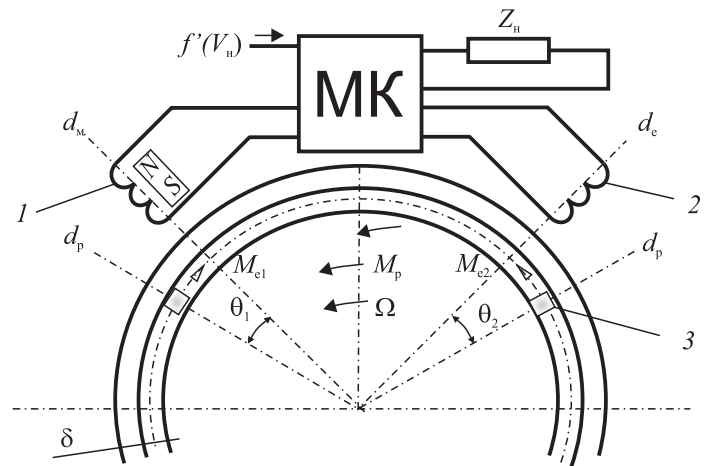


Рис. 3. Узагальнена модель каскадної електричної машини для низьконапірної ГЕС. Позначено: 1 – обмотка магнітоелектричного модуля; 2 – обмотка електромагнітного модуля; 3 – пасивний феромагнітний полюсний елемент кільцевого ротора.

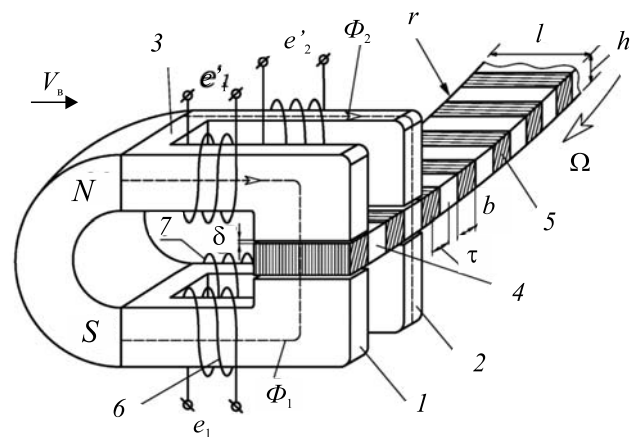


Рис. 4. Загальна схема біпакетного статорного модуля.

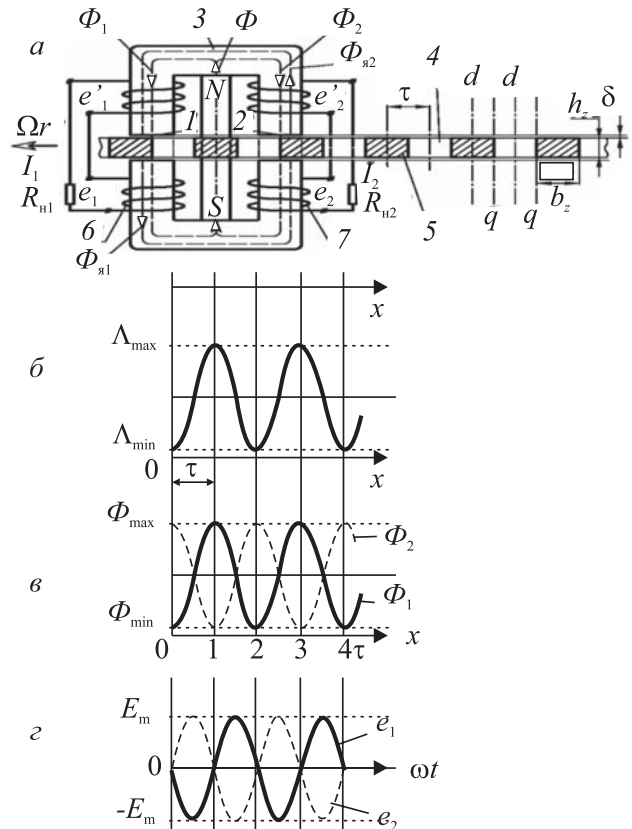


Рис. 5. Розгортка біпакетного індукторного модуля з суміщеними графіками.

Таблиця. Значення напруги і струму для трифазних схем біпакетних модулів.

№ схеми	Кратність зміни напруги	Кратність зміни струму
1	$U_{\phi} = 4U_1, U_n = 4\sqrt{3} U_1$	$I_{\phi} = I_n = I_1$
2	$U_{\phi} = U_n = 4U_1,$	$I_{\phi} = I_1, I_n = \sqrt{3} I_{\phi} = \sqrt{3} I_1$
3	$U_{\phi} = 3U_1, U_n = 3\sqrt{3} U_1$	$I_{\phi} = I_n = 4I_1/3$
4	$U_{\phi} = U_n = 3U_1$	$I_{\phi} = 4I_1/3, I_n = \sqrt{3} I_{\phi} = 4 I_1/\sqrt{3}$
5	$U_{\phi} = 2U_1, U_n = 2\sqrt{3} U_1$	$I_{\phi} = I_n = 2I_1$
6	$U_{\phi} = U_n = 2U_1$	$I_{\phi} = 2I_1, I_n = \sqrt{3} I_{\phi} = 2\sqrt{3} I_1$
7	$U_{\phi} = U_1, U_n = \sqrt{3} U_1$	$I_{\phi} = I_n = 4I_1$
8	$U_{\phi} = U_n = U_1$	$I_{\phi} = 4I_1, I_n = \sqrt{3} I_{\phi} = 4\sqrt{3} I_1$

$$e_1 = -\frac{wk_0 d\Phi_1(t)}{dt} = -\frac{wk_0 d(\Phi_{\max} \sin^2 \omega t)}{dt} = -E_{\max} 2 \sin \omega t \cos \omega t = -E_{\max} \sin 2\omega t, \quad (2)$$

$$e_2 = -\frac{wk_0 d\Phi_2(t)}{dt} = -\frac{wk_0 d(\Phi_{\max} \sin^2(\omega t + \frac{\pi}{2}))}{dt} = E_{\max} 2 \sin \omega t \cos \omega t = E_{\max} \sin 2\omega t, \quad (3)$$

де ω – кількість витків обмотки, k_0 – обмотковий коефіцієнт.

На графіках можна перевірити фізичну коректність наведених виразів. Так на ділянці 0–1 (Рис. 5, в) магнітний потік Φ_1 у першому пакеті за рахунок входження у його робочий повітряний проміжок феромагнітного елемента ротора буде зростати, що зумовлюватиме індукування ЕРС e_1 згідно з правилом Ленца негативного знаку. На ділянці 1–2 під час виходу цього феромагнітного елемента з пакету магнітний потік зменшуватиметься, а ЕРС буде мати позитивне значення. Аналогічно можна проаналізувати змінення ЕРС e_2 в обмотці іншого пакету.

На схемі розгортки можна також наочно представити механізм дії магнітних потоків реакції якоря $\Phi_{я1}$ та $\Phi_{я2}$ у біпакетній системі. Так, наприклад, рух феромагнітного елемента ротора у напрямі збільшення розбіжності з положенням

стійкої рівноваги зумовлює зменшення магнітної провідності, а внаслідок цього у якірній обмотці індукується ЕРС e_1 і струм I_1 такого напрямку, який створює магнітний потік реакції якоря $\Phi_{я1}$, що протидіє зменшенню потокозчеплення, тобто за напрямом співпадає з магнітним потоком збудження, сумарно $\Phi_{я1} + \Phi_1$. Одночасно в іншому пакеті, де рух феромагнітного елемента ротора у напрямі зростання магнітної провідності, магнітний потік реакції якоря $\Phi_{я2}$ протидіє зростанню потокозчеплення і направлений зустрічно потоку збудження, тому результуючий потік $\Phi_2 - \Phi_{я2}$. Оскільки магнітний потік від постійного магніту нерегульований, принципово можливо підтримувати рівне абсолютне значення потоку реакції якоря, за якого повністю компенсуватиметься його постійна складова. Таким чином, магнітні потоки реакції якоря у біпакетній системі утворюють паралельний відносно постійного магніту контур магнітопроводу і направлені послідовно, обумовлюючи процес створення електромагнітного моменту та електромеханічного перетворення енергії в режимі генератора.

Виконання статора біпакетними модулями дозволяє реалізувати не лише однофазну, але і симетричну трифазну систему за рахунок зміщення пакетів відповідно до схеми, зображеної на Рис. 6.

За рахунок взаємного зміщення встановлених на статорі біпакетних модулів відповідно на третину і дві третини полюсного поділу ротора виконана симетрична трифазна система (Рис. 6). На трьох біпакетних модулях загалом буде XII котушкових обмоток, які можна сполучати різними схемами з метою регулювання напруги і струму в діапазоні, наведеному в Таблиці.

Співвідношення лінійної і фазної напруг для різних схем сполучення обмоток базується на умовах незмінності потужності однієї обмотки, яка дорівнює добутку струму на напругу у разі певного коефіцієнта потужності, наприклад, при активному навантаженні. За таких умов існує технічна можливість комутаційного регулювання напруги трифазної системи у діапазоні від 1 до

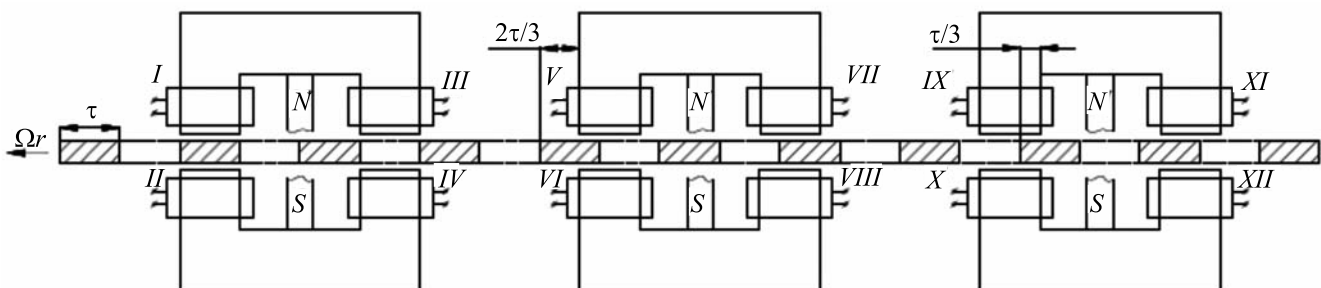


Рис. 6. Схема розгортки симетричної трифазної системи, виконаної за допомогою трьох біпакетних модулів.



$4\sqrt{3}$ номінального значення і у такому ж діапазоні, але оберненому співвідношенні, змінюється струм. Збільшення потужності за рахунок дублювання потрібної кількості встановлених біпакетних модулів дозволяє багаторазово розширити можливу кількість комутацій, що забезпечує якість процесів генерування і енергоспоживання.

Принцип функціонування вентильного реактивного модуля проаналізуємо аналогічно [5] за допомогою схеми розгортки (на Рис. 7) із суміщеними координатними графіками індуктивностей і струмів. Система складається з якірної обмотки 1, намотаної на магнітопровід 2, в якому виконаний робочий проріз, де безконтактно рухається кільцевий ротор з рівномірними немагнітними 3 і феромагнітними 4 ділянками.

Обмотка 1 електрично сполучена через керувані вентиля VS1 і VS2 відповідно з джерелом напруги U_r і навантаженням Z_n . Рух феромагнітних елементів ротора спричиняє змінення магнітної провідності, а відтак індуктивності системи за гармонійним законом. Оскільки на феромагнітний елемент ротора можуть діяти лише сили притягування незалежно від напрямку магнітного потоку, перетворення механічної енергії в електричну можливе лише у фазі виходу з положення стійкої рівноваги, коли індуктивність зменшується ($dL/d\theta < 0$). Це описується рівнянням електричного кола:

$$U = Ri + d\psi / dt = Ri + \Omega d\psi / d\theta, \quad (4)$$

де ψ – потокозчеплення, $\psi = Li$. Тоді вираз (4) буде мати вигляд:

$$U = Ri + \Omega d(Li) / d\theta = Ri + Ldi / dt + \Omega idL / d\theta \quad (5)$$

У рівнянні (5): Ldi/dt – ЕРС самоіндукції (трансформаторна складова); $\Omega idL/d\theta$ – ЕРС електромеханічного перетворення, що генерується внаслідок зміни кутового положення кільцевого ротора; генераторний режим реалізується за умови ($dL/d\theta < 0$).

Помноживши складові на струм отримаємо вираз для балансу потужностей системи:

$$Ui = Ri^2 + Lidi / dt + \Omega i^2 dL / d\theta \quad (6)$$

Аналіз рівняння (6) показує, що ефективність даної електромеханічної системи залежить від швидкості та кратності змінення індуктивності в процесі механічного руху, а також реалізується за умови мінімального активного опору обмотки.

Трегуб М.И., Василенко О.С., Демещук В.А.

НИЗКОНАПОРНЫЕ ГЭС В КОМПЛЕКСЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ РАССРЕДОТОЧЕННОГО ГЕНЕРИРОВАНИЯ

В работе показаны целесообразность и принципы создания энергетического комплекса возобновляемых источников рассредоточенного генерирования в составе низконапорных гидроэлектростанций малой мощности и сораз-

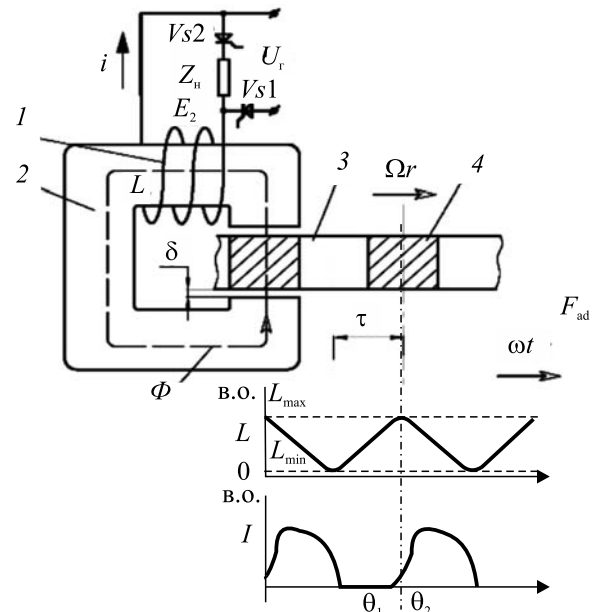


Рис. 7. Розгортка і суміщені графіки вентильного реактивного модуля.

Висновки. В роботі обґрунтовано, що для зменшення нерівномірності генеруючих потужностей сонячних та вітрових електростанцій необхідно створювати енергетичний комплекс на базі низконапірних ГЕС на існуючих водоймах малих річок.

Представлено перспективні розробки комбінованого генератора індукторного і вентильно-реактивного типу, які за простотою будови і показниками генерованої електроенергії доцільно встановлювати на низконапірних ГЕС у складі енергетичного комплексу з спільним інвертором.

ЛІТЕРАТУРА

1. Трегуб М.И., Козирський В.В. Індукторний дугувий електрогенератор. / Патент України № 95048. – МПК H02K21/38, H02K21/48, H02P9/10. № а 201012001. – Заявл. 11.10.2010 р.; опубл. 25.06.2011 р. – Бюл. № 12.
2. Трегуб М.И. Спосіб каскадного перетворення механічної енергії в електричну. / Патент України № 88770. – МПК (2014.01) H02K 19/00 № u 2013 13740. – Заявл. 26.11.2013 р. опубл. 25.03.2014 р. – Бюл. № 6.
3. Трегуб М.И. Індукторний біпакетний генератор. / Патент України № 91801. – МПК (2006.01) H02K 19/20, 21/38 № u201402729. – Заявл. 18.03.2014 р.; опубл. 10.07.2014 р. – Бюл. № 13.
4. Сінчук О.М., Козакевич І.А., Юрченко М.М. Бездатчикове керування вентильними реактивними двигунами тягових електромеханічних систем. // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 5. – С. 62–66.
5. Рисованый С.В., Филькеништейн В.Б. Проектирование вентильных реактивных двигателей. – (Монография, Харьковский нац. ун-т гор. хоз-ва им. А.Н. Бекетова). – Х.: ХНУГХ, 2014. – 245 с.



мерных солнечных и ветровых электростанций, а также описаны разработки комбинированного генератора индукторного и вентильно-реактивного типа, перспективного для низконапорных ГЭС.

К л ю ч е в ы е с л о в а: комплекс возобновляемых энергоисточников, низконапорные гидроэлектростанции, индукторный генератор, вентильный реактивный генератор, каскадная электрическая машина.

Tregub M.I., Vasilenko O.S., Demeschuk V.A.

LOW-HEAD HYDROELECTRIC STATIONS IN THE COMPLEX OF RENEWABLE POWER SOURCES WITH DISTRIBUTED GENERATION

The article shows the practicability and presents the principles for creation of the energy complex of renewable power sources with distributed generation as a part of the low-head low-power hydroelectric stations and the proportioned solar electric plants and wind-power stations. The developments of combined inductor and rectifier-reluctance generator promising for low-head hydroelectric stations are described.

К е у w o r d s: complex of renewable power sources, low-head hydroelectric station, inductor generator, rectifier-reluctance generator, cascade electric machine.

© Трегуб М.І., Василенко О.С., Демещук В.А., 2020

