

УДК 620.92

ОБГРУНТУВАННЯ ТИПІВ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРІВ ДЛЯ БЕЗРЕДУКТОРНИХ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК

М.І. Трегуб, канд. техн. наук
Білоцерківський НАУ

В статті обгрунтовані принципи вибору типу і конструктивної схеми безредукторного електрогенератора з постійними магнітами для сільсько-господарських вітроустановок.

Ключові слова: безредукторний електрогенератор, магніти, вітроустановка.

Проблема. Сучасна стратегія сталого енергозабезпечення сільських територій передбачає збільшення масштабів отримання енергії з вітру, що потребує суттєвого вдосконалення автономних вітроелектричних установок (АВЕУ) для підвищення ефективності використання середніх і низькошвидкісних вітрів. Особливу актуальність це питання набуває в нинішній період швидкого розвитку електромобільних засобів з акумуляторним живленням і необхідністю використання вітроелектричних пунктів заряджання батарей на значній відстані від електромереж.

На сучасних великомасштабних вітроелектричних установках (ВЕУ) застосовують багатоступінчасту мультиплікацію частоти обертів вала вітродвигуна при передачі на вал генератора, що викликає неприйнятні для АВЕУ тертьові та інерційні втрати отриманої з вітру механічної енергії. Тому для АВЕУ малої потужності застосовують безредукторні конструкції вітроелектрогенераторів [2]. Найбільш раціональними вважаються [2] системи електрогенераторів з постійними магнітами, які не потребують затрат енергії на створення магнітного поля збудження. Однак скрізь застосовуються традиційні конструктивні схеми встановлення ротора електрогенератора безпосередньо на валу вітродвигуна і циліндричного статора у спільному корпусі навколо нього. При цьому намагання використовувати максимально допустимі діаметральні габарити електрогенератора, для

© М.І. Трегуб.

Механізація та електрифікація сільського господарства. Вип. 96. 2012.

збільшення колової швидкості активних елементів ротора, призводять до перекривання частини вітрового потоку на лопаті вітропродвигуна з горизонтальною віссю. Тому були запропоновані технологічні схеми безредукторних ВЕУ [3] з кільцеподібним вітропропускним ротором і дуговим статором, в яких поєднані аеромеханічні та електротехнічні функції в одній конструкції. Проте досі залишається недостатньо обґрунтованим питання вибору типу електрогенератора з мінімальною масою і габаритами активних матеріалів такого ротора.

Мета дослідження – обґрунтувати методи вибору типу і принципової схеми безредукторного вітроелектричного генератора (БВЕГ) з мінімальними масогабаритними показниками.

Методи досліджень. З джерел науково-технічної інформації методом порівнянь і теоретичних розрахунків визначені типи електрогенераторів і їх конструктивні особливості, а вибір варіанта з мінімальними масогабаритними показниками виконаний аналітичним методом. Оцінку функціональних можливостей виконано методом параметричного і фізичного моделювання.

Результати досліджень. Серед електрогенераторів з постійними магнітами за висновками [4] доцільно розглянути індукторний та магнітоелектричний типи. В індукторних електрогенераторах (ІГ) дискретними елементами електрично активного матеріалу ротора [5] є зубці з електротехнічної сталі. Кількість зубців ротора ІГ еквівалентна парі полюсів звичайної синхронної машини. Величина ЕРС, як відомо, пропорційна частоті зміни магнітного потоку, зчепленого з обмоткою якоря, тому за певних розмірів у тихохідних генераторах виконують максимально можливу кількість полюсів. Однак зменшення міжполюсних відстаней при циліндричній конфігурації статора вступає у взаємну суперечливість з необхідністю зменшення потоків розсіювання, мінімізацією довжини магнітопроводу та можливістю розміщення обмотки з відповідним перетином і кількістю активних провідників. Навіть, якщо брати до уваги лише допустимість величини магнітних потків розсіювання, то мінімальну міжполюсну відстань на практиці обмежують [2] п'ятнадцятиразовим розміром повітряного зазору між ротором і статором. В такому випадку при циліндричній конфігурації ІГ мінімальні розміри феромагнітного зубця ротора визначатимуться міжполюсною відстанню та площею перетину магнітопроводу полюса статора. Якщо вважати допустимим певне значення магнітної індукції в електротехнічній сталі полюсного осердя B_d , (Тл), то площа його перетину визначатиметься за розрахунковим значенням загального маг-

нітного потоку Φ_p і кількістю полюсних осердь статора, яких удвічі більше, ніж зубців ротора z_p . Тоді орієнтовне значення площі перетину полюсного осердя статора буде:

$$S_p = \Phi_p / B_d 2z_p, \text{ м}^2, \quad (1)$$

де Φ_p – розрахунковий магнітний потік генератора, Вб, B_d – допустима магнітна індукція в полюсному осерді, Тл, z_p – кількість феромагнітних зубців ротора.

Об'єм одного феромагнітного зубця ротора визначатиметься добутком орієнтовної площі перетину одного полюсного осердя статора на довжину дуги зовнішнього діаметра ротора між серединами полюсів. При рівномірних проміжках між однаковими за розмірами зубцями ротора їх довжина по дузі (L_z) буде:

$$L_z = \pi (D_p - \sqrt{S_p}) / 2 z_p, \text{ м}, \quad (2)$$

де D_p – діаметр зовнішньої поверхні ротора; $\sqrt{S_p}$ – розмір зубця ротора по висоті за умови квадратної його форми.

Тоді з врахуванням виразів (1) і (2) об'єм зубця ротора буде:

$$V_z = L_z S_p = \pi B_d (D_p - \sqrt{S_p}) / \Phi_p, \text{ м}^3 \quad (3)$$

Маса одного зубця ротора визначатиметься густиною електротехнічної сталі, яку приймають [6] $7,8 \cdot 10^3$ кг/м³, та коефіцієнтом заповнення об'єму в листовому пакеті.

Узагальнюючи наведену методику розрахунку масогабаритних показників феромагнітних зубців кільцеподібного ротора БВЕГ індукторного типу з циліндричною конфігурацією дугоподібного статора [5], можна зробити висновок, що розміри і відповідна маса їх визначаються головним чином конструктивними умовами розміщення якірних обмоток, або постійних магнітів між полюсними осердями статора. При цьому конструктивні можливості збільшення довжини магнітопроводу статора будуть супроводжуватися погіршенням енергетичних показників, а збільшення міжполюсної відстані викликатиме зменшення ЕРС і зростання розмірів феромагнітних зубців ротора ІГ. Це підтверджує необхідність виконання розрахунків оптимального варіанта масогабаритних показників магнітопроводів ротора і статора.

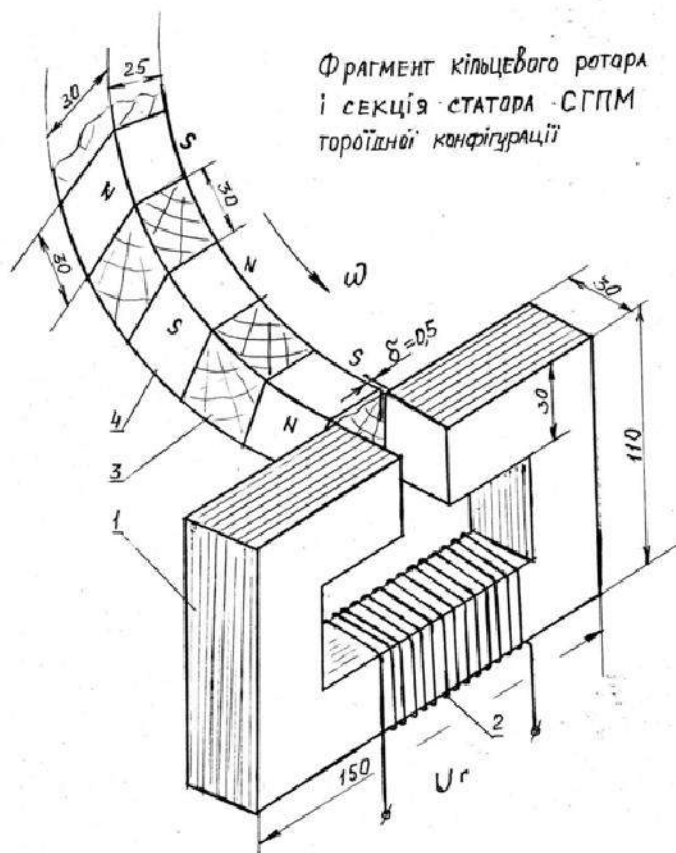
Принциповою відмінністю методики мінімізації масогабаритних показників активних матеріалів ротора БВЕГ з кільцеподібним ротором навіть у порівнянні з авіаційними електричними машинами [6] є специфічне завдання зменшення розмірів і маси функціональних деталей саме ротора генератора, але не загальних габаритних показників

ротора і статора. При вирішенні такого завдання оцінювалися принципові можливості СГПМ та ІГ радіального і аксіального типу відповідно до напрямку магнітного потоку в повітряному зазорі. На основі загальновідомих принципів оцінки різних типів електрогенераторів автономних установок (7) та аналізу магнітних систем якісно порівнювалися показники генераторів двох типів за різної конфігурації магнітопроводів, що відображено в порівняльній таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняння принципових переваг і недоліків ІГ та СГПМ з сегментним статором за радіальної і аксіальної конфігурації

№ з/п	Тип генератора	Радіальна конфігурація		Аксіальна конфігурація	
		Переваги	Недоліки	Переваги	Недоліки
1	Синхронний генератор з постійними магнітами	Можливість регулювання зазору	Несиметрія магнітів, потреба полюсних башмаків, крайові ефекти сегментного статора, менша кількість полюсів	Не треба полюсних башмаків, відсутність крайових ефектів, резерв габаритів статора, максимум полюсів	Важко забезпечити мінімальний аксіальний зазор
2	Індукторний генератор	Можливість регулювання зазору	Крайові ефекти сегментного статора, менша кількість полюсів	Відсутність крайових ефектів, резерв габаритів статора, максимум полюсів	Важко забезпечити мінімальний аксіальний зазор

З порівняльної таблиці 1 видно, що найбільш суттєвими принциповими перевагами генераторів з аксіальною конфігурацією є резерв габаритів статора при максимальній кількості полюсів, а для синхронних генераторів з постійними магнітами на роторі (СГПМР) можливість встановлення їх без полюсних башмаків. Для СГПМР важливо проаналізувати технічні можливості при використанні нових високоерцетивних магнітів. Ескізне зображення розміщення постійних магнітів на периферійній частині кільцеподібного ротора в аксіальному зазорі міжполюсного простору тороїдоподібного статора зображено на рис. 1.



- 1 - магнітопровід секції статора,
 2 - обмотка ($w = 600$, $d = 2$ мм),
 3 - корпус кільцевого ротора (неметалевий),
 4 - постійні магніти ротора,
 $\omega = 2\pi \cdot n$, $n_{\min} = 20 \text{ хв}^{-1} (0,3 \text{ с}^{-1})$; $n_{\max} = 6 \text{ с}^{-1}$.

Рис. 1. Взаємне розміщення електромагнітно-активних частин ротора з магнітами і тороїдоподібного магнітопроводу однієї секції статора з обмоткою

Тороїдоподібна конструкція секції магнітопроводу статора дозволяє розмістити на ньому габаритну обмотку при ширині полюсної

площини призматичних магнітів 0,03 м. Принцип дії такого магнітоелектричного генератора полягає в зміні магнітного потоку в магнітопроводі, на якому намотана обмотка, у якій індукується електрорушійна сила, а при підключенні навантаження тече струм. Окремі секції сегментного статора взаємно зміщені на частину міжполюсної відстані для зрівноваження силової взаємодії магнітного поля дискретних магнітів ротора з магнітопроводом статора.

Аналіз магнітного кола секції виконували за спрощеною розрахунковою схемою (рис.2).

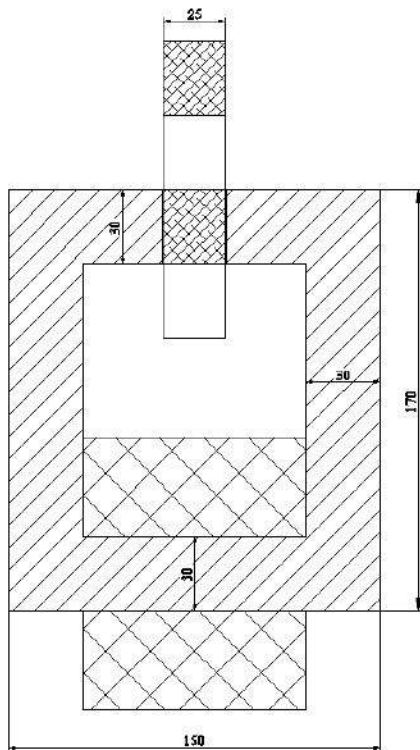


Рис. 2. Схема та розміри розрахункової моделі секції СГПМР

Розподіл індукції магнітного поля в магнітному колі моделі виконувався з використанням загальновідомого ліцензованого програмного продукту, де вихідними даними були геометричні розміри, магнітна проникність електротехнічної сталі, марка магніту. Загальна картина розподілу магнітної індукції в модельованій схемі показана на рис.3.

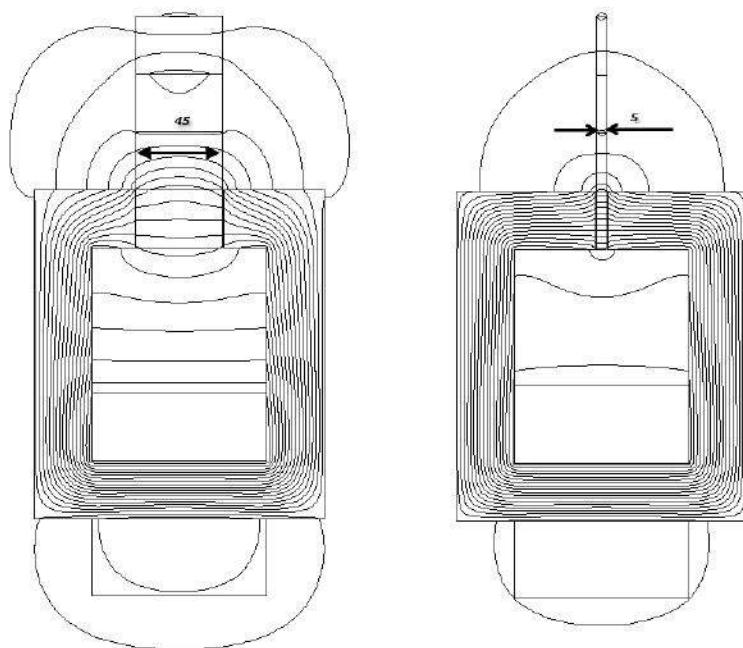


Рис. 3. Картина магнітного поля в магнітопроводі за двох різних товщин магнітів ротора ($b_{\text{маг}1} = 45$ мм) і ($b_{\text{маг}2} = 5$ мм).

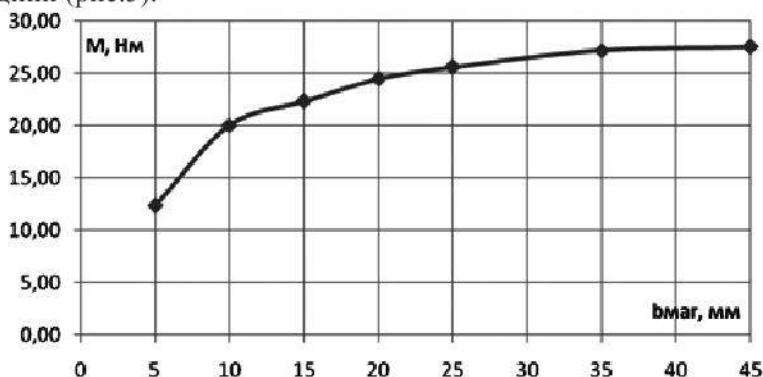
При моделюванні магнітної системи генератора задавались густиною струму в обмотці, рівною $J = 2.5$ А/мм², що з врахуванням коефіцієнта заповнення обмотки, $K_z = 0.5$, виконаної емальованими мідними провідниками, відповідає реальній густині струму $J_{\text{ре}} = 5$ А/мм². Слід відзначити, що у всіх варіантах розрахунку насичення магнітного кола не відбувалось, а максимальна індукція навіть за мінімальної товщини магнітів $b_{\text{маг}} = 5$ мм не перевищувала $B_{\text{макс}} = 1.9$ Тл.

Розрахунки моделі генератора при змінній товщині магнітів ротора в діапазоні $b_{\text{маг}} = 5 \dots 45$ мм виконувались для магнітів на основі феритів ($H_c = 240$ кА/м) та для магнітів на основі неодиму-заліза-бору (Nd-Fe-B) ($H_c = 930$ кА/м). Результати розрахунків сили, взаємодії (F), Н, магнітного моменту (M), Нм, потужності (P), Вт для однієї секції статора, за мінімальної частоти обертів вітрогенератора (20 хв⁻¹), наведені в табл.2.

Таблиця 2. Результати розрахунків моделі СГПМР

Товщина магніту, м	Феритові магніти			Магніти на основі Nd-Fe-B		
	Сила, Н	Момент, Нм	Потужність, Вт,	Сила, Н	Момент, Нм	Потужність, Вт,
0,005	35,2	12,3	24,7	139,6	48,8	279,1
0,01	57,3	20,1	40,2	243,6	85,3	487,3
0,015	63,9	22,4	44,7	299,9	105,0	599,8
0,02	69,9	24,5	48,9	365,7	128,0	731,5
0,025	73,2	25,6	51,2	419,9	147,0	839,7
0,035	77,7	27,2	54,4	506,2	177,2	1012,3
0,045	78,7	27,5	55,2	563,9	197,4	1127,8

Аналіз результатів розрахунків показує, що магніти на основі Nd-Fe-B мають суттєву перевагу в розрахунковій потужності однієї секції статора. Однак збільшити потужність можна за рахунок збільшення кількості секцій статора. При цьому важливо знайти оптимальні масогабаритні показники роторних магнітів різних типів. Для цього зручно скористатися графічною залежністю магнітного моменту кільцеподібного ротора діаметром близько 0,7 м з феритовими магнітами різної товщини (рис.3).

**Рис. 3.** Залежність максимального моменту від товщини феритових магнітів ротора

З графіка видно, що залежність має характер насичення, дещо подібний до кривої намагнічування сталі. Зростання моменту суттєво уповільнюється при збільшенні товщини феритового магніту понад

20 мм, що і можна вважати орієнтовним оптимальним значенням. Така товщина, крім того, дозволяє забезпечити механічну жорсткість конструкції периферійної частини кільцеподібного ротора.

Аналогічна залежність максимального моменту ротора від товщини магнітів на основі Nd-Fe-B графічно зображена на рис.4.

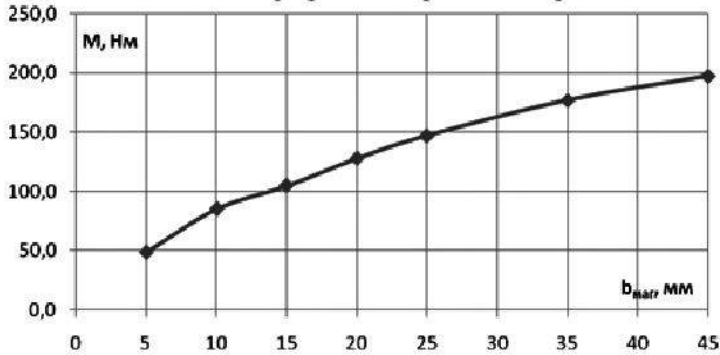


Рис. 4. Залежність максимального моменту ротора від товщини магнітів (Nd-Fe-B)

Аналіз графіка показує, що найбільший приріст моменту відбувається при збільшенні товщини до близько 10 мм і досягає при цьому досить високого абсолютного значення. З врахуванням високої ціни магнітів на основі Nd-Fe-B та їх більшої густини можна визначити оптимальним значенням їх товщину близько 10 мм. При цьому потужність однієї секції статора навіть на мінімальних обертах (20 хв^{-1}) досягатиме 487,3 Вт, що визначатиме габарити вітродвигуна.

Таблиця 3. Розрахункова загальна маса роторних магнітів різної товщини

Товщина магнітів ротора, м	Загальна маса магнітів кільцеподібного ротора, кг	
	Феритові магніти	Магніти на основі Nd-Fe-B
0,005	0,57	0,88
0,01	1,15	1,76
0,015	1,72	2,63
0,020	2,29	3,51
0,025	2,87	4,39
0,035	4,01	6,14
0,045	5,16	7,90

Загальна маса магнітів ротора різної товщини визначена за однакової площі їхнього перетину та з врахуванням густини (феритів – 4900 кг/м^3 , Nd-Fe-B – 7500 кг/м^3), наведена в табл.3.

З розрахованих показників загальної маси (табл.3) видно, оптимальна маса феритових магнітів ротора при товщині 0,02 м буде 2,29 кг, а магнітів на основі Nd-Fe-B при оптимальній товщині 0,01 м становитиме 1,76 кг.

Висновки

1. Масогабаритні показники феромагнітних зубців кільцеподібного ротора генератора індукторного типу з радіальним напрямом магнітного потоку в зазорі визначаються головним чином просторовими обмеженнями розміщення обмоток, або постійних магнітів між полюсними осердями статора.

2. Мінімальні втрати електромеханічного перетворення вітрової енергії досягаються за допомогою безредукторних аксіальних синхронних та індукторних електрогенераторів з постійними магнітами.

3. Оптимальними масогабаритними показниками аксіально встановлених феритових магнітів є товщина 0,02 м, а магнітів на основі Nd-Fe-B – 0,01 м. При цьому загальна маса магнітів кільцеподібного ротора діаметром 0,7 м становитиме відповідно 2,29 і 1,76 кг.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. *Фатеев Е.М.* Ветродвиатели и ветроустановки/ Е.М. Фатеев. – М. : Сельхозиздат. 1957, – 536 с.
2. *Неисчерпаемая* энергия. Кн.1. Ветроэлектрогенераторы/ В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Учебник. – Харьков. Нац. аэрокосм. ун-т. «Харьк. авиац. ин-т.», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т., 2003. – 400 с.
3. *Безредукторна* вітроенергетична установка. Пат. кор. мод. UA, №32851, F 03D 1/00, Трегуб М.І., заявл.19.03. 2007, опубл.10.06.2008. Бюл. №11.
4. *Трегуб М.І.* Підвищення показників пуску та електромеханічного перетворення вітроустановок для низькошвидкісних вітрів.// Механізація та електрифікація сільського господарства. Міжвід. темат. наук. зб. ННЦ «ІМЕСГ» – 2011. – Вип.95. – С.142- 148.
5. *Індукторний* дуговий електрогенератор. Патент на винахід.№95048, UA, H02K 21/38, H02K 21/48, H02P 9/10 (2006.01), Трегуб М.І., Козирський В.В., заяв. 11.10. 2010, опубл.25. 06.2011. Бюл.№12.

6. Бертинов А.И. Авиационные электрические генераторы / А.И. Бертинов. – М.:Оборонгиз, 1959. - 187с.
7. Паластин Л.М. Электрические машины автономных источников питания / Л.М. Паластин. – М.: Энергия, 1972 – 211 с.
-

ОБОСНОВАНИЕ ТИПОВ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ БЕЗРЕДУКТОРНЫХ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В статье обоснованы принципы выбора типа и схемы конструкции безредукторного электрогенератора с постоянными магнитами для сельскохозяйственных ветроустановок.

Ключевые слова: безредукторный электрогенератор, магниты, ветроустановка.

DESCRIPTION OF ELECTRIC GENERATOR TYPES FOR DIRECT- DRIVE WIND-POWER TURBINES

This article explains the principles for the choice of a type and a scheme of construction of direct-drive electric generator with permanent magnets for agricultural wind turbines.

Key words: direct-drive electric generator ,magnets, wind turbines.

УДК 621.3.013.8:662.7

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ВИСОКОЇ НАПРУЖЕНОСТІ ДЛЯ АКТИВАЦІЇ МОЛЕКУЛ- РЕАГЕНТІВ РЕАКЦІЇ ГОРІННЯ

Б.М.Ковалишин, канд. техн. наук
НУБіП України

На основі аналізу обґрунтовано спосіб підвищення енергоефективності паливних установок на вуглеводневому паливі, оснований на активації молекул-реагентів реакції горіння в електричному полі високої напруженості. Проаналізовано результати експериментів з активації молекул-реагентів реакції горіння при дії на них високовольтним пульсуючим нерівномірним електричним полем. Проведена оцінка ефективності електроактивації повітря, пропану і природного газу.

Ключові слова: енергоефективність, горіння, окислювально-відновна реакція, активація, паливо, окислювач, відновник.

© Б.М.Ковалишин.

Механізація та електрифікація сільського господарства. Вип. 96. 2012.