

**Василь Федорович Шинкаренко¹, Анна Анатоліївна Шиманська²,
Вікторія Володимирівна Котлярова³**

¹доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханіки
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: svf1102@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5054-823X>
ResearcherID: [AAK-3777-2020](https://orcid.org/AAK-3777-2020). SCOPUS Author ID: 7005550726

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: shym.anna@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2481-0908>
ResearcherID: [ABB-9534-2020](https://orcid.org/ABB-9534-2020). SCOPUS Author ID: 57202580817

³старший викладач кафедри електромеханіки
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: sharik_2004@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4182-4175>
ResearcherID: [AAK-3782-2020](https://orcid.org/AAK-3782-2020). SCOPUS Author ID: 57202578038

ПРИНЦИП ІНВЕРСІЇ В СТРУКТУРНІЙ ОРГАНІЗАЦІЇ І ЕВОЛЮЦІЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Проаналізовано фундаментальність принципу інверсії, який є предметом міждисциплінарних досліджень. Акцентовується увага на необхідність системного аналізу видів і прояву інверсії в структурній організації і функціонуванні електромеханічних об'єктів. За результатами аналізу генетичних програм структуроутворення і постановки еволюційних експериментів визначено структуру основних видів інверсії і запропоновано їх класифікацію. Вперше аналізується генетична природа й особливості прояву топологічної інверсії хромосомного рівня. Показано, що область існування довільних видів інверсії визначається їхніми макrogenетичними програмами. Аналізується генетична природа інваріантних інформаційних зв'язків хромосомної, електромагнітної, просторової, динамічної інверсій та їх комбінаторних варіантів, з періодичною структурою генетичної класифікації (породжувальної системи) первинних джерел електромагнітного поля. На конкретних прикладах показано, що кожен вид інверсії визначає принципи структуроутворення і структурну еволюцію відповідних функціональних класів електромеханічних об'єктів. Аналізується структурний потенціал інверсних видів-близнюків, який розглядається як потенційне джерело структуроутворення і технічних інновацій. Розглянуто умови порушення інверсії видів енергії в окремих функціональних класах електромеханічних систем технологічного призначення.

Ключові слова: електромеханічні об'єкти; принцип інверсії; види інверсії; породжувальна система; електромагнітна хромосома; генетичний код; генетичне передбачення; інноваційний синтез; технічна еволюція.

Рис.: 13. Бібл.: 21.

Актуальність теми дослідження. Інверсія належить до категорії універсальних закономірностей, які визначають структурну організацію, поведінку і функціонування складних систем як природного, так і антропогенного походження. Методи інверсії широко застосовуються при розв'язанні прямих і зворотних задач у математиці, в пошукових задачах евристичного синтезу й ухвалення рішень, в оборотних обчисленнях і алгоритмах програмування, у системах керування динамічними процесами, у психології сприйняття та мислення та ін. Поняття інверсії є предметом міждисциплінарних досліджень у системній генетиці, фізиці, хімії, математиці, квантовій механіці, лінгвістиці, філософії, музиці, метеорології, кристалографії, геології та інших наукових дисциплінах (рис. 1). Перетворення інверсії безпосередньо пов'язано з операцією симетрії, тому інверсія проявляється як на мікро-, так і на макрорівнях і має статус фундаментального фізичного принципу, який визначає процеси перетворення енергії, речовини, простору та часу.

Принцип інверсії належить до системних принципів структурної організації електромеханічних перетворювачів енергії, який визначає їхні електромагнітні, структурні й функціональні властивості. Такі важливі для електромеханіки поняття, як періодичне електромагнітне поле, просторова геометрія і топологія активних частин, структура полюсотвірних систем, вид просторового руху та ін., безпосередньо пов'язані з відповідними видами інверсії або їх комбінаціями. Необхідність системного аналізу прояву інверсії в електромеханічних об'єктах (ЕМ-об'єктах) визначається низкою причин. По-перше, інверсія належить до одного з фундаментальних принципів структурної

організації і функціонування об'єктів електромеханіки. Інверсія явище багаторівнєве, яке проявляється на генетичному, електромагнітному, енергетичному, структурному і функціональному рівнях організації ЕМ-об'єктів. По-друге, інверсія виступає одним з основних методологічних принципів генетичного структуроутворення електромеханічних об'єктів. По-третє, фактично недослідженими залишаються важливі аспекти умов виникнення і порушення інверсії, а також їх взаємозв'язки з елементно-інформаційним базисом породжувальної системи. Тому визначення рівнів, видів та особливостей прояву інверсії в структуроутворенні та функціонуванні об'єктів електромеханіки, на цей час, є актуальним науково-методологічним завданням.



Рис. 1. Принцип інверсії як предмет міждисциплінарних досліджень

Постановка проблеми. Інверсія – (від лат. *inversio* – перестановка, перевертання) – будь-яка пара елементів (процесів, явищ), які змінюють порядок свого розташування (орієнтованості, напрямку дії, полярності) на зворотній. Синонімами терміну «інверсія» є такі поняття, як зміна порядку, протилежність, оборотність, зворотність, реверс, перевертання, дзеркальність, інвертування тощо, які суттєво розширюють межі її проявів та зумовлюють неоднозначність його коректного тлумачення. Виходячи з визначення, поняття інверсії безпосередньо пов'язано з фундаментальним принципом електромеханічної взаємодії, що потребує їх спільного аналізу на хромосомному, електромагнітному, структурному та функціональному рівнях організації електромеханічних систем (ЕМ-систем).

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідження і вивчення видів інверсії в об'єктах електромеханіки фактично обмежуються аналізом явища оборотності електричних машин [1-3]. Переважна більшість публікацій із дослідження електричних машин та електромеханічних пристроїв, що функціонують на принципах інверсії, розглядаються їх авторами як спеціальні типи ЕМ-об'єктів, без їх безпосереднього зв'язку з принципом інверсії або його окремими видами. У науково-технічній літературі такі об'єкти відомі під різними термінологічними дефініціями: «двигуни із зовнішнім ротором», «двигуни оберненої конструкції», «двигуни коливального руху», «електричні машини (ЕМ) зворотно-обертального руху», «реверсивні двигуни» та ін. [4-8]. У генетично організованих системах принцип інверсії належить до п'яти фундаментальних принципів структурної організації (реплікації, схрещування, інверсії, кросинговеру і мутації), комбінаторика яких визначає процеси генетичного структуроутворення ЕМ-об'єктів [9].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Окремі аспекти генетичного аналізу і синтезу інверсних електромеханічних структур були опубліковані авторами в процесі розробки основних положень теорії генетичної еволюції ЕМ-систем. Огляду проявів просторової інверсії в електричних машинах присвячено роботу [10]. Проте системних досліджень і наукових узагальнень стосовно систематизації і аналізу видів інверсії в структурній організації і функціонуванні ЕМ-об'єктів, не виявлено. Фактично відсутні публікації щодо пояснення генетичної природи принципу інверсії та його місця в методології генетичного структуроутворення складних ЕМ-систем. Важливим є дослідження зв'язку видів інверсії з елементно-інформаційним базисом генетичної класифікації (ГК) первинних джерел електромагнітного поля. Як відомо, інваріантність фізичних законів щодо перетворень симетрії інверсії може порушуватись у структурах і явищах, зумовлених слабкою електромагнітною взаємодією [11; 12]. Тому важливим напрямом структурно-системних досліджень, яке становить самостійне наукове завдання, є системний аналіз причинно-наслідкових фізичних явищ, які виникають в ЕМ-об'єктах за умови порушення інверсійної симетрії.

Мета роботи. Метою цього дослідження є визначення і класифікація видів інверсії, а також аналіз особливостей їх прояву на генетичному, структурному і функціональному рівнях організації електромеханічних перетворювачів енергії. Методологічну основу дослідження становлять методи генетичного аналізу елементно-інформаційного базису системної моделі структуроутворення ЕМ-об'єктів, функцію якої виконує періодична структура ГК [9]. Достовірність результатів генетичного моделювання перевірялася постановкою еволюційних експериментів в межах відповідних класів інверсних ЕМ-об'єктів.

Виклад основного матеріалу. Спільний аналіз фундаментальних принципів електромеханічної взаємодії і генетичних принципів структуроутворення об'єктів електромеханіки дозволяє визначити ієрархію рівнів структурно-інформаційної організації ЕМ-систем, яка є характерною для генетично організованих систем (рис. 2).

В ієрархії рівнів складності ключову роль відіграє рівень породжувальних електромагнітних структур, представлений в ГК кінцевою множиною батьківських електромагнітних хромосом (Cr). Системним носієм універсальних генетичних кодів породжувальних електромагнітних хромосом виступає періодична структура ГК. Генетична інформація елементного базису (просторова геометрія, магнітна симетрія і топологія), інваріантна відносно складності ЕМ-об'єктів, часу їх еволюції і функціональної приналежності, визначає межі структуроутворення вищих рівнів складності (рис. 2). Функцію фізичних носіїв генетичних кодів виконують ЕМ-об'єкти.



*Рис. 2. Рівні структурної організації електромеханічних систем
(Cr – хромосомний рівень, представлений породжувальними джерелами електромагнітного поля (електромагнітними хромосомами))*

За результатами аналізу генетичних програм структуроутворення і постановки еволюційних експериментів у структуроутворенні інверсних ЕМ-об'єктів мають місце наступні види інверсії (рис. 3):

- хромосомна інверсія (I_C), яка зумовлена інверсією вектору магнітної орієнтованості батьківської електромагнітної хромосоми;
- інверсія видів енергії (I_E), яка відома як принцип оборотності електричних машин;
- електромагнітна інверсія (I_{EM}), яка пов'язана зі зміною напрямку (полярності, зворотної орієнтації) векторів електромагнітних величин (струмів, магнітних потоків, результуючих магнітних полів тощо);
- просторова інверсія (I_R), яка зумовлена наявністю двох або більше активних частин і необхідністю їх узгодженої орієнтованості;
- інверсія руху (I_M), яка безпосередньо пов'язана зі зміною напрямку поступального (I_{MV}), обертального ($I_{M\omega}$) або складного просторового руху (наприклад, гвинтового) на зворотний;
- комбіновані інверсії, які представлені сукупною дією їх декількох видів.



Рис. 3. Класифікація видів інверсії в електромеханічних об'єктах

Зазначені види інверсії інваріантні відносно принципу дії, складності ЕМ-системи, її функціональної приналежності і проявляються на різних рівнях структурної організації ЕМ-систем:

- на рівні первинних джерел електромагнітного поля – хромосомна інверсія;
- на рівні активних частин і елементів ЕМ-об'єктів (провідників зі струмом, секцій розподілених обмоток, полюсних систем індукторів, якорів, роторів, вторинних частин) – електромагнітна і просторова інверсії;
- на об'єктному, видовому, родовому та макросистемному рівнях – інверсія видів енергії, електромагнітна, просторова, інверсія руху та їх комбіновані види.

Кожен з основних видів інверсії за способом їх технічної реалізації поділяється на підвиди. Наприклад, електромагнітна інверсія є узагальненою щодо її підвидів: інверсії результуючого електромагнітного поля, магнітної та електричної інверсії (напряму, полярності) в машинах постійного струму і синхронних машинах з електромагнітним збудженням, а також їх комбінованих підвидів. Інверсія руху може бути конкретизована аналізом зворотно-обертального та зворотно-поступального руху.

Хромосомна інверсія. За результатами аналізу елементно-інформаційного базису періодичної структури ГК вперше виявлено первинні джерела поля, характерною властивістю яких є наявність інверсії вектора орієнтованості на рівні батьківських хромосом. Орієнтованість є одним з основних топологічних інваріантів магнітної поверхні, яка

визначається третьою складовою універсальних генетичних кодів. Інверсія хромосомного рівня має місце лише в тих первинних джерелах магнітного поля, просторова геометрія яких допускає наявність зон (ділянок) електромагнітних хромосом із зустрічною орієнтованістю результуючого магнітного поля. На елементному базисі першого великого періоду ГК, такими властивостями наділені всі гомологічні хромосоми підгрупи 0.0x, а також хромосома *PL 0.2y* підгрупи 0.2y:

$$N_{SG} = \langle CL\ 0.0x; KN\ 0.0x; PL\ 0.0x; TP\ 0.0x; SF\ 0.0x; TC\ 0.0x \rangle \subset H_{00x}. \quad (1)$$

Хромосомна інверсія представлена також на рівні джерел-ізоотопів, генетична інформація яких визначає структурний потенціал ЕМ-об'єктів-близнюків [13]. Слід зазначити, що гомологічні хромосоми підгрупи 0.0x не використовуються в структуроутворенні електричних машин з огляду на топологічну замкненість їх активного об'єму. Але наявність граничної електромагнітної симетрії, відсутність кінцевих електромагнітних ефектів і можливість максимального використання активного об'єму структурних представників підгрупи 0.0x відкриває широкі можливості для синтезу ЕМ-об'єктів, функціонування яких пов'язано з електропровідними дискретними, рідинними, іонізованими або біологічними вторинними середовищами.

Специфіка хромосоми *PL 0.2y* визначається тим, що за груповими властивостями (електромагнітною симетрією і топологією) вона є гомологічною до хромосоми домінуючого виду циліндричних ЕМ-об'єктів обертального руху, за винятком того, що її просторова геометрія наділена властивостями Роду плоских. Це єдиний базовий вид підгрупи 0.2y, структури якого характеризуються топологічною інверсією хромосомного рівня (рис. 4). До 2009 р. інформація стосовно наявності ЕМ-об'єктів даного виду в технічній еволюції була відсутня, а інформація батьківської хромосоми була представлена лише у вигляді генетичного коду. У теорії генетичного структуроутворення такі хромосоми визначають потенційну структуру неявних видів. Принципова відмінність неявних видів полягає в тому, що їхні генетичні коди присутні в структурі макrogenетичних програм, але їхні структурні представники ще відсутні в технічній еволюції. Результати передбачення стали вихідною інформацією для синтезу конкурентоспроможних технічних рішень нового покоління однообмоткових дезінтеграторів зі 100 % використанням активного об'єму, призначених для виробництва високоякісних гомогенних порошкових сумішей нанорозмірного діапазону крупності (рис. 4).

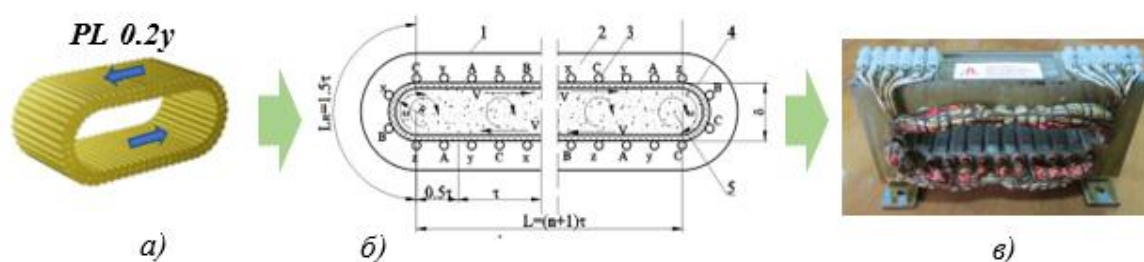


Рис. 4. Послідовність процедур генетичного синтезу ЕМ-об'єктів з хромосомною інверсією: а – батьківська електромагнітна хромосома; б – генетично синтезована структура однообмоткового дезінтегратора; в – індуктор електромеханічного дезінтегратора (представник виду *PL 0.2y*)

Унікальність ЕМ-об'єктів виду *PL 0.2y* визначається комбінаторикою складових його генетичної інформації, яка визначає системні властивості структур-нащадків:

- топологією замкненої магнітної системи;
- однообмотковим виконанням активної поверхні;
- наявністю активного об'єму із зустрічною орієнтацією електромагнітного поля;

- відсутність поздовжніх первинних електромагнітних ефектів;
- можливістю технічної реалізації структур як із зовнішньою, так і з внутрішньою активною поверхнею;
- можливістю багатороторного виконання з перетворенням енергії інверсних біжучих магнітних полів у механічну енергію обертання елементарних роторів;
- можливістю перетворення магнітної енергії інверсного біжучого магнітного поля в електромеханічних пристроях для безпосереднього здійснення технологічних процесів (електромеханічних дезінтеграторів, змішувачів електропровідних рідин та сумішей тощо);
- широкою функціональною адаптивністю.

Інверсія видів енергії. Принцип інверсії знаходить своє відображення в перетвореннях і взаємоперетвореннях різних видів енергії. Інверсія процесів перетворення енергії в ЕМ-об'єктах відома в електромеханіці як явище оборотності електричних машин (відкрите німецьким фізиком Е. Ленцем у 1833 р.). Оборотність електричних машин (за умови збереження їх структури) є прикладом прояву системного принципу інверсії в процесах перетворення відповідних видів енергії: механічної (W_M), магнітної (W_H), теплової (W_T), електричної (W_E), що забезпечує можливість їх функціонування як у режимах генерування (W_G), так і споживання (W_C) електричної енергії:

$$(W_M \rightarrow W_H \rightarrow W_T \rightarrow W_E)_G \leftrightarrow (W_E \rightarrow W_H \rightarrow W_T \rightarrow W_M)_C \quad (2)$$

Аналогічно інверсія видів енергії проявляється в інерційних накопичувачах енергії [14]: «електрична енергія» $\rightarrow$ «магнітна енергія» $\rightarrow$ «теплова енергія» $\rightarrow$ «енергія інерції ротора - маховика» (режим накопичення кінетичної енергії); «енергія інерції маховика» $\rightarrow$ «магнітна енергія» $\rightarrow$ «теплова енергія» $\rightarrow$ «електрична енергія» (режим споживання електричної енергії):

$$W_E \rightarrow W_M \rightarrow W_T \rightarrow W_I \leftrightarrow W_I \rightarrow W_M \rightarrow W_T \rightarrow W_E \quad (3)$$

Оборотність енергетичних процесів має місце також у перетворювачах, які функціонують на принципах п'єзоефекту та піроефекту. П'єзоелектричний ефект спостерігається в анізотропних діелектриках, переважно в кристалах деяких речовин, які характеризуються досить низьким рівнем симетрії. П'єзоефект супроводжується виникненням електричних зарядів (п'єзоелектрики) на гранях деяких кристалів при їхній деформації (прямий п'єзоефект), або виникненням деформації цих кристалів внаслідок дії електричного поля (зворотний п'єзоефект) [15].

З використанням принципу оборотності енергії функціонують такі класи ЕМ-систем як стартер-генератори, мотор – генератори потужних вітроагрегатів, гідрогенератори – двигуни гідроакумуючих електростанцій та ін.

Просторова інверсія пов'язана з перетворенням симетрії, яке змінює порядок розташування довільної пари електромагнітно орієнтованих елементів на зворотній. Виходячи з визначення, необхідними умовами реалізації принципу просторової інверсії в ЕМ-об'єктах є такі:

- наявність не менше двох ($N \geq 2$) магнітно орієнтованих і електромагнітно пов'язаних активних частин (полісів, індукторів, якорів, статорів, роторів);
- можливість зміни їх просторового розташування у протилежному (зворотному) порядку.

Відомим прикладом прояву просторової інверсії в структуроутворенні електричних машин обертального руху є інверсія на рівні їх основних активних частин. Наприклад, у синхронних машинах переважно знаходить застосування компоновальна схема, у якій обмотка якоря розташовується на статорі, а обмотка збудження – на роторі (рис. 5, а). Але

в машинах невеликої потужності, зокрема з магнітоелектричним збудженням, іноді застосовують просторово інверсне виконання з розміщенням обмотки якоря на роторі, а обмотки збудження – на полюсах статора (рис. 5, б).

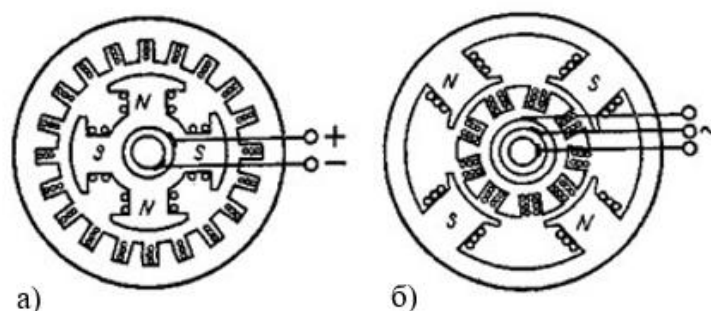


Рис. 5. Принцип просторової інверсії в конструкції явнополюсних синхронних машин обертового руху (вид CL 0.2y): а – з нерухомим якорем; б – з обертовим якорем

Макрогенетична програма обертових машин, структури яких допускають функціонування з просторовою інверсією активних частин, визначається топологією і просторовою геометрією елементного базису в межах першого великого періоду ГК:

- Рід циліндричних:

$$G_{CL} = (CL\ 0.0y, CL\ 0.2y, CL\ 2.2y), \quad (4)$$

- Рід конічних:

$$G_{KN} = (KN\ 0.0y, KN\ 0.2y, KN\ 2.2y), \quad (5)$$

- Рід тороїдних плоских:

$$G_{TP} = (TP\ 0.0y, TP\ 0.2y, TP\ 2.2y), \quad (6)$$

- Рід сферичних:

$$G_{SF} = (SF\ 0.0y, SF\ 0.0x, SF\ 0.2y, SF\ 2.0x, SF\ 2.2y, SF\ 2.2x), \quad (7)$$

- Рід тороїдних циліндричних:

$$G_{TC} = (TC\ 0.0y, TC\ 0.2y, TC\ 2.2y). \quad (8)$$

Домінуючим видом електричних машин обертового руху є вид циліндричних машин з поверхневими обмотками CL 0.2y. В адаптивній еволюції даного виду широко представлені об'єкти з просторовою інверсією на рівні основних активних частин – статора і ротора. Просторова інверсія не «чутлива» до принципу дії, роду струму і типу ЕМ. Доцільність її застосування визначається лише в процесі структурно-параметричної адаптації до вимог та умов функціонування.

Широке використання принципу просторової інверсії спостерігається в структуроутворенні електричних машин поступального руху. Відомими представниками просторово інверсних структур є:

- тягові лінійні електродвигуни з активною шляховою структурою (з рухомими і нерухомими індукторними системами (рис. 6);
- лінійні плоскі двигуни з двосторонніми статорами;
- плоскі і циліндричні індуктори з кільцевою розподіленою обмоткою і зовнішнім розташуванням вторинних елементів.

З погляду генетичної схильності до утворення просторово інверсних структур на рівні основних активних частин ЕМ-об'єкта, такими властивостями наділені всі види ЕМ-структур, родова геометрія яких характеризується від'ємною та нульовою кривизною Гауса.

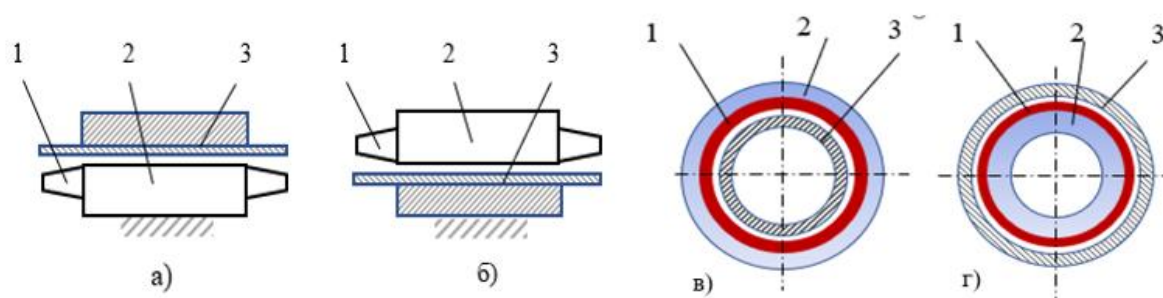


Рис. 6. Просторово інверсні компоувальні схеми в електричних машинах поступального руху: а, б – представники виду плоских ЕМ (PL 2.2х); в, г – структури виду циліндричних ЕМ (CL 2.0х): з нерухомим і рухомим індуктором; 1 – розподілена обмотка; 2 – магнітопровід індуктора; 3 – вторинна частина

Системною властивістю структурних представників виду плоских електричних машин виду PL 2.0х є наявність кільцевої розподіленої обмотки, поперечна симетрія індукторів з дво-, три- та чотиристоронньою активною зоною і інверсним (зовнішнім) розташуванням вторинного елемента (рис. 7, б, в, г). Слід зазначити, що в ЕМ-об'єктах поступального руху, за здавалось би наочною простотою компоувальних схем (рис. 7), приховані принципово різні (структурно, технічно й економічно) системи тягового електроприводу, вибір і практичне використання яких потребує відповідних проектних і техніко-економічних обґрунтувань.

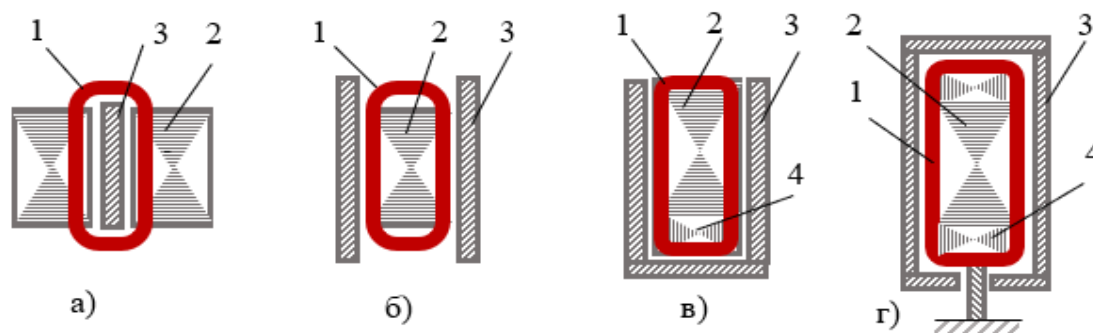


Рис. 7. Варіанти формування активної зони електричних машин поступального руху роду плоских з розподіленою кільцевою обмоткою (представники виду PL 2.0х): а – з внутрішнім вторинним елементом; б, в, г – з зовнішнім (інверсним) вторинним елементом; 1 – кільцева обмотка; 2 – магнітопровід індуктора; 3 – вторинний елемент; 4 – додатковий магнітопровід

Просторова інверсія представлена не тільки на рівні основних активних частин (якорів, індукторів, роторів, вторинних елементів), але й на рівні обмоток електричних машин. Такі машини відомі під назвою індукторних, в конструкції яких і обмотка якоря, і обмотка збудження знаходяться на якорі, а ротор виконується безобмотковим, явнополюсним.

Електромагнітна інверсія. Електромагнітна інверсія є домінуючим видом інверсії, який представлено на всіх рівнях структурної організації ЕМ-об'єктів, починаючи з хромосомного. Всі інші види інверсії (енергетична, просторова, інверсія руху) можуть існувати лише в ЕМ-структурах об'єктного та вищих рівнів організації (рис. 8).

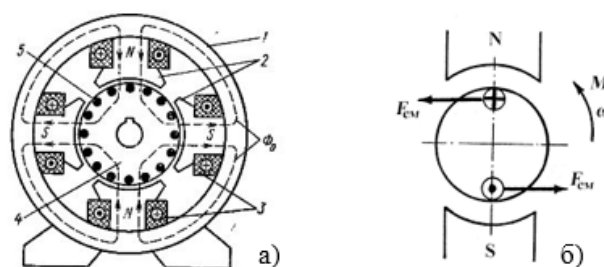


Рис. 8. Електромагнітна інверсія в електричних машинах:

а – контурів замикання основного магнітного потоку; б – струму й електромагнітних сил

Властивість електромагнітної інверсії проявляється на різних рівнях складності та функціональної приналежності ЕМ-об'єктів. Біфілярні обмотки, протилежний напрям струмів у секціях і сполучних шинопроводах, зустрічне обертання роторів у багатороторних електричних машинах, протилежний порядок чергування фаз в багатофазних пристроях, індукційне екранування, зустрічні магнітні потоки в магнітних системах – далеко не повний перелік проявів і численних способів їх технічної реалізації, які мають безпосереднє відношення до електромагнітної інверсії.

Принцип електромагнітної інверсії є визначальним для функціонування спеціальних класів ЕМ-систем, які виникли в процесі адаптивної еволюції. До таких об'єктів, принцип дії яких неможливий без наявності біжучих, або обертових зустрічних магнітних полів, належать:

- плоскі двигуни для безредукторного приводу конвеєрів і транспортерів;
- багатороторні ($N_R > 4$) електродвигуни спеціального призначення;
- електромеханічні дезінтегратори з дискретними феромагнітними робочими тілами для безпосереднього здійснення технологічних процесів;
- багатообмоткові індукторні системи для електромагнітного змішування рідких металів і електропровідних рідинних сумішей;
- ЕМ з реверсуванням магнітного потоку постійних магнітів, та ін.

Інверсія просторового руху – передбачає зміну певного виду просторового руху на протилежний. Системи і ЕМ-об'єкти, які функціонують з інверсним рухом, широко використовуються в електроприводі літальних апаратів, гребних гвинтів, гідронасосів, в конструкціях вітрогенераторів, магнітних редукторів тощо. Для окремих функціональних класів ЕМ-об'єктів інверсія руху виступає необхідною умовою їх функціонування (в спеціальних електромашинних агрегатах з обертовим статором, роторів у дво- та багатороторних електричних машинах, у двигунах зворотно-поступального та зворотно-обертального руху, в багатороторних двигунах, та ін.) (рис. 9).

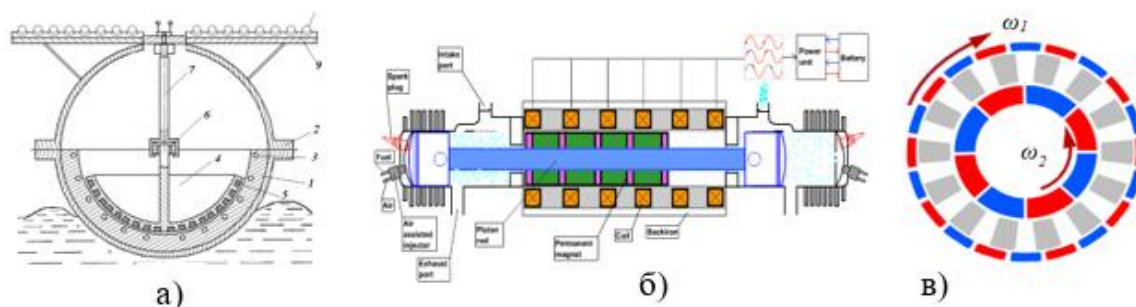


Рис. 9. Електромеханічні об'єкти, які функціонують з використанням інверсії просторового руху:

а – генератор коливального руху морського буя;
б – лінійний генератор вільнопоршневого теплового двигуна; в – магнітний редуктор

Поняття інверсії руху безпосередньо пов'язано з широко відомим і багатозначним термінологічним поняттям «реверс». Реверс (англ. reverse, лат. reversus – «зворотний») означає зміну руху механізму (пристрою, рухомої частини, процесу) на зворотний, протилежний. Загальновідомо, що в реверсивних електродвигунах реалізації зворотного руху передують певний вид електромагнітної інверсії. Наприклад, зміну обертання валу ротора можна отримати при зміні полярності струму обмотки збудження або обмотки якоря (у двигунах постійного струму), або зміною порядку чергування фаз (у двигунах змінного струму). Однак зазначене ствердження є коректним лише для параметричних способів керування, які широко використовуються в електричних машинах.

Існують також структурні способи реалізації реверсивного руху, які дозволяють отримати безконтактний реверс без зміни електричних параметрів. За результатами аналізу макрогенетичних програм виявлено електромагнітні хромосоми, які наділені повотною симетрією активних частин ЕМ-об'єкта відносно нормальної осі OZ [16]. Можливість практичної реалізації безкомутаційного способу допускають лише представники двох видів ПЛ 2.2х,у і СФ 2.2х,у, генетичні коди яких «не чутливі» до відносної орієнтації активних частин за умови збереження $(U, f, \delta) = \text{const}$ (рис. 10).

Наявність зазначеної генетичної аномалії дозволяє реалізувати спосіб плавної зміни частоти обертання ротора (або швидкості поступального руху ВЕ), з можливістю реверсу двигуна, шляхом OZ -повороту статора відносно активної поверхні рухомої частини (в межах просторового кута $\alpha = (0 \div \pi)$) з можливістю реверсу. Для асинхронних двигунів з дуговим статором зазначений спосіб вперше був запатентований у 1945 р. [17]. Пізніше були запатентовані інші технічні реалізації даного способу.



Рис. 10. Безконтактний спосіб просторово адаптивного регулювання швидкості і реалізації реверсивного руху в модульних двигунах:
а – обертального руху (SF 2.2х,у); б – поступального руху (PL 2.2х,у)

Спосіб реалізації реверсивного руху для зазначених видів ЕМ-об'єктів (рис. 10) інваріантний до кривизни Гауса і може бути реалізований в конструкціях двигунів як з нульовою (PL 2.2х,у), так і позитивною та від'ємною кривизною активної поверхні (SF 2.2х,у).

Комбіновані види інверсії. Функціонування переважної більшості ЕМ-об'єктів з мutowаною структурою, а також об'єктів двійникових видів, забезпечується комбінуванням різних видів інверсії, які моделюються відповідними операторами генетичного синтезу.

Процеси адаптивного структуроутворення окремих функціональних класів електричних машин моделюються більш складними алгоритмами з використанням операторів гібридизації, інверсії та мутації. Наочним прикладом технічної реалізації таких комбінаторних структур є функціональні класи електричних машин з явно вираженим мутаційним ефектом (двигуни з ротором, що котиться, тягові лінійні двигуни, багатороторні ЕМ та ін.) [18].

У мutowаних структурах багатороторних асинхронних двигунів (АД), діаметри елементарних роторів яких значно менші за діаметр статора ($D_2 \ll D_1$), тому частота їх обертання перевищує синхронну швидкість магнітного поля статора (рис. 11). Генетичні структури таких двигунів є результатом комбінування операторів електромагнітної інверсії з операторами реплікації та структурної мутації їх рухомих частин (елементарних роторів):

$$C_{PL} = [2(PL\ 2.2y) : R_{ZOX} : I_R : I_{EM}]_1 \times 7[(CL\ 0.2y) : M_D : R_{ZOX}]_2 \subset S_{22y} \quad (9)$$

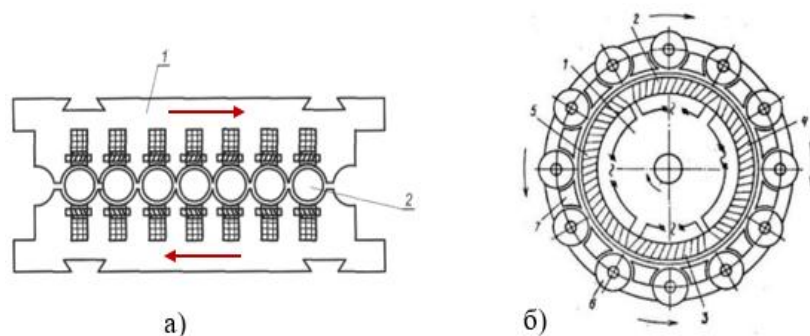


Рис. 11. Багатороторні асинхронні двигуни – представники мутованих об'єктів з комбінованими видами інверсії: а – з електромагнітною інверсією індукторів (представник виду 2PL 2.2у); б – з просторовою, електромагнітною та інверсією обертового руху елементарних роторів (представник виду 4CL 2.2у)

Конструкція багатороторного АД обертового руху (рис. 11, б) поєднує три види інверсії: просторову (зовнішнє розташування елементарних роторів відносно активної поверхні статора); електромагнітну інверсію секціонованої поверхневої обмотки статора; інверсію обертового руху 4-х груп елементарних роторів. Рівень генетичної складності багатороторного двигуна (рис. 11, б) можна описати такою структурною формулою:

$$C_{CL} = [4(CL\ 2.2y) : R_{ZOV} : I_R : I_{EM}]_1 \times 12[(CL\ 0.2y) : M_D : R_{ZOV} : I_{\omega}]_2 \subset S_{22y} \quad (10)$$

Наявність електромагнітної інверсії на хромосомному рівні є достатньою умовою для синтезу ЕМ-структур з комбінованими видами інверсії. В процесі структурної адаптації (ускладнення) зазначених активних поверхонь, шляхом комбінування з вторинними активними частинами, нескладно передбачити їх генетичну схильність до розширення простору структуроутворення з утворенням відповідних структурних варіантів.

Генетичний аналіз банку даних джерел ізотопів засвідчує, що властивістю хромосомної інверсії будуть наділені всі структури першого покоління з уорієнтованістю, в межах підгруп 0.2у і 2.2у:

$$N_I = ({}^1CL\ 0.2y, {}^1CL\ 2.2y, {}^1KN\ 0.2y, {}^1KN\ 2.2y, {}^1PL\ 0.2y, {}^1PL\ 2.2y, {}^1TP\ 0.2y, {}^1TP\ 2.2y, {}^1SF\ 0.2y, {}^1SF\ 2.2y, {}^1CL\ 0.2y, {}^1CL\ 2.2y) \quad (11)$$

Синтезовані на основі джерел-ізотопів близнюкові ЕМ-об'єкти будуть суміщувати електромагнітну інверсію в комбінуванні з просторовою та інверсією руху (рис. 12).

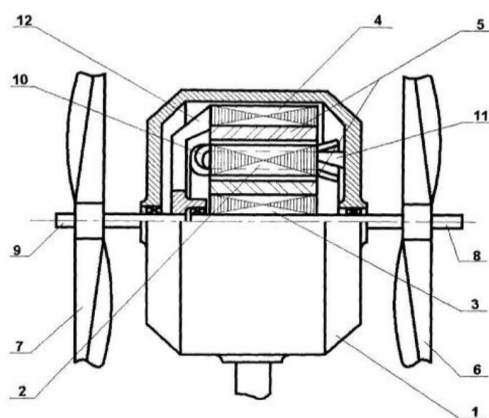


Рис. 12. Гібридний електромеханічний агрегат (представник Виду-близнюка ${}^1CL\ 0.2y$) з комбінованими видами інверсії

Синтезований варіант однообмоткового синхронного двороторного двигуна (рис. 12) поєднує три види інверсії: просторову I_R (наявність зовнішнього ротора); електромагнітну I_{EM} (кросингвер фаз C розподіленої обмотки-близнюка і зустрічні обертові магнітні поля на внутрішній і зовнішній активній поверхні статора); інверсію руху I_ω (зустрічний обертальний рух внутрішнього і зовнішнього роторів та, відповідно, правого і лівого аеродинамічних гвинтів). Рівень генетичної складності двороторного двигуна (рис. 12) визначається структурною формулою:

$$C = [({}^1CL\ 0.2y) : C : I_{EM}]_1 \times 2[(CL\ 0.2y) : R_{OZ} : I_R : M : I_\omega]_2 \times 2(M_{AS})^{-1} \subset G_{CL} \quad (12)$$

За результатами досліджень, на кафедрі електромеханіки (ФЕА) і кафедрі конструювання машин (ММІ) КПІ ім. Ігоря Сікорського, синтезовано, розроблено і вперше введено в еволюцію конкурентоспроможні ЕМ-об'єкти близьюкових видів з комбінованими видами інверсії (рис. 13) [13].

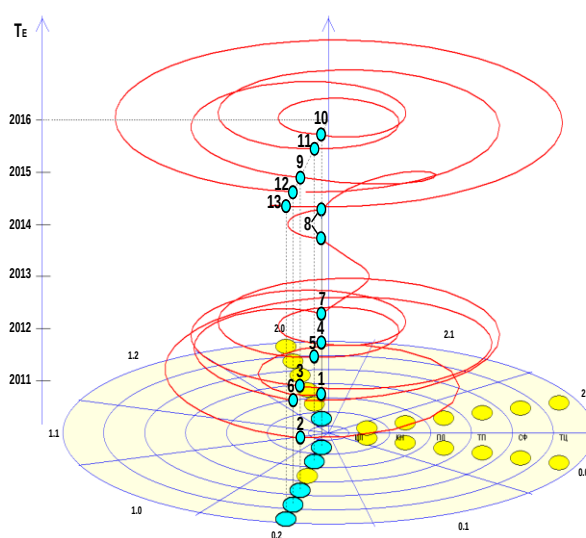


Рис. 13. Еволюційна траєкторія цілеспрямованого введення в еволюцію ЕМ-об'єктів близьюкових видів із комбінованими видами інверсії ($T_E = 5$ років)

Структурний потенціал видів-близнюків, який на декілька порядків перевищує можливість базових видів, становить потужне джерело структуроутворення і технічних інновацій, які визначають новий напрям структурно-системних досліджень в електромеханіці.

Порушення принципу інверсії. Симетрія фізичних законів відносно просторової інверсії є свідченням їх незмінності при заміні правого на ліве, а лівого на праве. Проте інваріантність фізичних законів щодо інверсії може порушуватись у явищах, зумовлених слабкою взаємодією. Процеси адаптивного еволюційного структуроутворення супроводжуються поступовою втратою симетрії ЕМ-структур у порівнянні з симетрією породжувальної структури [10; 19]. В окремих функціональних класах ЕМ-об'єктів, принцип оборотності стає не еквівалентним, або суттєво порушується. Такі об'єкти практично можуть функціонувати лише в односторонньому режимі. Порушення принципу інверсії енергії в ЕМ-об'єктах можливо за умови порушення магнітної симетрії. До магнітно асиметричних систем передусім належать об'єкти з явновираженою мутованою просторовою геометрією і структурою активних частин [18]. Прикладами таких систем є функціональні класи електромеханічних систем для безпосереднього здійснення технологічних процесів (електричні двигуни з ротором, що котиться, магнітні сепаратори, електромеханічні дезінтегратори, багатороторні двигуни та ін.), функціонування яких реалізується лише за напрямом перетворення електричної енергії в механічну.

Положення теорії генетичної еволюції ЕМ-систем дозволяють визначити умови і встановити діагностичні критерії, які зумовлюють порушення принципу оборотності в структурній організації електромеханічних систем і пристроїв. До складу таких критеріїв відносяться:

- мутована структура основних активних частин (наприклад, у багатороторних ($N_2 \geq 4$) електродвигунах);
- критичне порушення електромагнітної симетрії ЕМ-об'єкта;
- критичне порушення співвідношення (площі і геометрії) активних поверхонь $(S_A)_2 \ll (S_A)_1$ (наприклад, у магнітних сепараторах, електромеханічних дезінтеграторах);
- фізичний стан і електромагнітні властивості вторинного середовища (дискретного, рідини, плазми, біологічного).

Проблема порушення інверсії потребує організації подальших досліджень, що зумовлено можливістю відкриття нових фізичних явищ і ефектів. Одним із результатів таких досліджень за даною проблематикою, стало відкриття австрійськими фізиками явища магнітного діода [20]. За аналогією принципу дії електричного діода, магнітний діод забезпечує передачу магнітного поля, між двома взаємопов'язаними індуктивними контурами, лише за одним з напрямів. Очікується, що це відкриття забезпечить нові можливості для створення технологій, заснованих на магнітно-зв'язаних елементах. Аналогічне відкриття в галузі акустичної інверсії здійснено китайськими вченими, які виготовили перший прототип акустичного ізолятора Черна, у якому звукові хвилі втрачають оборотність, але забезпечують їх топологічний захист [21]. Дослідження топологічних ізоляторів актуальні для створення квантових комп'ютерів, які не припуститися помилок під час обчислень завдяки топологічному захисту кубітів.

Висновки. У статті узагальнено результати досліджень з визначення і генетичного аналізу видів інверсії в структурній організації та функціонуванні електромеханічних перетворювачів енергії.

1. Показано, що інверсія належить до категорії універсальних закономірностей, які визначають структурну організацію, поведінку і функціонування складних систем як природного, так і антропогенного походження. Поняття інверсії безпосередньо пов'язано з фундаментальним принципом електромеханічної взаємодії, просторовою структурою і топологією полюсотвірних активних поверхонь, орієнтованістю векторних електромагнітних величин, режимами функціонування та видами просторового руху ЕМ-об'єктів.

2. Уперше визначено рівні і особливості прояву інверсії в ЕМ-об'єктах, що дозволило запропонувати класифікацію видів інверсії, які визначають генетичні, енергетичні, електромагнітні, геометричні, структурні і динамічні властивості електричних машин та електромеханічних пристроїв, незалежно від рівня їхньої складності і функціонального призначення.

3. Вперше теоретично й експериментально доказано, що принципи просторової і комбінованої інверсії розповсюджуються також на ЕМ-об'єкти близнюкових видів, структурний потенціал яких визначається генетичною інформацією електромагнітних джерел-ізополюсів.

4. На конкретних прикладах показано, що в методології генетичного синтезу, перетворення інверсії виступає як один з п'яти основних системних принципів генетичного структуроутворення, який у сукупності з іншими принципами, визначає структурну організацію і еволюцію електромеханічних перетворювачів енергії.

Результати дослідження є системною основою для розробки алгоритмів автоматизованого синтезу, розробки індивідуальних освітніх траєкторій і створення генетичних банків інновацій.

Список використаних джерел

1. Милях, А. Н., & Шидловский, А. К. (1967). *Принцип взаимности и обратимость явлений в электротехнике*. Наукова думка.
2. Бєлікова, Л. Я., & Шевченко, В. П. (2011). *Електричні машини*. Наука і техніка.
3. Sen, P. C. (2021). *Principles of electric machines and power electronics, international adaptation*. Wiley & Sons, Limited, John.
4. Блюмин, Г. З. (1977). *Двигатели с внешним ротором для высокоскоростного электропривода*. Энергия.
5. Вербовой, П. Ф., & Съянов, А. М. (1985). *Конструкции асинхронных двигателей с внешним ротором* [Рукопис подано до опублікування]. АН УССР.
6. Akinin, K., Kireyev, V., Petukhov, I., Filomenko, A., Lavrinenko, V., & Mikhailik, E. (2022). Дослідження впливу зміни параметрів безконтактних магніто-електричних двигунів зворотно-обертального руху на їх характеристики. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, (62), 025. <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.025>.
7. Collins, D. *External rotor motor basics: Design and applications*. (n.d.). Motion Control, Encoders, Servo Drives, Controllers – Motion Control Tips. <https://www.motioncontroltips.com/external-rotor-motor-basics-design-applications>.
8. Farag, M. (2013, June 19) *In-Wheel Brushless DC Outer Rotor (Hub) Motor Used in Electrically Driven Vehicles*. Home. <https://contest.techbriefs.com/2013/entries/transportation-and-automotive/3517>.
9. Шинкаренко, В. Ф. (2002). *Основи теорії еволюції електромеханічних систем*. Наукова думка.
10. Козігородський, В., Шинкаренко В. Ф. (наук. кер.). (2024). *Принцип просторової інверсії в структурній організації і еволюції електричних машин* [Магістерська дисертація]. КПП ім. Ігоря Сікорського.
11. Урманцев, Ю. А. (1974). *Симметрия природы и природа симметрии*. Мысль.
12. Мусієнко, Ю. А., & Горбачук, І. Т. (2001). Принципи симетрії та їх зв'язок з законами збереження у фізиці. *Наукові записки : Збірник наукових статей Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова*, (43), 95–100. <http://enpuir.npu.edu.ua/handle/123456789/16152>.
13. Shynkarenko, V., & Kotliarova, V. (2017). Twin-objects and double-objects in the structural evolution of electromechanical energy converters. In *2017 international conference on modern electrical and energy systems (MEES)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/mees.2017.8248865>.
14. Li, X., & Palazzolo, A. (2022). A review of flywheel energy storage systems: State of the art and opportunities. *Journal of Energy Storage*, 46, 103576. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103576>.
15. Желудев, И. С. (1987). *Физика кристаллов и симметрия*. Наука.
16. Shynkarenko, V., Makki, A., Kotliarova, V., Shymanska, A., & Krasovskyi, P. (2020). Genetic organization and evolution of electromechanical objects with adaptive geometry of active zone. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 5(5), 512–525. <https://doi.org/10.25046/aj050564>.
17. Фридкин, П. А. (1945). Новый тип дугового статора для электропривода с малыми и регулируемым скоростями вращения. *Электричество*, (1, 2), 22–23.
18. Shynkarenko, V., Kotliarova, V., Monakhov, Y., & Krasovskyi, P. (2022). Structural mutations in adaptive evolution of electromechanical energy converters. *Technical Sciences and Technologies*, (2(28)), 111–126. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2\(28\)-111-126](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2(28)-111-126).
19. Эбелинг, В., Энгель, А., & Файстель, Р. (2001). *Физика процессов эволюции. Синергетический подход* (Ю. А. Данилова, Trans.). Эдиториал УРСС.
20. Prat-Camps, J., Maurer, P., Kirchmair, G., & Romero-Isart, O. (2018). Circumventing magnetostatic reciprocity: A diode for magnetic fields. *Physical Review Letters*, 121(21). <https://doi.org/10.1103/physrevlett.121.213903>.
21. Ding, Y., Peng, Y., Zhu, Y., Fan, X., Yang, J., Liang, B., Zhu, X., Wan, X., & Cheng, J. (2019). Experimental demonstration of acoustic chern insulators. *Physical Review Letters*, 122(1). <https://doi.org/10.1103/physrevlett.122.014302>.

References

1. Miliakh, A.N., Shidlovskii, A.K. (1967). *Printcip vzaimnosti i obratimost iavlenii v elektrotekhnike* [The Principle of Reciprocity and Reversibility of Phenomena in Electrical Engineering]. Naukova Dumka.
2. Bielikova, L.Ya., Shevchenko V.P. (2011) *Elektrychni mashyny* [Electric Machines]. Nauka i Tekhnika.

3. Sen, P. C. (2013). *Principles of Electric Machines and Power Electronics* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
4. Bliumin, G.Z. (1977). *Dvigateli s vneshnim rotorom dlia vysokoskorostnogo elektroprivoda* [Motors with an External Rotor for High-Speed Electric Drives]. Energiia.
5. Verbovoi, P. F., Sianov, A. M. (1985). *Konstruktsii asinkhronnykh dvigatelei s vneshnim rotorom* [Designs of Asynchronous Motors with an External Rotor]. Preprint – 417 IED AN USSR.
6. Akinin, K.P., Kireyev, V.G., Petukhov, I.S., Filomenko, A.A., Lavrinenko, V.A., Mikhailik, E.M. (2022). *Doslidzhennia vplyvu zminy parametriv bezkontaktnykh magnitno-elektrychnykh dvyhuniiv zvorotno-obertalnoho rukhu na yikh kharakterystyky* [Study of the Influence of Changing the Parameters of Brushless Magnetolectric Motors of the Return-Rotary Motion on Their Characteristics.] *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy – Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 62, 25–33. <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.025>.
7. Collins, D. (2018, June 6). External rotor motor basics: Design and applications. *Motion Control Tips*. <https://www.motioncontroltips.com/external-rotor-motor-basics-design-applications>.
8. Farag, M. (2013, June 19). In-Wheel Brushless DC Outer Rotor (Hub) Motor Used in Electrically Driven Vehicles. *Transportation & Automotive*. <https://contest.techbriefs.com/2013/entries/transportation-and-automotive/3517>.
9. Shynkarenko, V.F. (2002). *Osnovy teorii evoliutsii elektromekhanichnykh system* [Fundamentals of the Theory of Evolution of Electromechanical Systems]. Naukova Dumka.
10. Kozigrodsky, V.A., Shynkarenko, V.F. (Scientific supervisor). (2024). *Pryntsyp prostorovoi inversii v strukturnii orhanizatsii i evoliutsii elektrychnykh mashyn* [The principle of spatial inversion in the structural organization and evolution of electric machines] [Master's thesis. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute].
11. Urmantsev, Iu.A. (1974). *Simmetriia prirody i priroda simmetrii* [Symmetry of Nature and the Nature of Symmetry]. Mysl.
12. Musiienko, Yu.A., Horbachuk, I.T. (2001). *Pryntsypy symetrii ta yikh zviazok z zakonamy zberezhenia u fizytsi* [Principles of symmetry and their connection with the laws of conservation in physics]. *Naukovi zapysky: zbirnyk naukovykh statei Natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni M. P. Drahomanova – Scientific Notes: Collection of Scientific Articles of the National Pedagogical University named after M. P. Drahomanov*, 43, 95–100. <http://enpuir.npu.edu.ua/handle/123456789/16152>.
13. Shynkarenko, V., Kotliarova, V. (2017). Twin-objects and Double-objects in the Structural Evolution of Electromechanical Energy Converters. In *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)* (pp. 116–119). <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248865>.
14. Li, X., Palazzolo, A. (2022). A review of flywheel energy storage systems: State of the art and opportunities. *Journal of Energy Storage*, 46, 103576. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103576>.
15. Zheludev, I.S. (1987). *Fizika kristallov i simmetriia* [Physics of crystals and symmetry]. Nauka.
16. Shynkarenko, V., Makki, A., Kotliarova, V., Shymanska, A., Krasovskyi, P. (2020). Genetic Organization and Evolution of Electromechanical Objects with Adaptive Geometry of Active Zone. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. Special Issue on Multidisciplinary Innovation in Engineering Science & Technology*, 5(5), 512–525. <https://doi.org/10.25046/aj050564>.
17. Fridkin, P. A. (1945). *Novyi tip dugovogo statora dlia elektroprivoda s malymi i reguliruemymi skorostiami vrashcheniia* [A new type of arc stator for an electric drive with low and adjustable speeds of rotation]. *Elektrichestvo – Electricity*, 1(2), 22–23.
18. Shynkarenko, V., Kotlyarova, V., Monakhov, E., Krasovsky, P. (2022). *Strukturni mutatsii v adaptivnii evoliutsii elektromekhanichnykh peretvoriuvachiv enerhii* [Structural mutations in adaptive evolution of electromechanical energy converters]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, 2(28), 111-126. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2\(28\)-111-126](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2(28)-111-126).
19. Ebeling, V., Engel, A., Faistel, R. (2001). *Fizika protsessov evoliutcii. Sinergeticheskii podkhod* [Physics of evolution processes. Synergetic approach]. Editorial URSS.
20. Prat-Camps, J., Maurer, P., Kirchmair, G., Romero-Isart, O. (2018). Circumventing magneto-static reciprocity: A diode for magnetic fields. *Physical Review Letters*, 121(21), 213903. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.213903>.

21. Ding, Y., Peng, Y., Zhu, Y., Fan, X., Yang, J., Liang, B., et al. (2019). Experimental demonstration of acoustic Chern insulators. *Physical Review Letters*, 122(1), 014302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.014302>.

Отримано 03.03.2025

UDC 621.313

Vasyl Shynkarenko¹, Anna Shymanska², Viktoriia Kotliarova³

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Electromechanics
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: svf1102@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5054-823X>

ResearcherID: [AAK-3777-2020](https://orcid.org/0000-0002-5054-823X). SCOPUS Author ID: 7005550726

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electromechanics
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: shym.anna@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2481-0908>

ResearcherID: [ABB-9534-2020](https://orcid.org/0000-0003-2481-0908). SCOPUS Author ID: 57202580817

³Senior Lecturer at the Department of Electromechanics
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: sharik_2004@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4182-4175>

ResearcherID: [AAK-3782-2020](https://orcid.org/0000-0002-4182-4175). SCOPUS Author ID: 57202578038

THE INVERSION PRINCIPLE IN THE STRUCTURAL ORGANIZATION AND EVOLUTION OF ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTERS

The fundamental nature of the inversion principle, which is the subject of interdisciplinary research, is analyzed. Attention is focused on the need for systematic analysis of types and manifestations of inversion in the structural organization and functioning of electromechanical objects. Based on the results of the analysis of genetic programs of the structure formation and the setting of evolutionary experiments, the structure of the main types of inversion is determined, and their classification is proposed. For the first time, genetic nature and features of manifestation of topological inversion at the chromosomal level are analyzed. It is shown that the area of existence of arbitrary types of inversion is determined by their macrogenetic programs. The genetic nature of invariant information connections of chromosomal, electromagnetic, spatial, dynamic inversions and their combinatorial variants, with the periodic structure of the genetic classification (generative system) of primary sources of the electromagnetic field, is analyzed. Specific examples show that each type of inversion determines principles of structure formation and structural evolution of the corresponding functional classes of electromechanical objects. The structural potential of inverted types-twins, which is considered as the potential source of the structure formation and technical innovations, is analyzed. The conditions for violation of the inversion of energy types in individual functional classes of electromechanical systems for technological purposes are considered.

Keywords: electromechanical objects; principle of inversion; types of inversion; generative system; electromagnetic chromosome; genetic code; genetic prediction; innovative synthesis; technical evolution.

Fig.:13. References: 21.