

УДК 621.313

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.063>

## ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАЦІЇ ТА ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Л.І. Мазуренко<sup>\*</sup>, докт. техн. наук, В.В. Гребеніков<sup>\*\*</sup>, докт. техн. наук, О.В. Джура<sup>\*\*\*</sup>, канд. техн. наук, О.В. Бібік<sup>\*\*\*\*</sup>, канд. техн. наук, Р.В. Гамалія, канд. фіз.-мат. наук, М.О. Шихненко<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна e-mail: [mlins@ied.org.ua](mailto:mlins@ied.org.ua)

*Представлено основні наукові і практичні результати, які отримано при виконанні науково-дослідних робіт. Проведено порівняльний аналіз модифікації магнітної системи електрогенератора з постійними магнітами. За результатами математичного моделювання сформовано механічну характеристику вентильно-індукторного двигуна тягового електропривода за максимальним значенням ККД. Обґрунтовано можливості стабілізації частоти обертання дослідного зразка вентильно-індукторного двигуна та розроблено рекомендації щодо вибору моменту інерції привода одноциліндрових компресорів на його основі із забезпеченням регламентованого рівня пульсації частоти обертання ротора для діапазону регулювання 1:4. Розроблено моделі та алгоритми керування системи розподіленої генерації з вітроелектричними установками на основі асинхронних генераторів у процесі паралельної роботи з мережею, досліджено вплив установок розподіленої генерації на втрати в тупиковій гілці мережі. Запропоновано технічне рішення, проведено розрахунки, розроблено робочу конструкторську документацію, виготовлено дослідний зразок багатофункціонального автономного електроагрегата однофазного струму підвищеної якості електроенергії. Бібл. 16, рис. 10, таблиця.*

**Ключові слова:** електрогенератор з постійними магнітами, вентильно-індукторний двигун, імітаційна модель, асинхронний генератор, автономний електроагрегат, пуско-зарядний пристрій, розподілена генерація, вітроелектричні установки.

Науково-дослідна робота «Розвиток наукових засад та розробка структур і моделей електромеханотронних перетворювачів енергії явнополюсної і зубцево-пазової конфігурації з постійними магнітами» ("МАГНІТ"), 2015–2019 р.

Джерело фінансування – державні бюджетні асигнування на наукові дослідження.

Науково-дослідна робота спрямована на розробку наукових засад створення оптимальних структур магнітних систем електромеханотронних перетворювачів енергії (ЕМПЕ) з постійними магнітами (ПМ) із заданими властивостями та покращеними енергетичними характеристиками, вдосконалення математичних моделей для розрахунку електромагнітних, перехідних та теплових процесів, а також проведення досліджень і розробку оптимальних алгоритмів керування ЕМПЕ з ПМ. Під час виконання роботи досліджено вплив магнітної системи ротора з постійними магнітами на характеристики електрогенератора для дизель-генераторної установки і визначено конфігурацію, за якої досягається максимальне значення електромагнітного моменту і потужності. Розглянуто три конфігурації магнітної системи ротора: в електрогенераторі М1 ротор має шість полюсів з постійними магнітами (ПМ) тангенціальної намагніченості; в електрогенераторі М2 – шість полюсів з ПМ радіальної намагніченості; в електрогенераторі М3 – кожен з полюсів має дванадцять ПМ, розміщених таким чином, що між ПМ є тонкий шар електротехнічної сталі (рис. 1). В електрогенераторі М2 магніти мають непрямокутну форму і для їх виготовлення потрібна прес-форма спеціальної конфігурації. В електрогенераторі М3 магніти мають прямокутну форму і монтуються в пакет електротехнічної сталі. У всіх досліджуваних моделях статор має незмінну конфігурацію, і його розміри аналогічні розмірам статора асинхронного електродвигуна АИР90L8, що має зовнішній діаметр  $D_a=149$  мм, внутрішній діаметр статора –  $D_i=104$  мм, число пазів –  $Z_p=48$  і висоту пазів  $h_s=14,5$  мм, довжину активної частини статора та ротора –  $l_{Fe} = 100$  мм. Величина повітряного зазора між статором і ротором дорівнює  $\delta = 2$  мм.

© Мазуренко Л.І., Гребеніков В.В., Джура О.В., Бібік О.В., Гамалія Р.В., Шихненко М.О., 2019

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7059-249X>; <https://orcid.org/0000-0002-1114-1218>;

<https://orcid.org/0000-0002-0224-3351>; <https://orcid.org/0000-0002-6236-6732>;

<https://orcid.org/0000-0003-4012-1731>

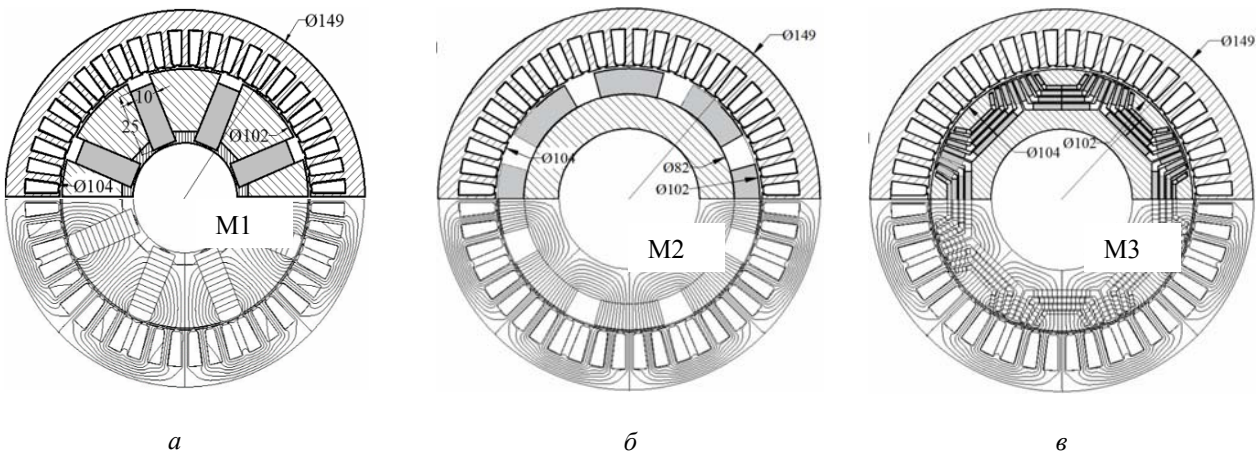


Рис. 1

Загальна маса магнітів для кожного електродвигуна однакова:  $m_{PM} = 1,5$  кг.

Отримано наступні нові наукові й практичні результати.

Здійснено розрахунок магнітного поля та електромагнітного моменту для всіх моделей електрогенераторів у програмному пакеті INFOLYTICA MAGNET за таких умов: тип постійних магнітів – N42; магнітопровід ротора для моделей M1 і M2 – конструкційна сталь СТ20 (з урахуванням нелінійності кривої намагнічування сталі); магнітопровід статора і ротора для моделі M3 – сталь СТ2211.

Отримано залежності зубцевого моменту (cogging) від кута повороту ротора для моделей M1 і M2 (рис. 2). На рис. 2 а показано залежності зубцевого моменту зі скосом і без скосу полюсів для моделі M1, а на рис. 2 б – для моделі M2. Слід зазначити, що ротор типу M1 має найбільший зубцевий момент, однак застосування скосу полюсів дозволяє значною мірою знизити пульсації зубцевого моменту. Під час моделювання скіс полюсів приймався рівним  $\theta_{skew}=7,5^\circ$  для всіх розглянутих конфігурацій.

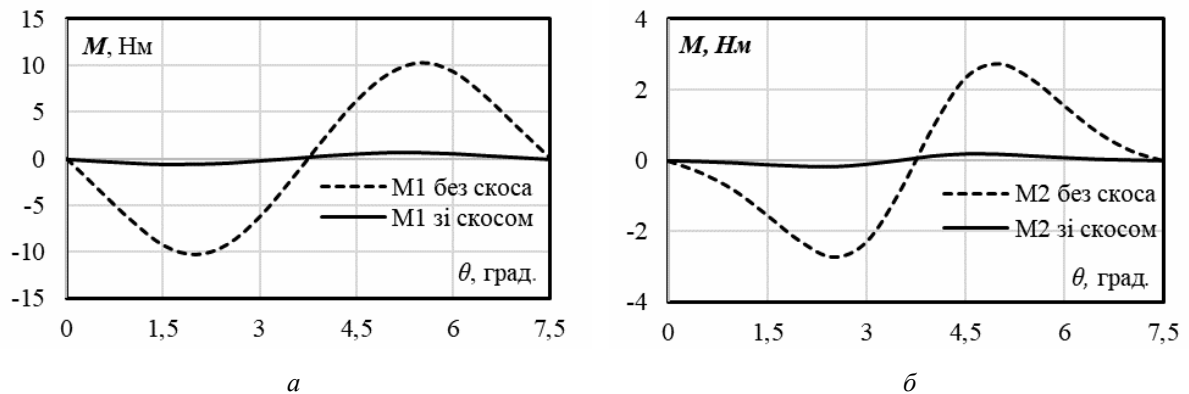


Рис. 2

Отримано залежності фазної напруги генератора з тангенціально намагніченими магнітами ротора (геометрія M2) без скосу полюсів на роторі і зі скосом полюсів (відповідно рис. 3 а, б). Частота обертання вала генератора в усіх дослідженнях прийнята рівною  $n = 3000$  об/хв. З цих графіків випливає, що скіс полюсів ротора генератора з ПМ істотно знижує пульсації напруги, викликані взаємодією постійних магнітів ротора з феромагнітними зубцями статора.

Промодельовано роботу генераторів під навантаженням з різними роторами (M1, M2, M3). Для цього обмотки генераторів через трифазний діодний міст були з'єднані з активним опором навантаження. Опір навантаження змінювався в діапазоні  $R_n=15\dots 1000$  Ом. На рис. 4 а показано залежності напруги навантаження  $U_n$  від струму навантаження  $I_n$ , а на рис. 4 б –

залежності потужності навантаження  $P_H$  від цього струму. Струму  $I_H=20$  А відповідає номінальна щільність струму в обмотках генератора  $J_H=5$  А/мм<sup>2</sup>. Як випливає з результатів моделювання, найкращими зовнішніми характеристиками володіє генератор з ротором РМА-SynRM(M3), а найгіршими – з ПМ радіальної намагніченості (M2).

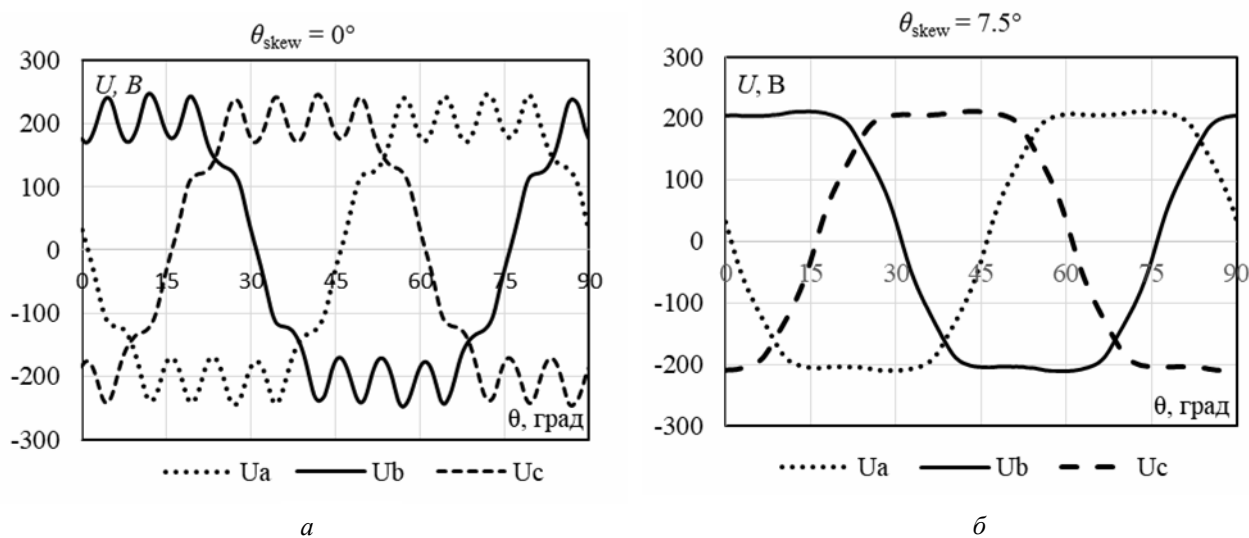


Рис. 3

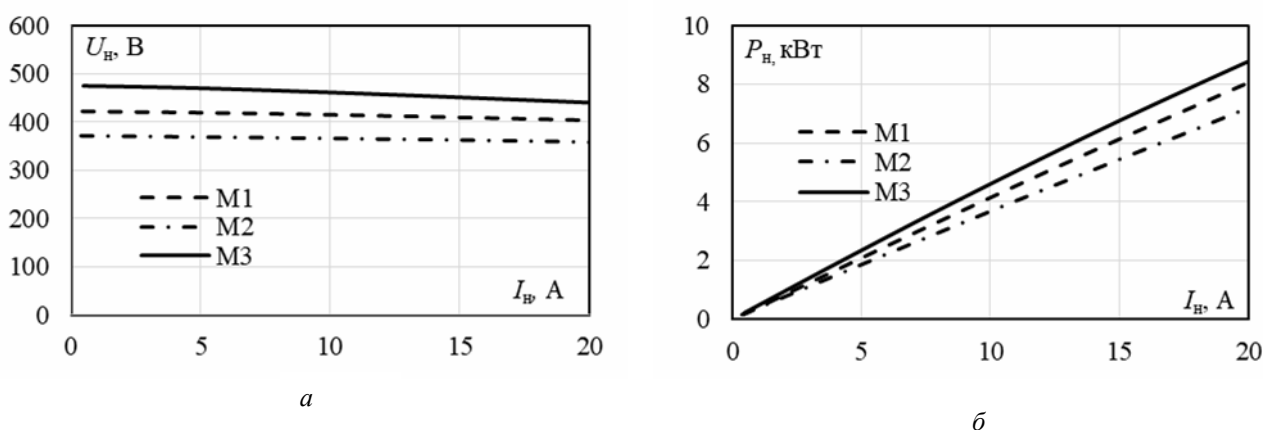


Рис. 4

Розраховано основні параметри досліджуваних моделей електрогенераторів. У наведеній таблиці позначено:  $M_{z(\max)}$  – максимальне значення зубцевого моменту за відсутності скосу полюсів на роторі;  $M_{z(\max)s}$  – максимальне значення зубцевого моменту зі скосом полюсів на роторі;  $M_r$  – номінальний момент генератора;  $P_H$  – номінальна потужність генератора;  $U_H$  – номінальна напруга генератора. Номінальний момент, потужність і напругу наведено за частоти обертання  $n = 3000$  об/хв і щільності струму в обмотках  $J = 5$  А/мм<sup>2</sup>.

Таким чином, за результатами дослідження моментних і зовнішніх характеристик трьох типів електрогенераторів з різною конфігурацією магнітної системи ротора визначена конфігурація з найкращими характеристиками. З огляду на технологічну складність виготовлення ротора РМА-SynRM (M3) і задовільні характеристики генератора (M1) геометрію ротора з тангенціально намагніченими ПМ (M1) слід прийняти оптимальною в процесі виробництва електрогенераторів.

За період виконання теми отримано п'ять патентів та опубліковано 22 наукові статті, в тому числі [1–4].

	$M_{z(\max)}$ , Нм	$M_{z(\max)s}$ , Нм	$M_r$ , Нм	$P_H$ , кВт	$U_H$ , В
Модель M1	10,29	0,66	28,87	8,33	398
Модель M2	2,75	0,19	25,72	7,20	358
Модель M3	3,21	0,23	31,98	8,72	415

Науково-дослідна робота "Провести дослідження та розробити технічні рішення для підвищення надійності електромеханічного обладнання електричних станцій" ("АГРЕГАТ"), відомчо-прикладна, січень 2016 р. – грудень 2018 р.

Джерело фінансування – державні бюджетні асигнування на наукові дослідження.

Науково-дослідна робота спрямована на підвищення надійності електромеханічного комплексу генерації електроенергії, що забезпечується підвищенням надійності складових комплексу – турбогенераторів, електричних двигунів власних потреб, в тому числі вентиляльно-індукторного типу. Дослідження включають розроблення імітаційної моделі вентиляльно-індукторних двигунів (ВІД) для дослідження робочих режимів, проектування і формування їхніх характеристик з урахуванням конструкційних особливостей і умов експлуатації, розроблення рекомендацій по підвищенню ефективності та надійності електромеханічних комплексів на основі таких двигунів.

Отримано такі **основні наукові й практичні результати**.

Розроблено імітаційну модель вентиляльно-індукторних двигунів з урахуванням особливостей складових та їх взаємного впливу. Математичне моделювання вентиляльно-індукторного приводу виконано в середовищі MATLAB – Simulink з використанням стандартних блоків бібліотеки SymPowerSystems. Розроблено комплексну імітаційну модель ВІД з урахуванням типу комутатора, механічних і магнітних втрат, характеру навантаження, що дозволяє досліджувати робочі режими ВІД у складі електромеханічного обладнання та формувати характеристики за зміни напруги живлення, кутів комутації та навантаження.

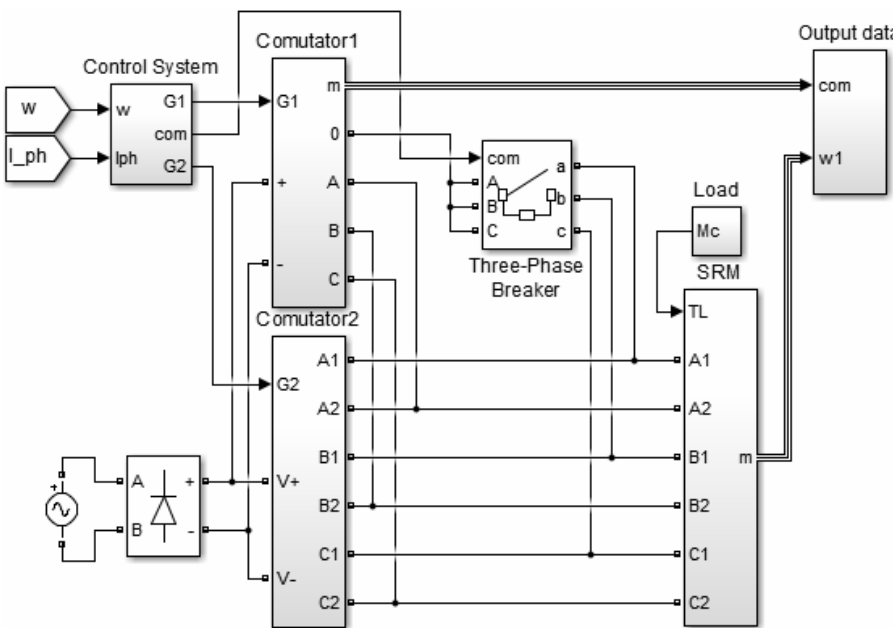


Рис. 5

Імітаційна модель (рис. 5) ілюструє схему ВІД за обраним типом комутатора: із C-скиданням і коливальним поверненням енергії [5] – Comutator1 або за схемою асиметричного моста – Comutator2.

Модель представлена блоками індукторної машини (SRM), двох типів комутаторів, трифазного вимикача (Three-Phase Breaker), системи керування (Control System) та навантаження (Load). Система керування визначає, за допомогою якого з комутаторів

здійснюється підключення ВІД до регульованої мережі змінного струму напругою 0...380 В, 50 Гц. Якщо керуючий вплив подається через вихід G1, а сигнал com=1, то реалізується схема з комутатором із C-скиданням і коливальним поверненням енергії (Comutator1); якщо через вихід G2, а com=0 – з комутатором за схемою асиметричного моста (Comutator2). Вихідні параметри формуються у блоці (Output data).

У функції вхідних параметрів математичної моделі ВІД використано кути вмикання  $\theta_{em}$  і вимикання  $\theta_{вим}$ , напругу ланки постійного струму  $U_d$  та залежності індуктивності фази від кута повороту ротора  $\theta_\phi$  (відносно даної фази) і фазного струму  $L_\phi = f(\theta_\phi, i_\phi)$ , які розраховано методом скінченних елементів. Моменти навантажень представлено у вигляді нелінійних часових залежностей для конкретних типів електромеханічного обладнання.

На основі аналізу характеристик режимів ВІД за зміни напруги живлення та кутів комутації з урахуванням навантаження визначено найбільш ефективні режими за максималь-

ним значенням ККД та сформовано алгоритми регулювання і стабілізації частоти обертання їх роторів згідно з технологічними вимогами до електромеханічних комплексів, що досліджуються. Проведені дослідження [5–7] завдяки розробленій математичній моделі дали змогу обґрунтувати доцільність використання вентиляно-індукторних двигунів у складі регульованих електроприводів верстатів-гойдалок, насосів і поршневих компресорів.

Розроблено вентиляно-індукторний двигун з конфігурацією 6/4 для приводу свердловинного штангового насосного агрегату з такими характеристиками: частота обертання 1500 об/хв, потужність 55 кВт, довжина статора і ротора  $l_{\delta} = 290$  мм, зовнішній діаметр статора  $D_a = 300$  мм, ККД 94,4 %. Значення ККД розробленого вентиляно-індукторного двигуна на 1,4...7,5 % більше, а загальна маса у 2 рази менша, ніж у двошвидкісного асинхронного двигуна 4A250S4/2У3.

На етапі попереднього проектування ВІД (визначення геометричних розмірів статора і ротора та розрахунку його параметрів) використано методику ескізного проектування, що базується на спрощеному розрахунку перехідного процесу ВІД на циклі комутації фази. Як вхідні параметри моделі ВІД використано залежності індуктивності фази від кута повороту ротора і фазного струму  $L_{\phi} = f(\theta, i_{\phi})$ , розраховані методом скінчених елементів [8].

За допомогою комплексної математичної моделі ВІД з комутатором за схемою асиметричного моста (рис. 5) проведено дослідження впливу кутів вмикання і вимикання, числа витків обмотки фази статора і довжини магнітопроводу на ККД у робочих режимах. Визначено оптимальні значення кутів вмикання і вимикання ( $\theta_{\text{вм}} = 36$  град і  $\theta_{\text{вим}} = 66$  град), що забезпечують ККД у діапазоні 94,4...94,55 % за зміни корисної потужності від 54 до 27 кВт для частот обертання 1500...3000 об/хв., що дозволяє здійснювати регулювання частоти обертання зі збереженням високої енергоефективності приводу верстата-гойдалки за зміни навантаження. Індукції та густина фазного струму ВІД знаходяться в рекомендованих діапазонах відповідно 1,6...1,7 Тл і 3...8 А/мм<sup>2</sup>, потужність вентиляно-індукторного двигуна задовольняє діапазон рекомендованих потужностей двигунів верстат-гойдалок (від 1,5 до 55 кВт). Досліджено квазісталі режими, визначено пульсації частоти обертання ротора (до 3 %) для 3000 і 1500 об/хв та 46 % – для частоти обертання 750 об/хв.

Сформовано механічну характеристику вентиляно-індукторного двигуна тягового електроприводу за максимальним значенням ККД. Для обґрунтування ефективності використання тягового вентиляно-індукторного електроприводу спроектовано ВІД з конфігурацією 8/6, потужністю  $P_2 = 3$  кВт на номінальну частоту обертання 740 об/хв і напругу живлення 530 В за наступних умов формування механічної характеристики: у діапазоні від 0 до 740 об/хв – забезпечення необхідного пускового моменту, від 740 до 3000 об/хв – робота при сталій потужності, за частоти, більшої 3000 об/хв (до 3600 об/хв), – потужність змінюється обернено пропорційно частоті обертання. Запропоновано спосіб формування механічної характеристики тягового електроприводу на основі вентиляно-індукторного двигуна за максимальним значенням ККД. Розроблено алгоритм керування ВІД для формування механічної характеристики кожного з діапазонів. Перший відповідає режиму пуску двигуна і виходу його на номінальну частоту обертання, в цьому діапазоні кути комутації – постійні ( $\theta_{\text{вм}} = 30$  град,  $\theta_{\text{вим}} = 55$  град). Значення пускового моменту ВІД залежать від початкового положення в період пуску нерухомого ротора і змінюються у діапазоні, який відповідає узгодженому ( $\theta = 0$  град) і неузгодженому ( $\theta = 22,5$  град) положенням ротора. На другому (робочому) інтервалі реалізовано спосіб регулювання частоти обертання ВІД (при постійній напрузі живлення), який забезпечує постійну вихідну потужність за зміни кутів вмикання  $\theta_{\text{вм}}$  (17...30 град) при практично незмінних кутах вимикання  $\theta_{\text{вим}}$  (45...48 град) за максимальними значеннями ККД, отриманими на окремих ділянках характеристики за постійної напруги 530 В. На третій частині механічної характеристики в діапазоні частот обертання  $n = 3000...3600$  об/хв реалізовано зниження потужності ВІД за необхідним законом.

Для формування необхідної тягової характеристики ВІД на попередньому етапі проведено дослідження залежностей ККД двигуна від частоти його обертання за зміни кутів вмикання і постійних кутів вимикання. У результаті визначено кути комутації, що забезпе-

чують на окремих відрізках цієї характеристики максимальні значення ККД (рис. 6 а). Це дозволило сформуванати необхідну тягову характеристику (рис. 6 б).

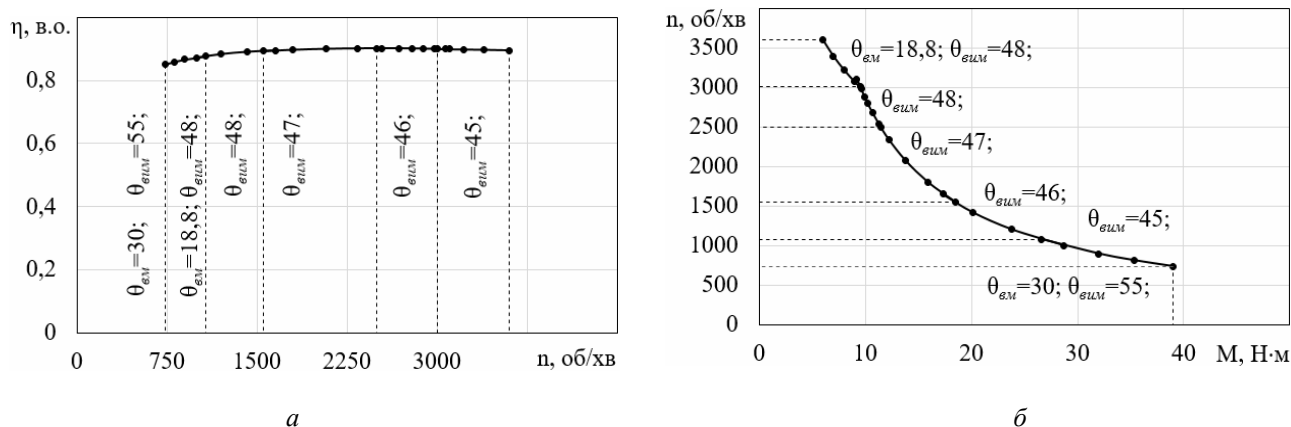


Рис. 6

Розроблено рекомендації щодо визначення моментів інерції приводу одноциліндрових компресорів одинарної дії з забезпеченням регламентованого рівня пульсацій частоти обертання ротора ВІД для діапазону регулювання 1:4. Важливим, з точки зору підвищення надійності вентильно-індукторного приводу одноциліндрових герметичних поршневих компресорів (ГПК), є забезпечення регламентованих пульсацій частоти обертання ротора (на рівні 20 %) при її регулюванні за зміни напруги в діапазоні 1:4.

Для дослідження залежностей пульсацій частоти обертання ротора ВІД з комутатором із С-скиданням і коливальним поверненням енергії одноциліндрового ГПК одинарної дії від моменту інерції приводу для різних діапазонів регулювання використано математичну модель [5], адекватність якої підтверджено порівнянням результатів чисельних та експериментальних досліджень. Визначено моменти інерції приводу, що забезпечують допустимий рівень пульсацій частоти обертання ротора ВІД при її регулюванні в діапазонах: 1:3 –  $5 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup>; 1:4 –  $1 \cdot 10^{-3}$  кг·м<sup>2</sup>.

Обґрунтовано можливості стабілізації частоти обертання дослідного зразка ВІД з комутатором із С-скиданням і коливальним поверненням енергії зміною кутів вмикання за постійної зони комутації і незмінної напруги або за одночасної зміни напруги та кутів комутації [5, 9].

За даною темою опубліковано п'ять наукових праць, у тому числі отримано патент на корисну модель [5–9].

Науково-дослідна робота **"Розроблення моделей та алгоритмів керування системи розподіленої генерації з вітроелектричними установками на основі асинхронних генераторів при паралельній роботі з мережею"** ("ОБ'ЄДНАННЯ – 3") виконувалась у межах комплексного проекту "Розроблення системи розподіленої генерації з вітроелектричними установками на основі асинхронних генераторів" цільової програми наукових досліджень НАН України «Науково-технічні основи енергетичного співробітництва між Україною та Європейським Союзом» за період часу з 01 квітня 2016 р. до 31 грудня 2018 р.

Джерело фінансування – державні бюджетні асигнування на наукові дослідження.

НДР спрямована на підвищення ефективності та надійності процесів електромеханічного перетворення енергії. Мета роботи – розробка моделей, схемотехнічних рішень, алгоритмів керування, визначення умов енергоефективного функціонування електроенергетичної системи розподіленої генерації з вітроелектричними установками на основі асинхронних вентильних генераторів.

У ході виконання роботи отримано такі нові наукові і практичні результати.

Запропоновано два варіанти виконання нового схемного рішення системи розподіленої генерації з асинхронними генераторами:

– безтрансформаторний, за якого джерела розподіленої генерації підключаються безпосередньо на стороні низької напруги 400 В (низьковольтна система, рис. 7);

– з узгоджувачими трансформаторами, за якого джерела розподіленої генерації під'єднані до вітки середньої напруги 6 (10) кВ (система середньої напруги, рис. 8).

Вперше з застосуванням блочного принципу отримано динамічну математичну модель системи розподіленої генерації з асинхронними генераторами та трансформаторно-ключовими структурами в колах їх статорних обмоток:

– модель системи розподіленої генерації об'єднано рівняннями зв'язку в єдину систему з моделями тупикової вітки мережі і споживачів;

– в отриманій системі рівнянь враховано насичення за основною гармонікою поля генераторів і силових трансформаторів;

– розроблена модель дає змогу в подальшому досліджувати електромагнітні і електромеханічні процеси в силових елементах системи і вплив джерел розподіленої генерації на параметри електричної енергії під час відпрацювання алгоритмів керування складовими елементами системи.

З використанням процедури зворотного синтезу регуляторів розроблено алгоритми векторного керування напівпровідниковими системами збудження трифазних асинхронних генераторів і мережових інверторів у складі вітроустановок, що підключені до тупикової вітки мережі (рис. 7, 8). Розраховано параметри регуляторів систем збудження генераторів та регуляторів мережових інверторів. Отримано рівняння і розраховано параметри регулятора еквівалентного навантаження в колі постійного струму генератора, що може використовуватись як баластне або для обмеження перенапруг в аварійних режимах. Запропоновано алгоритм контролю кута повороту лопатей вітрогенератора, що обертає асинхронний генератор з перетворювачем частоти в колах статора. З використанням розроблених імітаційних моделей асинхронного генератора з еквівалентним навантаженням у колі постійного струму і підключеного до мережі мережового інвертора з  $LC$ -фільтром проведено тестування запропонованих алгоритмів. Результати тестування засвідчили високу швидкість запропонованих регуляторів (тривалість перехідних процесів від 0,02 до 0,03 с).

Розроблено імітаційну модель системи розподіленої генерації низької напруги з вітроустановками, які виконані на основі асинхронних вентиляторних генераторів потужністю 60 кВт з векторним керуванням та спільного мережового інвертора, що під'єднаний до тупикової вітки мережі зі споживачами до 350 кВт.

Шляхом застосування імітаційної моделі досліджено електромеханічні процеси в системі і якість напруги на виході фільтра мережового інвертора за струмового керування його

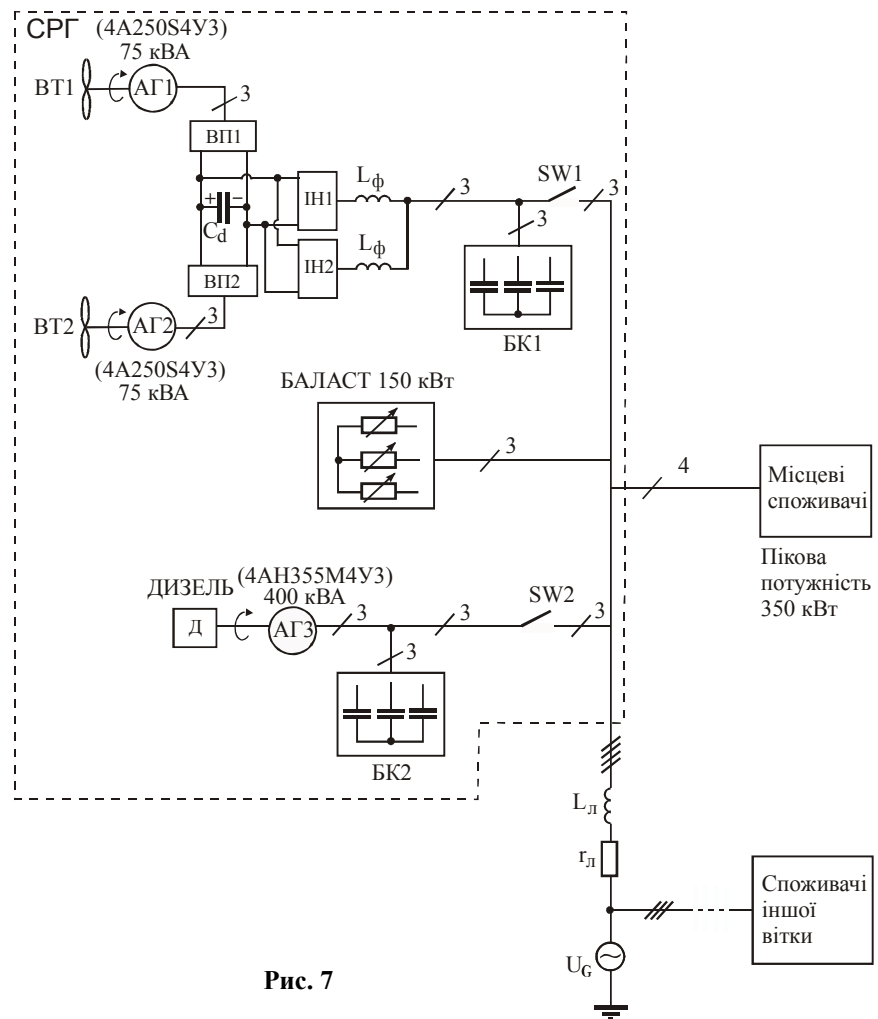


Рис. 7

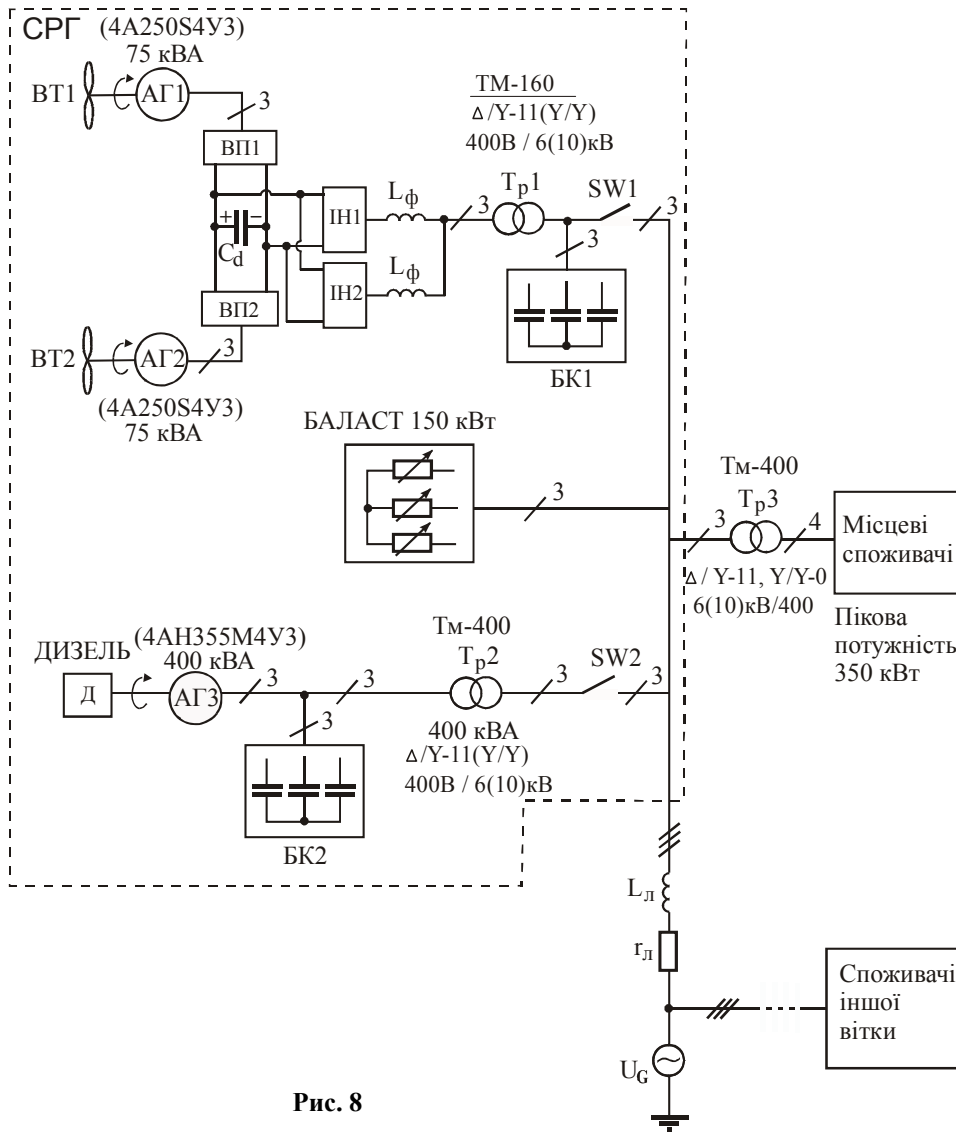


Рис. 8

ключами. Встановлено, що за постійного навантаження споживачів коефіцієнт гармонік напруги в точці під'єднання вітроустановки (ВУ) практично не залежить від швидкості вітру.

Кількісно визначено вплив швидкості вітрового потоку на величину зменшення втрат у лінії внаслідок застосування ВУ. Найбільш доцільним є підключення ВУ поблизу максимально віддалених від початку лінії споживачів, потужність яких співставна з генерованою ВУ потужністю.

Обраховано економічні показники від застосування двох ВУ з асинхронними вен-

тильними генераторами. З огляду на існуючий зелений тариф на вітрову електроенергію ці дві установки здатні виробити впродовж року електроенергії на суму від 6400 до 100400 євро, якщо швидкість вітру буде в межах 5...25 м/с (рис. 9).

Результати досліджень, отримані при виконанні НДР, буде використано в ТОВ НДІ "Перетворювач" (м. Запоріжжя) в процесі розробки силових напівпровідникових перетворювачів.

За період виконання НТР було опубліковано три наукові статі [10–12] і зроблено дві доповіді на наукових конференціях [13, 14].

Науково-технічна робота **“Розроблення багатофункціонального автономного електроагрегата”** («БЕНЗОГЕН») виконувалась за період часу з листопада 2017 р. до грудня 2018 р.

Джерело фінансування – державні бюджетні асигнування на наукові дослідження.

Робота спрямована на розроблення комплексу робочої конструкторської документації для виготовлення дослідного зразка автономного електрогенеруючого агрегата (рис. 10) підвищеної якості електроенергії (поліп-

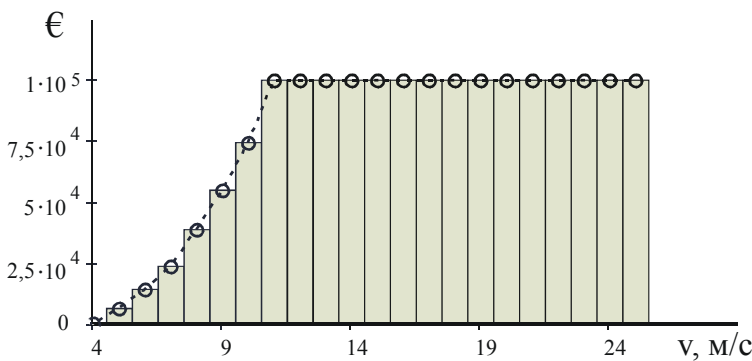


Рис. 9



шення коефіцієнту викривлення кривої напруги, зменшення часу відновлення напруги після скидання/накидання номінального навантаження) на основі бензинового двигуна, безконтактного електричного генератора однофазної синусоїдальної напруги потужністю від 2,0 кВт з конденсаторно-ключовою системою збудження і пристроєм заряду акумуляторів легкового та вантажного автотранспорту.

**Висновки.** У ході виконання роботи отримано наступні нові наукові й практичні результати.

Розвинуто теорію електричних машин у напрямку уточнення характеру протікання електромагнітних і електромеханічних процесів у автономних асинхронних генераторах зі з'єднанням обмоток статора по схемі Сміта і "неповний трикутник", розроблено їхні математичні моделі та технічні рішення систем збудження, спрямовані на підвищення енергоефективності та якості електроенергії генераторів.

На основі методики розрахунку статичних характеристик асинхронних генераторів з нерегульованою системою збудження і однофазним навантаженням проведено розрахунки статичних характеристик асинхронного генератора зі з'єднаними за схемами Сміта і "неповний трикутник" фазами статорної обмотки і додатковим хомутованим конденсатором збудження за різних порогів гістерезисного елемента та величин конденсаторів збудження.

Розроблено схеми електричні принципові системи керування генератора, силової частини системи збудження та математичне забезпечення керуючої програми системи керування та здійснено вибір її параметрів. Основною функцією програми є формування логічних сигналів для драйвера транзистора конденсаторно-ключового регулятора реактивної потужності. Основною задачею програми є підтримання заданої напруги АГ, що вирішується за допомогою гістерезисного регулятора. Закладені в програмі функції запобігають виникненню перехідних процесів, викликаних комутаціями транзистора напівпровідникового ключа для підключення секцій конденсаторів.

За структурною схемою імпульсного пуско-зарядного пристрою з високочастотним трансформатором розроблено схему електричну принципову цього пристрою та виконано розрахунок основних елементів (випрямляч, високочастотний трансформатор, високочастотний інвертор, вихідний каскад). Представлено габаритно-установче креслення, керівництво з експлуатації та схему підключення. Виготовлено дослідний зразок пуско-зарядного пристрою. Його випробування підтвердили правильність вибраних рішень та виконання технічних вимог (Співвиконавець – ТОВ «НДІ «Перетворювач», м. Запоріжжя).

Розроблено імітаційну модель автономного однофазного асинхронного генератора зі з'єднанням обмоток по уточненій схемі "неповний трикутник" з урахуванням зміни величин напруги і частоти генератора, частоти обертання приводного двигуна. Отримано залежності параметрів робочого режиму, які забезпечили аргументований вибір (з урахуванням енергоефективності системи і діапазону коливань напруги і частоти) величини ємностей конденсаторів системи збудження та остаточний вибір приводного бензинового двигуна.

Розроблено конструкторську документацію для виготовлення рами електроагрегата, на якій монтується двигун внутрішнього згорання, асинхронний генератор, паливний бак, блок збудження генератора, панель керування, а також втулочно-пальцевої муфти для з'єднання кінців валів приводного двигуна і генератора. Конструкторська документація дозволила виготовити вузли електроагрегату та виконати його монтаж.

Створений дослідний зразок електроагрегата має такі технічні характеристики: привод генератора – бензиновий двигун потужністю 7 к.с.; тип генератора – асинхронний



Рис. 10

генератор з короткозамкненим ротором; номінальна/максимальна потужність генератора за активного навантаження – 2/2,3 кВт; номінальна напруга – 230 В; відхилення напруги у стабільному тепловому стані  $\leq 10\%$ ; перехідне відхилення напруги при скиданні/накиданні номінального навантаження  $\leq 30\%$ ; коефіцієнт викривлення кривої напруги  $\leq 15\%$ ; час відновлення після скидання/накидання номінального навантаження  $\leq 2$  с; сталі відхилення частоти  $\leq 2,5\%$ ; вихідна потужність/номінальна напруга пуско-зарядного пристрою в режимі заряду акумулятора – 400 Вт/12 В; струм заряду – 0...29 А; ємність акумулятора – до 190 А·год.

За період виконання НТР було опубліковано одну наукову статтю [15] і зроблено одну доповідь на науковій конференції [16].

Фінансується за держбюджетними темами: «Розвиток наукових засад та розробка структур і моделей електромеханотронних перетворювачів енергії явнопольної і зубцево-назової конфігурації з постійними магнітами» (шифр "МАГНІТ"), що виконувалася за Постановою Бюро ВФТПЕ від 18.01.2014 р., протокол № 16. Державний реєстраційний номер роботи 0115U002609; "Провести дослідження та розробити технічні рішення для підвищення надійності електромеханічного обладнання електричних станцій" (шифр "АГРЕГАТ"), що виконувалася за Постановою Бюро ВФТПЕ від 07.07.2015 р., протокол № 11. Державний реєстраційний номер роботи 0115U004399; "Розроблення моделей та алгоритмів керування системою розподіленої генерації з вітроелектричними установками на основі асинхронних генераторів при паралельній роботі з мережею" (шифр "ОБ'ЄДНАННЯ – 3"), що виконувалася за розпорядженням Президії НАН України від 01.02.2018 р., протокол № 69. Державний реєстраційний номер роботи 0116U006586; "Розроблення багатифункціонального автономного електроагрегата" («БЕНЗОГЕН»), що виконувалася за розпорядженням Кабінету міністрів України від 26.07.2018 р., протокол №543-р. Державний реєстраційний номер роботи 0117U007337.

1. Гребеніков В.В., Приймак М.В. Вплив конфігурації магнітної системи на характеристики електричної машини з постійними магнітами. V Міжн. науково-техн. конф. *Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування*. Київ, 14-18 листопада 2016 р. С. 109–111.
2. Гребеніков В.В. Сравнительный анализ электродвигателей с различной конфигурацией магнитных систем. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Вип. 1 (1223). Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. 2017. С. 119–124.
3. Гребеніков В.В., Приймак М.В. Электрогенератор на постоянных магнитах с цилиндрическим магнитным редуктором для ветроустановки. *Гідроенергетика України*. 2017. № 3–4. С. 70–74.
4. Dobzhanskyi O., Eklas Hossain, Ebrahim Amiri, Gouws R., Grebenikov V., Mazurenko L., Pryjmak M., Gamaliia R. Axial-Flux PM Disk Generator With Magnetic Gear for Oceanic Wave Energy Harvesting. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 44813–44822. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908348>.
5. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Білик О.А., Шихненко М.О. Моделювання режимів та регулювання частоти обертання вентильно-індукторного двигуна з перетворювачем із С-скиданням і коливальним поверненням енергії при зміні кутів комутації. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. Харків, Україна. 2016. № 11 (1183). С. 64–69.
6. Бібік О.В. Вентильно-індукторний привод насосної установки багатоповерхового будинку. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. № 45. С. 3–45.
7. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Шихненко М.О. Оцінка можливості використання вентильно-реактивного двигуна у складі верстат-гойдалки. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. Харків, Україна. 2017. № 1 (1223). С. 97–100.
8. Бібік О.В., Гребеніков В.В. Аналіз впливу магнітних систем на характеристики вентильно-реактивних та синхронно-реактивних двигунів. *Гідроенергетика України*. 2016. № 3. С. 47–50.
9. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Білик О.А., Шихненко М.О., Клименко В.Г. Спосіб стабілізації частоти обертання вентильно-індукторного двигуна. Пат. на корисну модель № 107247 Україна, МПК Н02Р 6/08, Н02Р 8/12, Н02К 19/06.
10. Мазуренко Л.І., Джура О.В. Математична модель автономного електрогенеруючого комплексу з асинхронними генераторами та єдиним напівпровідниковим перетворювачем збудження. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. № 44. С. 69–78.
11. Мазуренко Л.І., Василів К.М. Закономірності електромагнітних процесів безконтактної системи збудження автономного асинхронного генератора на базі каскадного трифазно-трифазного модулятора напруги. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 6. С. 46–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.046>
12. Мазуренко Л.І., Джура О.В. Математична модель та алгоритм керування автономної нерегульованої вітроустановки з асинхронним вентильним генератором. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2018. Вип. 3(43). С. 24–30.
13. Джура О.В., Муравинець Н.В. Асинхронний генератор з вентильним збудженням з приводом від турбодетандера. Наук.-техн. конф. *Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування*. Київ, Україна. 10–14 травня 2016 р.

14. Мазуренко Л.І., Джура О.В. Математичне моделювання трифазних трансформаторів на основі еквівалентної схеми заміщення однофазного трансформатора. XVIII міжн. науково-практ. конф. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті*. Київ, Україна, 27–29 вересня 2017 р. С. 156–160.
15. Popovych O.M., Golovan I.V. Study of changed main flux reactance of squirrel-cage induction motors using field analysis of their starting characteristics. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 5. С. 69–72. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2018.05.069>
16. Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Shevchuk S.P. Transients in a transistor-switched capacitor regulator of a stand-alone induction generator supplying a single-phase load. International Conference on *Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. 2017. Pp. 244–247.

УДК 621.313

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИИ И ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**Л.И. Мазуренко**, докт. техн. наук, **В.В. Гребеников**, докт. техн. наук, **А.В. Джура**, канд. техн. наук, **Е.В. Бибик**, канд. техн. наук, **Р.В. Гамалея**, канд. физ.-мат. наук, **М.О. Шихненко**

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

*Представлены основные научные и практические результаты, которые получены при выполнении научно-исследовательских работ. Проведен сравнительный анализ модификации магнитной системы электрогенератора с постоянными магнитами. По результатам математического моделирования сформирована механическая характеристика вентильно-индукторного двигателя тягового электропривода по максимальному значению КПД. Обоснованы возможности стабилизации частоты вращения опытного образца ВИД и разработаны рекомендации для выбора момента инерции привода одноцилиндровых компрессоров на его основе для обеспечения регламентированного уровня пульсаций частоты вращения ротора для диапазона регулирования 1:4. Разработаны модели и алгоритмы управления системой распределенной генерации с ветроэлектрическими установками на основе асинхронных генераторов при параллельной работе с сетью, исследовано влияние установок распределенной генерации на потери в тупиковой ветке сети. Предложено техническое решение, проведены расчеты, разработана рабочая конструкторская документация, изготовлен экспериментальный образец многофункционального автономного электроагрегата однофазного тока повышенного качества электроэнергии. Библ. 16, рис. 10, таблица.*

**Ключевые слова:** электрогенератор с постоянными магнитами, вентильно-индукторный двигатель, имитационная модель, асинхронный генератор, электрогенерирующий агрегат, пуско-зарядное устройство, система распределенной генерации, ветроэлектрическая установка.

## ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTERS FOR ELECTROGENERATION AND ELECTRIC DRIVE SYSTEMS

**L.I. Mazurenko, V.V. Grebenikov, O.V. Dzhura, O.B. Bibik, R.V. Gamaliia, M.O. Shykhnenko**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

*The main scientific and practical results that are obtained when performing research and development robots are presented. A comparative analysis of the modification of the magnetic system of an electric generator with permanent magnets is carried out. According to the results of mathematical modeling a mechanical characteristic of the switched reluctance motor of the traction drive has been formed with the maximum value of the efficiency. The possibility of stabilization of the rotational speed of the experimental model SRM is substantiated. Recommendations for choosing the moment of inertia of the electric drive of single cylinder compressors on its basis with the provision of a regulated level of pulsations of the rotational speed of the rotor for the regulation range of 1: 4 have been developed. The models and algorithms for controlling the distributed generation system with wind power plants on the basis of asynchronous generators during parallel operation with the network were developed, the influence of distributed generation units on losses in the deadlock of the network was investigated. A technical solution was proposed, calculations were made, working design documentation was created, a prototype of a multifunctional autonomous electro-aggregate of single-phase current of high quality of electric power was manufactured. References 16, figures 10, table.*

**Key words:** permanent magnet generator, switched reluctance motor, simulation model, induction motor, electro-aggregate, startup charger, distributed generation, wind power plants.

1. Grebenikov V.V., Priyamak M.V. Influence of the configuration of the magnetic system on the characteristics of an electric machine with permanent magnet. Materials of the V International Scientific and Technical Conference. *Problems of modern power engineering and automation in the system of nature use*. Kyiv, November 14–18. 2016. Pp. 109–111. (Ukr)

2. Grebenikov V.V. Comparative analysis of electric motors with different configurations of magnetic system. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KHPI»*. Vyp. 1 (1223). Seriya: Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorenniya enerhiyi. 2017. Pp. 119–124. (Rus)
3. Grebenikov V.V., Pryimak M.V. Electric generator with permanent magnets with a cylindrical magnetic gearbox for a wind turbine. *Hidroenerhetyka Ukrainy*. 2017. No 3–4. Pp. 70–74. (Rus)
4. Dobzhanskyi O., Hossain Eklas, Amiri Ebrahim, Gouws R., Grebenikov V., Mazurenko L., Pryjmak M., Gamaliia R. Axial-Flux PM Disk Generator With Magnetic Gear for Oceanic Wave Energy Harvesting. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 44813–44822. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908348>.
5. Mazurenko L.I., Bibik O.A., Shykhnenko M.O. Simulation mode and speed control of switched reluctance motor using a converter with the C-dump and the oscillation return of energy at changing switching angles. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KHPI»*. Seriya: Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorenniya enerhiyi. 2016. No 11 (1183). Pp. 64–69. (Ukr)
6. Bibik O.V. Switched-reluctance drive of pump installation of the multi-storey building. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2016. No 45. Pp. 38–45. (Ukr)
7. Mazurenko L.I., Bibik O.V., Shykhnenko M.O. Estimation of the possibility of using a switched reluctance motor as part of a machine-swinging device. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KHPI»*. Seriya: Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorenniya enerhiyi. 2017. No 1 (1223). Pp. 97–100. (Ukr)
8. Bibik O.V., Grebenikov V.V. Analysis of the influence of magnetic systems on the characteristics of switched reluctance and synchronous reluctance motors. *Hidroenerhetyka Ukrainy*. 2016. No 3. Pp. 47–50. (Ukr)
9. Mazurenko L.I., Bibik O.V., Bilyk O.A., Shykhnenko M.O., Klymenko V.G. Method of stabilization of the speed of switched reluctance motor. Pat. to utility model No. 107247 Ukraine, H02P 6/08, H02P 8/12, H02K 19/06. (Ukr)
10. Mazurenko L.I., Dzhura O.V. A mathematical model of an autonomous electrogenerating system with induction generators and a single semiconductor excitation converter. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2016. No 44. Pp. 69–78. (Ukr)
11. Mazurenko L.I., Vasylyv K.M. Patterns of Electromagnetic Processes of the Contactless Excitation System of the Autonomous Asynchronous Generator on the Basis of the Cascade Three-Phase-Three-phase Voltage Modulator. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 46–49. (Ukr)
12. Mazurenko L.I., Dzhura O.V. Mathematical model and control algorithm for autonomous unregulated wind turbine with inverter excited induction generator. *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy*. Kremenchuk, Ukraine. 2018. No 3(43). Pp. 24–30. (Ukr)
13. Dzhura O.V., Muravinets N.V. Inverter excited induction generator driven by a turbo-detander. *Problems of modern energy and automatics in the environmental system*. Proceedings of Conf. Kyiv, 10–14 May 2016. Pp. 35–37. (Ukr)
14. Mazurenko L.I., Dzhura O.V. Mathematical modeling of three-phase transformers based on the equivalent circuit for replacing a single-phase transformer. XVIII International Scientific and Practical Conference *Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century*. Kyiv, Ukraine, 27-29 September 2017. Pp. 156–160.
15. Popovych O.M., Golovan I.V. Study of changed main flux reactance of squirrel-cage induction motors using field analysis of their starting characteristics. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 5. Pp. 69–72.
16. Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Shevchuk S.P. Transients in a transistor-switched capacitor regulator of a stand-alone induction generator supplying a single-phase load. *International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. 2017. Pp. 244–247.

Надійшла 12.06.2019  
Received 12.06.2019