**СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ТОРОІДАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА
З ГІБРИДНОЮ СИСТЕМОЮ ЗБУДЖЕННЯ****В. Ф. Шинкаренко, Є. А. Монахов, В. В. Чумак, В. С. Фетісов**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна.

E-mail: svf1102@gmail.com, emonachov@gmail.com, chumack_kpi@ukr.net, f.vladimir@ukr.net

Робота присвячена задачі синтезу синхронного генератора з гібридним збудженням на основі інформації родових макрогенетичних програм, що забезпечує можливість регулювання основного магнітного потоку в повітряному проміжку за рахунок об'єднання магнітоелектричної та електромагнітної систем збудження. Представлена уточнена багаторівнева генетична модель структуроутворення складних електромеханічних об'єктів гібридних і сумішених видів, що забезпечує можливість синтезу та вибору структур з підвищеним рівнем структурної деталізації активних частин статора і ротора, з врахуванням типу збудження магнітного поля і кількості фаз. Синтез моделі було здійснено з використанням операторів генетичного синтезу (реплікації, внутрішньовидового схрещування, просторової та електромагнітної інверсії, кросингверу й мутації). Структура моделі визначається трьома рівнями структурної складності, які представлені породжувальною батьківською хромосомою (рівень 1), послідовністю генетично модифікованих електромагнітних хромосом, які визначають геном Виду *ТП 0.2у* (рівень 2) та популяційним рівнем можливих технічних реалізацій, які допускаються генетичною інформацією суміщеної хромосоми (рівень 3). В роботі приведено результати розшифрування генетичної програми структуроутворення гібридної структури з магнітоелектричним збудженням, а також за методикою експертних оцінок були визначені вагові коефіцієнти відповідності синтезованих структур частковим вимогам інтегральної функції пошуку. В результаті здійсненого спрямованого синтезу структури синхронного генератора з гібридною системою збудження магнітного потоку розроблено конкурентоспроможне технічне рішення. Подальший аналіз структури синхронного генератора з гібридною системою збудження на прикладі синхронного генератора потужністю 3 кВт проведено зі застосуванням сучасних методів моделювання на основі методу скінчених елементів. За результатами моделювання визначено максимальну глибину регулювання генератора та надано рекомендації щодо його застосування та розрахунку.

Ключові слова: електромеханічний об'єкт, синхронний генератор, гібридне збудження.**СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ ТОРОИДАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА
С ГИБРИДНОЙ СИСТЕМОЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ****В. Ф. Шинкаренко, Е. А. Монахов, В. В. Чумак, В. С. Фетисов**

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина.

E-mail: svf1102@gmail.com, emonachov@gmail.com, chumack_kpi@ukr.net, f.vladimir@ukr.net

Работа посвящена задаче синтеза синхронного генератора с гибридным возбуждением на основе информации родовых макрогенетических программ, который обеспечивает возможность регулирования основного магнитного потока в воздушном зазоре за счет объединения магнитоэлектрической и электромагнитной систем возбуждения. Представлена уточнённая многоуровневая генетическая модель структурообразования сложных электромеханических объектов гибридных и совмещенных видов, которая обеспечивает возможность синтеза и выбора структур с повышенным уровнем структурной детализации активных частей статора и ротора, с учетом типа возбуждения магнитного поля и количества фаз. Синтез модели был осуществлен с использованием операторов генетического синтеза (репликации, внутривидового совмещения, пространственной и электромагнитной инверсии и мутации). Структура модели определяется тремя уровнями структурной сложности, которые представлены порождающей отцовской хромосомой (уровень 1), последовательностью генетически модифицированных электромагнитных хромосом, которые определяют геном Виду *ТП 0.2у* (уровень 2) и популяционным уровнем возможных технических реализаций, которые допускаются генетической информацией совмещенной хромосомы (уровень 3). В работе приведены результаты расшифровки генетической программы структурообразования гибридной структуры с магнитоэлектрическим возбуждением и по методике экспертных оценок были определены весовые коэффициенты соответствия синтезированных структур частичным требованиям интегральной функции поиска. В результате осуществленного направленного синтеза структуры синхронного генератора с гибридной системой возбуждения магнитного потока было разработано техническое решение. Дальнейший анализ структуры синхронного генератора с гибридной системой возбуждения на примере синхронного генератора мощностью 3 кВт был проведен с использованием современных методов моделирования на основе метода конечных элементов. По результатам моделирования определена максимальная глубина регулирования генератора.

Ключевые слова: электромеханический объект, синхронный генератор, гибридное возбуждение.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Машини з постійними магнітами отримали широке розповсюдження через їх високі питомі енергетичні та масогабаритні показники, надійність роботи [1–3]. У випадках зміни навантаження чи частоти обертання генератора необхідною умовою є підтримка встановленого (чи номінального) значення напруги, для чого найчастіше застосовують напівпровідникові перетворювачі. Однак суттєвими недоліками їх застосування є висока вартість, низька перевантажувальна здатність та надійність, складність системи керування та чутливість пристрою до характеру навантаження. У випадку необхідності стабілізації вихідної напруги при відносно невеликій зміні навантаження та частоти обертання пропонується застосувати машини з гібридним збудженням, які мають магнітоелектричну систему у вигляді постійних магнітів та додаткову електромагнітну систему збудження, що дозволяє регулювати сумарний робочий магнітний потік [4].

Аналіз літературних джерел показав, що застосування гібридного збудження дозволяє збільшити коефіцієнт корисної дії в порівнянні з машинами з електромагнітним збудженням до 10 % за рахунок зменшення втрат на збудження та зменшення загального об'єму машини. При цьому машина має безконтактну систему збудження.

Прикладами областей застосування синхронних машин з гібридним збудженням є малі гідроелектростанції, де швидкість течії ріки змінюється в малому діапазоні, збуджувачі синхронних генераторів малої та середньої потужності та допоміжні силові установки, в яких забезпечується постійна напруга в залежності від частоти обертання та навантаження.

Наявність макrogenетичної програми структуроутворення суттєво спрощує пошук варіантів ЕМ-структур за заданою функцією синтезу. Мета роботи – задача синтезу структури генератора з магнітоелектричним збудженням (МЕЗ), призначеного для функціонування у складі малопотужної вітроелектростанції, з можливістю керування його вихідною напругою. Пошук і синтез структури генератора здійснюється на основі аналізу родової генетичної програми тороїдальних плоских (ТП) електричних машин і зводиться до визначення структури, що задовольняє заданій функції синтезу.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Інтегральна функція синтезу F_S визначається сукупністю часткових вимог і обмежень, які визначають і локалізують область пошуку в багатовимірному просторі R^n генетично допустимих рішень. Основними вимогами для керованого типу генератора є наступні:

- 1) тороїдальна плоска геометрія активної поверхні статора $(ТП)_1$;
- 2) наявність розподіленої m -фазної обмотки поверхневого типу на статорі $(W_m)_1$;
- 3) забезпечення мінімальних втрат енергії на збудження $(P_E \rightarrow \min)$;
- 4) забезпечення керування основним потоком збудження $(\Phi_0 = \text{var})$;

5) необхідність механічного суміщення ротора генератора з вітротурбіною $(ТП)_2 \times \text{BT}$;

6) забезпечення осової симетрії рухомих мас генератора та вітротурбіни (S_{OX}) .

Пошук здійснюється в предметній області макrogenетичної програми структуроутворення Роду тороїдальних плоских електричних машин [5]. Не розглядаються комбіновані варіанти структур з кільцевими розподіленими обмотками і дво- та тристоронньою активною поверхнею.

З врахуванням зазначених вимог, інтегральна функція пошуку набуває вигляду:

$$F_S = [(ТП)_1; (W_m)_1; (P_E \rightarrow \min); (\Phi_0 = \text{var}); (ТП)_2 \times \text{BT}; (S_{OX})] \subset R^n. \quad (1)$$

Вимогам 1 і 2 в структурі родової програми задовольняють лише структурні представники базового Виду $ТП\ 0.2y$, який для даної задачі набуває статусу домінуючого. Це означає, що синтез структури генератора необхідно здійснювати в межах внутрішньовидового пошукового простору з використанням генетичного моделювання. Вимогам мінімізації втрат електричної енергії на збудження (вимога 3) і забезпечення керування основним магнітним потоком (вимога 4), задовольняє варіант гібридної системи збудження, який структурно реалізується суміщенням магнітоелектричного збудження активної поверхні ротора і керованого електромагнітного збудження з використанням додаткових зосереджених обмоток, що живляться від стороннього джерела постійного струму. Забезпечення механічного суміщення ротора генератора з вітротурбіною (вимога 5) в безредукторних малопотужних вітроелектростанціях реалізується традиційно через вихідний вал генератора через з'єднувальну муфту. Зазначений варіант конструктивного рішення, одночасно буде задовольняти також вимозі 6. Отже, задача генетичного моделювання зводиться до визначення генетично модифікованої хромосоми, яка структурно буде суміщувати два способи збудження і забезпечувати можливість регулювання основного магнітного потоку Φ_0 .

Уточнена генетична модель структуроутворення

Заданій сукупності вимог (1) ставиться у відповідність уточнена багаторівнева генетична модель (рис. 1). Функцію вихідної структури генетичної моделі виконує батьківська електромагнітна хромосома $ТП\ 0.2y$, яка у відповідності з системним законом стійкості видових форм [6], виконує функцію породжувальної для домінуючого Виду $ТП\ 0.2y$. В загальному випадку, синтез моделі здійснюється з використанням генетичних операторів генетичного синтезу (реплікації, внутрішньовидового схрещування, просторової та електромагнітної інверсії, кросинговеру і мутації) [7]. Послідовність використання генетичних операторів визначається у відповідності з універсальним спадковим принципом «від простого – до складного», шляхом поступового ускладнення батьківської хромосоми.

Рисунок 1 – Генетична модель синтезу структури генератора з гібридною системою збудження суміщеної з вітрогенератором: $(ТП\ 0.2y)_1$ – батьківська (первинна) електромагнітна хромосома; $(ТП\ 0.2y)_2$ – вторинна хромосома; $S_{10} - S_{7021}$ – хромосомний набір Виду; S_{7021} – породжувальна хромосома та її візуалізація; В – вал; ВТ – вітрогенератор; TP_1 – технічне рішення (варіант); P_{7021} – популяція технічних рішень; 1, 2, 3 – рівні генетичної складності

На відміну від відомих моделей внутрішньовидового синтезу, для розв'язання даної задачі,

запропоновано уточнену генетичну модель, що враховує можливі варіанти збудження магнітного поля, а також відтворює процедури суміщення активних елементів генератора з основними механічними вузлами генератора та вітрогенератора. Способи збудження магнітного поля моделюються відповідною ізомерною композицією генетично ідентичних електромагнітних хромосом, які відрізняються за структурою магнітного поля на їх активних поверхнях, а саме: поля постійних струмів (S_{10}); змінних m – фазних струмів (S_{11}); поля постійних магнітів (S_{12}), а також їх можливих комбінацій. Такий підхід дозволяє підвищити чутливість моделі і розширити клас задач синтезу. Процедури суміщення електромагнітних і механічних компонентів вітроенергетичного пристрою моделюються за допомогою оператора схрещування з врахуванням генетичної відповідності між електромагнітними і механічними структурами осесиметричного типу [8].

Структура моделі (рис. 1) визначається трьома рівнями структурної складності, які представлені породжувальною батьківською хромосомою (рівень 1), послідовністю генетично модифікованих електромагнітних хромосом ($S_{10} - S_{7021}$), які визначають геном Виду $ТП\ 0.2y$ (рівень 2) і популяційним рівнем можливих технічних реалізацій, які допускаються генетичною інформацією суміщеної хромосоми S_{7021} (рівень 3). Якщо два перші рівні визначають мікрогенетичну програму шуканої популяції (табл. 1), то третій рівень відтворює початковий етап структурної еволюції популяції електричних машин. Генетична модель одночасно візуалізує оптимальну траєкторію синтезу за заданою функцією F_S .

Таблиця 1 – Результати розшифрування генетичної програми структуроутворення гібридної структури ЕМД з магнітоелектричним збудженням

Генетичний код хромосоми	Структурна формула хромосоми	Статус хромосоми	Ваговий коефіцієнт відповідності
$ТП\ 0.2y$	$(ТП\ 0.2y)_1$	Батьківська, первинна, нерухома	–
$ТП\ 0.2y$	$(ТП\ 0.2y)_2$	Вторинна, рухома з МЕЗ	–
$ЦЛ\ 2.0x$	$(ЦЛ\ 2.0x)_1$	Первинна, нерухома зі збудженням від постійного струму	–
S_{10}	$(ТП\ 0.2y)_{10}$	Первинна зі збудженням від постійного струму, інформаційна	–
S_{11}	$(ТП\ 0.2y)_{11}$	Первинна зі збудженням від m -фазних струмів	–
S_{12}	$(ТП\ 0.2y)_{12}$	Первинна з МЕЗ, інформаційна	–
S_{201}	$(ТП\ 0.2y)_{11} \times (ЦЛ\ 2.0x)_1$	Первинна з гібридним збудженням, інформаційна	0,45
S_{301}	$[(ТП\ 0.2y)_{11} \times (ЦЛ\ 2.0x)_1]_{OY}$	Радіальний ізомер (OY), інформаційна	–
S_{401}	$[(ТП\ 0.2y)_{11} \times (ЦЛ\ 2.0x)_1]_{OY} \times (ТП\ 0.2y)_2$	Парна, гібридна, інформаційна	0,55
S_{5021}	$\{[(ТП\ 0.2y)_{11} \times (ЦЛ\ 2.0x)_1]_{OY} \times (ТП\ 0.2y)_2\}_{OZ}$	Аксіальний ізомер (OZ), інформаційна	0,7
S_{6021}	$\{[(ТП\ 0.2y)_{11} \times (ЦЛ\ 2.0x)_1]_{OY} \times (ТП\ 0.2y)_2\}_{OZ} \times (В)$	Суміщена, інформаційна	0,9
S_{7021}	$\{[(ТП\ 0.2y)_{11} \times (ЦЛ\ 2.0x)_1]_{OY} \times (ТП\ 0.2y)_2\}_{OZ} \times (В) \times (ВТ)$	Суміщена, породжувальна	1,0

Вагові коефіцієнти відповідності синтезованих структур частковим вимогам F_S визначались за методикою експертних оцінок.

Внутрішньовидова мікрогенетична програма структуроутворення представлена набором з 11 генетично модифікованих електромагнітних хромосом (без врахування батьківської), який містить 10 інформаційних хромосом і одну хромосому зі статусом породжувальної. Модель відтворює багаторівневий процес гібридизації та суміщення хромосом, які моделюють наступні рівні складності:

- утворення гібридної структури обмотки якоря (міжродовий гібрид), яка суміщує m -фазну розподілену обмотку та обмотку керування постійного струму (хромосома S_{201});
- утворення гібридної електро механічної пари (первинно-вторинної хромосоми) з ідентичною геометрією активних поверхонь, але з різною структурою магнітного поля: змінних струмів (первинна хромосома S_{401}) і поля постійних магнітів (вторинна хромосома ($ТП 0.2y$));
- суміщення генератора з валом (хромосома S_{601}), який одночасно виконує функцію магнітопроводу;
- суміщення рухомих частин генератора з вітротурбіною (породжувальна хромосома S_{701}).

На етапі синтезу та аналізу ізомерної групи (хромосоми $S_{300} - S_{302}$) здійснено вибір оптимального варіанта просторового суміщення розподіленої якірної обмотки генератора з зосередженою обмоткою керування, яке задовольняє частковій вимозі мінімізації електричних втрат (п. 3 вимог). Результатом генетичного моделювання є структурна формула породжувальної хромосоми сьомого покоління S_{701} , яка задовольняє заданій інтегральній функції синтезу

$$S_{701} = \{[(ТП 0.2y)_{11} \times (ЦЛ 2.0x)_{11}]_{OY} \times (ТП 0.2y)_{22}\}_{OZ} \times (B) \times (BT) \subset P_{701}. \quad (2)$$

Слід зазначити, що генетична модель (рис. 1) може бути використана також для синтезу керованих структур генераторів як з трифазним, так і однофазним виконанням обмотки якоря. Різноманітність ЕМ-структур за кількістю фаз моделюється з застосуванням генетичного оператора реплікації на основі хромосоми – реплікатора S_{11} .

На основі отриманої за результатами моделювання структурної формули (2) здійснено спрямований синтез структури генератора з гібридною системою збудження. Процедура синтезу реалізована з використанням методу горизонтального перенесення генетичної інформації з наступною графічною візуалізацією синтезованої структури (рис. 2).

Рисунок 2 – Структура торіадального генератора з гібридною системою збудження, суміщеного з вітротурбіною, яка синтезована на основі хромосоми S_{701} : 1 – якір, 2 – розподілена m -фазна обмотка, 3 – ротор з постійними магнітами та осердями, 4 – вал, 5 – обмотка збудження, 6 – підшипники, 7 – підшипниковий щит, 8 – вітротурбіна

Результати синтезу покладено в основу розробки конкурентоспроможного рішення керованого генератора з гібридною системою збудження магнітного потоку [9, 10].

В загальному випадку в синхронному генераторі з гібридним збудженням присутні одночасно дві системи збудження: магнітоелектрична та електромагнітна. При цьому обмотка збудження нерухома та розміщена співвісно з ротором та статором. Проведення магнітного потоку технічно забезпечується за рахунок магнітом'яких осердь, які встановлено між постійними магнітами однієї полярності. Таким чином, постійні магніти створюють магнітний потік однієї полярності, а обмотка збудження – протилежної полярності.

Подальший аналіз та дослідження синхронного генератора з гібридним збудженням проводився методами математичного моделювання.

Тривимірний ескіз досліджуваного синхронного генератора з гібридним збудженням зображено на рис. 3, на якому позначено: 1 – статор, 2 – обмотка статора, 3 – постійні магніти, 4 – осердя, 5 – індуктор ротора, 6 – маточина, 7 – обмотка збудження.

Рисунок 3 – Тривимірний ескіз досліджуваного генератора

Система рівнянь тривимірного електромагнітного поля, відносно комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу $\vec{A} = \vec{e}_x \dot{A}_x + \vec{e}_y \dot{A}_y + \vec{e}_z \dot{A}_z$ і скалярного електричного потенціалу φ записується в наступному вигляді:

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \vec{A} \right) + j\omega\sigma \vec{A} + \sigma \nabla \varphi = \vec{J}_c;$$

$$\nabla \left(j\omega\sigma \vec{A} + \sigma \nabla \varphi - \vec{J}_c \right) = 0,$$

де μ , σ – магнітна проникність та електропровідність, ω – кутова частота зміни величин у часі, $\vec{J}_c = \vec{e}_x J_{cx} + \vec{e}_y J_{cy} + \vec{e}_z J_{cz}$ – вектор густини сторонніх струмів, який задається в обмотці збудження і має три просторові складові. Складові вектору магнітної індукції визначаються через вектор магнітного потенціалу:

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}; B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}; B_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}.$$

Тоді, модуль вектор магнітної індукції розраховується за виразом:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}.$$

На зовнішній границі розрахункової області для векторного магнітного потенціалу задано однорідні граничні умови першого роду, а на внутрішніх границях для вектору магнітного потенціалу – умови безперервності векторів.

В результаті польового аналізу було отримано розподіл магнітної індукції у просторі та в перерізі, які представлені на рис. 4.

Рисунок 4 – Розподіл магнітної індукції

Максимальне значення магнітної індукції складає 1,65 Тл в кромці зубців статора.

Низка польових розрахунків в залежності від значення магніторушійної сили обмотки збудження була проведена з метою визначення максимальної глибини регулювання магнітного потоку в машині.

В залежності від кута повороту ротора була отримана залежність потокозчеплення в генераторі обраного варіанту для трьох фаз для випадку коли МРС ОЗ дорівнює нулю (рис. 5).

Рисунок 5 – Залежність потокозчеплення від кута повороту ротора

В залежності від кута повороту ротора була отримана залежність потокозчеплення в СГ з ГЗ обраного варіанту при різних значеннях МРС для фази А, яка представлена на рис. 6.

Рисунок 6 – Залежність потокозчеплення від кута повороту ротора та МРС ОЗ

При цьому значення потокозчеплення змінюється в межах від 0,4328 Вб при $F = -500$ АВ до 0,8407 Вб при $F = +2000$ АВ при однаковому опорі навантаження R_n . Користуючись математичною моделлю, описаною в пункті, було побудовано зовнішню характеристику у відносних одиницях в залежності від МРС обмотки збудження (рис. 7) при неробочому ході ($R_n = 1000$ Ом), навантаженні ($R_n = 100...20$ Ом) та короткому замиканні ($R_n = 1$ Ом).

Базовому значенню напруги відповідає напруга при нульовій МРС ОЗ. Базовому значенню струму відповідає номінальний струм якоря.

Рисунок 7 – Зовнішні характеристики СГ в залежності від МРС ОЗ

Абсолютна глибина регулювання напруги складає 37 % при номінальному навантаженні. При цьому слід зазначити, що коефіцієнт корисної дії залежить від режиму роботи, навантаження, величини струму збудження. Слід зауважити, що електричні параметри обмоток та геометрія досліджуваної машини не оптимізовано, тому результати подано у відносних одиницях для зручності.

На рис. 8 представлена залежність ККД від величини МРС обмотки збудження при активному навантаженні.

Рисунок 8 – Залежність ККД генератора від МРС ОЗ

Максимальне значення ККД сягає значення 87 %. ККД СГ з ГЗ при номінальному навантаженні змінюється в межах від 80 % до 86,5 % при значеннях МРС ОЗ від «-500 А×витків» до «2000 А×витків». Окремим питання є дослідження співвідношення МРС обмотки збудження та МРС постійних магнітів.

ВИСНОВКИ. 1. Вперше здійснено постановку задачі синтезу магнітоелектричних генераторів, які забезпечують можливість регулювання основного магнітного потоку на основі інформації їх родових макроеволюційних програм.

2. Розроблено уточнену генетичну модель структуроутворення складних ЕМ-об'єктів гібридних і суміщених Видів, яка на відміну від відомих, забезпечує можливість синтезу та вибору структур з підвищеним рівнем структурної деталізації активних частин статора й ротора, з врахуванням типу збудження магнітного поля і кількості фаз.

3. З використанням уточненої генетичної моделі базового виду *ТП 0.2у*, здійснено спрямований синтез структури керованого генератора з гібридною системою збудження магнітного потоку, на основі якої розроблено конкурентоспроможне технічне рішення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Holmes A. S., Guodong Hong, Keith R. Pullen. Axial-flux permanent magnet for micropower generation. *IEEE Journal of microelectromechanical systems*. 2005. Vol. 14. P. 54–62.
2. Chalmers B. J., Wu W., Spooner E. An axial flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1999. Vol. 14. № 2. P. 251–257.
3. Gieras J. F., Wing M., Kamper M. J. Axial flux permanent magnet brushless machines. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2004. 340 p.
4. Xiping L., Aihua Z., Chen Z. Design of a stator-separated axial flux-switching hybrid excitation synchronous machine. *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS'2011)*. 2011. P. 1–4.
5. Шинкаренко В. Ф., Чумак В. В., Монахов Е. А. Структурно-системний аналіз тороїдальних плоских електричних машин. *Електромехані-*

чні і енергозберігаючі системи. 2016. №3 (35). С. 50–56.

6. Шинкаренко В. Ф., Котлярова В. В. Теория и практика управляемой эволюции на уровне произвольных Видов электромеханических преобразователей энергии. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2012. Том 1. № 2. С. 3–14.

7. Шинкаренко В. Ф., Шиманська А. А. Словник із структурної і генетичної. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 112 с.

8. Shynkarenko V., Kuznetsov Y. Interdisciplinary Approach to Modeling and Synthesis of difficult Technical Systems. *Journal of the Technical University of Gabrovo*. 2016. № 52. P. 24–28.

9. Електрична машина аксіального типу з постійними магнітами : пат. 115932 Україна : МПК H02K 21/14. № а 2016 04689 ; заявл. 26.04.2016 ; опубл. 10.01.2018 , Бюл. № 1.

10. Чумак В. В., Монахов Е. А. Управление магнитоэлектрическим генератором с аксиальным потоком. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 2. С. 55–57.

STRUCTURAL SYNTHESIS OF TOROIDAL GENERATOR WITH A HYBRID EXCITATION SYSTEM

E. Monakhov, V. Shynkarenko, V. Chumack, V. Fetisov

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

prosp. Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: emonachov@gmail.com, svf1102@gmail.com, chumack_kpi@ukr.net, f.vladimir@ukr.net

Purpose. To develop and synthesize the magnetoelectric generator on the basis of information of its macrogenetic program with possibility to adjust the magnetic flux in air gap by means of combining two excitation systems: electromagnetic and permanent magnet. **Methodology.** The synthesis was carried out by using the genetic operators of genetic synthesis: replication, interbreeding, spatial and electromagnetic inversion and mutation. The macrogenetic program and methods of structural synthesis were applied. Further analysis of the structure of a synchronous generator with a hybrid excitation system using the example of a 3 kW synchronous generator was carried out using modern modeling methods based on the finite element method. **Results.** The refined genetic model of the structure formation of complex EM objects of hybrid and overlapping species is shown, which, unlike known ones, provides the ability to synthesize and select structures with an elevated level of structural detailing of the active parts of the stator and rotor, taking into account the type of excitation of the magnetic field and the number of phases. The results of the interpretation of the genetic program for the structure formation of a hybrid structure with magnetoelectric excitation and the method of expert estimates determined the weighting coefficients of the synthesized structures for the partial requirements of the integral search function. **Practical value.** The directional synthesis of the structure of a synchronous generator with a hybrid magnetic flux excitation system was carried out and on the basis of which a competitive technical solution was developed. References 10, tables 1, figures 6.

Key words: electromechanical object, synchronous generator, hybrid excitation.

REFERENCES

1. Holmes, A. S., Guodong, Hong, & Keith, R. Pullen. (2005). Axial-flux permanent magnet for micropower generation. *IEEE Journal of microelectromechanical systems*, 14, 54–62.

2. Chalmers, B. J., Wu, W., & Spooner, E. (1999). An axial flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14 (2), 251–257.

3. Gieras, J. F., Wing, M., & Kamper, M. J. (2004). *Axial flux permanent magnet brushless machines*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

4. Xiping, L., Aihua, Z., Chen, Z. (2011). Design of a stator-separated axial flux-switching hybrid excitation synchronous machine. *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS'2011)*, 1–4.

5. Shinkarenko, V. F., Chumak, V. V., & Monakhov, E. A. (2016). Strukturno-sistemnyy analiz toroidalnykh ploskikh elektricheskikh mashin. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*, 3 (35), 50–56. [in Russian]

6. Shinkarenko, V. F., & Kotlyarova, V. V. (2012). Teoriya i praktika upravlyaemoy evolyutsii na urovne

proizvolnykh Vidov elektromekhanicheskikh preobrazovateley energii. *Pratsi Tavriyskogo derzhavnogo agrotekhnologichnogo universitetu*, 1 (2), 3–14. [in Russian]

7. Shinkarenko, V. F., & Shimanska, A. A. (2015). *Slovník iz strukturnoi i genetichnoi* [Word-nickname from structural and genetically]. Kiiv: NTUU KPI. [in Ukrainian]

8. Shynkarenko, V., & Kuznetsov, Y. (2016). Interdisciplinary Approach to Modeling and Synthesis of difficult Technical Systems. *Journal of the Technical University of Gabrovo*, 52, 24–28.

9. *Elektrichna mashina aksialnogo tipu z postiynimi magnitami* [Electric machine of axial type with postive magnetism] pat. 115932 Ukraina: MPK H02K 21/14. № а 2016 04689; zayavl. 26.04.2016; opubl. 10.01.2018, Bul. № 1. [in Ukrainian]

10. Chumak, V. V., & Monakhov, E. A. (2016). Upravlenie magnitoelektricheskim generatorom s aksialnym potokom. *Tekhnichna elektrodinamika*, 2, 55–57. [in Russian]

Стаття надійшла 11.05.2019.