

М.М. Заблодський, Р.М. Чуєнко, С.І. Ковальчук, Г.В. Кругляк, О.І. Ковальчук

## Внутрішня ємнісна компенсація реактивної потужності шнекового електромеханічного перетворювача

**Вступ.** Особливу категорію серед асинхронних машин з масивним ротором займає клас поліфункціональних електромеханічних перетворювачів енергії, які інтегровані з ланками технологічних процесів. **Проблема.** Обмін реактивною енергією між джерелом і електромеханічним перетворювачем в періоди роботи з низьким навантаженням приводить до суттєвого зниження його ефективності і коефіцієнта потужності. З використанням нелінійних навантажень і урахуванням можливого резонансу покращити коефіцієнт потужності встановленням батарей конденсаторів стало складніше. **Мета.** Підвищення енергетичних показників шнекового електромеханічного перетворювача шляхом внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності. **Методологія.** Порівняльний аналіз схем з'єднання і просторового розташування обмоток статора при застосуванні внутрішньої ємнісної компенсації. Моделювання та експериментальні дослідження електромагнітних і електромеханічних характеристик шнекового електромеханічного перетворювача. **Результати.** Встановлено розподіл електромагнітних величин і обґрунтовано вибір кута просторового зміщення основної і додаткової обмоток фаз статора модифікованого перетворювача, які забезпечують збільшення електромагнітного моменту та коефіцієнта потужності. Наведено результати експериментальних досліджень шнекового електромеханічного перетворювача. **Оригінальність.** Вперше для поліфункціональних електромеханічних перетворювачів технологічного призначення запропоновано метод внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності. **Практичне значення.** Використання запропонованого методу просторового зміщення основної і додаткової обмоток статора та внутрішньої ємнісної компенсації забезпечить підвищення енергетичних показників шнекового електромеханічного перетворювача. Бібл. 23, табл. 3, рис. 15.

**Ключові слова:** рівняння Максвелла, поліфункціональний електромеханічний перетворювач, обмотка статора, метод скінчених елементів, ємність конденсатора.

**Вступ.** Домінуючу частину електродвигунів, що застосовані у промисловості, складають трифазні асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором. Однак в найбільш розповсюджених на практиці АД потужністю до 11 кВт коефіцієнт корисної дії (ККД) та коефіцієнт потужності  $\cos\phi$  вельми низькі і складають 0,7-0,9. Обмін реактивною енергією між джерелом і споживачем призводить до появи у системі окрім активного струму додаткового, непродуктивного реактивного струму, перевантаженню усіх елементів електричної системи, включаючи джерело, споживача та лінію електропередачі. Крім того, в періоди роботи з низьким навантаженням необхідно враховувати фактор суттєвого зниження ефективності і коефіцієнта потужності двигунів. Таким чином, приводи змінної частоти для АД потребують механізмів щонайменше внутрішньої буферизації енергії для реактивної потужності на мережевій частоті для корекції коефіцієнта потужності та організації ефективного керування [1, 2]. Традиційний підхід до корекції коефіцієнта потужності в промисловому застосуванні передбачає встановлення батарей конденсаторів з мікроконтролерами для перемикання синхронних конденсаторів [3]. Використання компенсації паралельного конденсатора під час увімкнення та розбігу є ефективним у зменшенні перехідного струму у великих асинхронних двигунах [4]. Але з широким використанням нелінійних навантажень, таких як приводи зі змінною швидкістю, покращити коефіцієнт потужності стало складніше. Проблема резонансу виникає через індуктивність системи живлення та компенсаційні конденсатори, що збільшує гармонічні спотворення. В [5] запропоновано нову методику демпфування гармонійних резонансів у системі електропостачання. Основна особливість цієї методики полягає в тому, що схема активної статичної компенсації може одночасно працювати як інжектор гармонік, коректор коефіцієнта потужності та елімінатор резонансу. Але запропонована модель розроблена тільки для однофазної

системи і повинна бути розширена для трифазної системи з різними лінійними та нелінійними навантаженнями.

Поширення є використанням автоматичної зміни з'єднання обмотки статора в двигунах зі змінним навантаженням. В [6] запропонована концепція багатопотокового двигуна з різними можливими з'єднаннями обмоток, які дозволяють регулювати потік намагнічування на шести різних рівнях. При цьому ефективність і коефіцієнт потужності двигунів можуть бути значно покращені при низькому навантаженні. У порівнянні з потенціалом економії за відповідних навантажень, додаткова вартість такого двигуна не є високою, але вартість обладнання для автоматичної зміни підключення (контрольний пристрій і контактори) може бути значною.

В [7] розглянуті багатокаскадні асинхронні двигуни, які механічно з'єднані у формі каскаду з однаковою потужністю. Крім того, для порівняння результатів розглядається один асинхронний двигун (SIM), потужність якого є сумою потужностей усіх мультикаскадних асинхронних двигунів (МСІМ). Досліджено вплив напруги балансу та незбалансованої частоти на найвищий і стабільний крутний момент, коефіцієнт потужності, активну та реактивну вхідну потужність, втрати. Результати демонструють найвищий крутний момент МСІМ порівняно з SIM. Крім того, втрати міді зменшуються, коли МСІМ використовується замість SIM. В результаті процедура перетворення енергії значно вдосконалена.

**Постановка задачі.** Особливу категорію асинхронних машин складають електродвигуни з масивним (суцільним) ротором з феромагнітної сталі, які завдяки жорсткій конструкції та цілісності можуть працювати з найвищими необхідними швидкостями обертання. Ще однією корисною властивістю цих машин є їх здатність працювати в агресивних середовищах і середовищах з високою вологістю. Недоліком такої

конструкції є відносно низький коефіцієнт потужності порівняно з машинами з короткозамкненою кліткою або постійними магнітами [8]. Разом з тим, на сьогодні формується перспективний клас поліфункціональних електромеханічних перетворювачів енергії, в яких передбачена конструктивна і функціональна інтеграція з ланками технологічних процесів. При цьому всі види дисипативної складової енергії електромеханічних перетворювачів використовуються в технологічному процесі, зокрема, для переробки сировинних матеріалів. Зовнішній масивний ротор, наприклад, шнекового електромеханічного перетворювача (ШЕМП), суміщений з виконавчим органом – шнеком, безпосередньо контактує з навантажувально-охолоджуючим середовищем і здатен формувати мультифізичні процеси обробки сировинних матеріалів [9]. Для підвищення коефіцієнта потужності ШЕМП потрібен засіб компенсації реактивної потужності. У цій статті пропонується метод, який усуває більшість недоліків, зазначених вище.

**Метою роботи** є підвищення енергетичних показників шнекового електромеханічного перетворювача шляхом внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У практиці досліджень параметрів і характеристик електромеханічних перетворювачів широко використовуються методи чисельно-польових розрахунків, еквівалентних схем, що значно підвищує точність результатів аналізу реконфігурації обмоток і магнітних систем.

У роботі [10] запропонована методика розрахунку активних і реактивних параметрів обмоток, механічної характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором на основі чисельно-польового підходу, яка не потребує умовних поправних коефіцієнтів і довідникових графічних функцій. Виявлено збільшення магнітних провідностей завдяки більш природній структурі силових ліній магнітного поля у верхніх частинах пазів, у той час коли класична методика априорі базується на занадто спрощеній структурі силових ліній.

Робота [11] спрямована на огляд та аналіз різних методів, які застосовуються для визначення параметрів еквівалентної схеми і перехідних характеристик трифазного асинхронного двигуна за різних умов. У [12] запропонована точна процедура розрахунку втрат у залізного осердя, яка використовується в моделі еквівалентної схеми асинхронної машини для покращення розрахунків продуктивності машини. Важливим фактором у процедурі розрахунку є урахування поверхневого ефекту та магнітного насичення, а також впливу зміни температури залізного осердя на втрати в ньому.

Авторами роботи [13] досліджено вплив кутового зсуву в схемі розташування обмоток для подвійної трифазної обмотки статора асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором з наголосом на зв'язки фазного потоку, швидкісних характеристик та характеристик крутного моменту.

За останні роки велика кількість досліджень сконцентрована на методах підвищення показників енергоефективності асинхронних двигунів з зовнішнім ротором із розщепленою фазною обмоткою, що працюють з високим ковзанням. В роботі [14] пропонується аналітична модель на основі магнітної еквівале-

нтної схеми для оцінки продуктивності асинхронних двигунів з короткозамкненим зовнішнім ротором, які широко використовуються у стельових вентиляторах, насосах і приводах коліс. Крім того, за допомогою запропонованої моделі розраховуються втрати міді в обмотках і втрати заліза в осерді. Результати представлені моделі порівнюються з результатами змінного в часі аналізу кінцевих елементів, а експериментальні вимірювання тісно збігаються між результатами підтверджують успіх запропонованої моделі з точки зору точності. Питання неточності в методі еквівалентної схеми для застосування в двигунах з малою потужністю для геометрії зовнішнього ротора обговорюються в [15] з експериментальною перевіркою з використанням різних підходів до еквівалентної схеми.

В роботі [16] представлено новий шестифазний асинхронний двигун із зовнішнім ротором, оснащений псевдоконцентрованими обмотками. Досліджено кілька аспектів запропонованої конструкції двигуна, таких як алгоритм проектування та аналітичне моделювання на основі модифікованої функції намотування з урахуванням ефекту перекоосу. Також визначена відповідна задача оптимізації для максимізації коефіцієнта потужності та ефективності і мінімізації пульсації вихідного крутного моменту.

Трифазні асинхронні двигуни малої та середньої потужності є найбільш домінуючими в промисловому секторі, забезпечуючи широкий вибір постійних і змінних швидкостей та навантаження, де вимоги до динамічної реакції не є критичними, наприклад, насоси, вентилятори та компресори. Однак вони все ще обтяжені низьким коефіцієнтом потужності при часткових навантаженнях, який можна пом'якшити лише додавши конденсатори корекції коефіцієнта потужності. У [17] на відміну від приводів із змінною швидкістю, які мають керування крутним моментом або швидкістю і використовують стратегії широтно-імпульсної модуляції [5-7], запропоновано подолати типові недоліки звичайних асинхронних двигунів, головним чином низьку ефективність і коефіцієнт потужності, шляхом використання менш вартісного часткового перетворювача потужності. Згідно з підходом [17], використовується спеціальна індукційна машина, що включає основну обмотку, підключену до мережі, і допоміжну трифазну обмотку з меншою кількістю витків, розташовану в тих самих пазах статора, що й основна. Допоміжна обмотка живиться від інвертора напруги з плаваючим конденсатором шини постійного струму. Реалізується стратегія ефективного керування коефіцієнтом потужності, пом'якшення шкідливих впливів, пов'язаних із спотвореною напругою основної мережі та механічними вібраціями крутного моменту, а також зменшення великого пускового струму, викликаного асинхронним двигуном під час періоду запуску. Спочатку запропонована методика представлена теоретично, потім оцінка здійсненності виконується шляхом моделювання.

Для високошвидкісних асинхронних машин з суцільним ротором, які мають високі втрати на вихрові струми, відоме використання двошарової асиметричної обмотки з коротким кроком і збірними котушками. Однак асиметрична обмотка також вносить деякий дисбаланс струму через трифазну асиметричну

індуктивність статора. Поточний дисбаланс може мати шкідливі наслідки як для машини, так і для джерела живлення, наприклад, пульсації крутного моменту, незбалансоване магнітне тяжіння та теплове навантаження мережі живлення та силової електроніки. Щоб пом'якшити поточний дисбаланс, в [18] пропонується удосконалення методу, яке полягає в невеликому збільшенні висоти паза статора і розміщенні сторін котушки вгору або вниз в межах висоти паза для різних фаз. На основі двовимірного методу кінцевих елементів висота паза статора оптимізована з точки зору пом'якшення поточного дисбалансу. Використовуючи результат оптимізації далі переходять до додаткового регулювання положення котушки для конкретної фази. На відміну від звичайних методів пом'якшення дисбалансу струму силовою електронікою, запропонований метод пригнічує дисбаланс струму виключно шляхом коригування конструкції машини, що дозволяє уникнути додаткових інвестицій для пристроїв силової електроніки.

Отже, розглянуті вище методи зменшення втрат на вихрові струми для машин з суцільним ротором пов'язані з виникненням поточного дисбалансу та додатковими ускладненнями пристроїв силової електроніки. Але для ШЕМП, враховуючи коло їх функціональних завдань [9, 19], проблема зменшення втрат на вихрові струми в роторі не є критичною за виключенням ефективного керування коефіцієнтом потужності.

**Порівняльний аналіз схем з'єднання і просторового розташування обмоток статора базового і модифікованого варіантів ШЕМП.** ШЕМП представлено на рис. 1, де зображена його електромагнітна система та розрахункова схема для моделювання.

У якості статорів базового варіанту використана рухома частина кранового двигуна МТФ-011-6 з номінальною потужністю  $P_n = 1,4$  кВт, схемою з'єднання

фаз – зірка, число полюсів  $2p = 6$ , вид обмотки – одношарова концентрична.

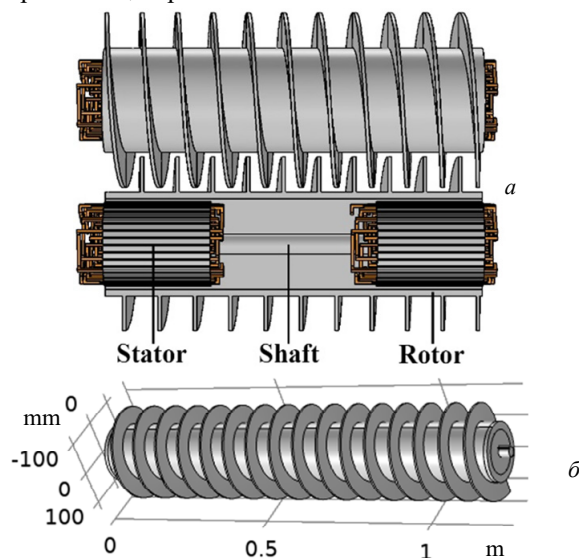


Рис. 1. ШЕМП: електромагнітна система (а); розрахункова схема (б)

Для підвищення обертового електромагнітного моменту модифікованого пристрою пропонується використати внутрішню ємнісну компенсацію реактивної потужності [20]. У статорі базового ШЕМП застосовано одношарову концентричну обмотку із повним кроком (рис. 2,а), що має одну паралельну вітку ( $a = 1$ ). При цьому кількість котушок у котушкській групі становить 2. У модифікованому ШЕМП застосовується обмотка із двома паралельними вітками  $a = 2$ , у такому випадку кількість котушок у котушкській групі зменшується до одної, а кількість котушкських груп збільшується вдвічі (рис. 2,б).

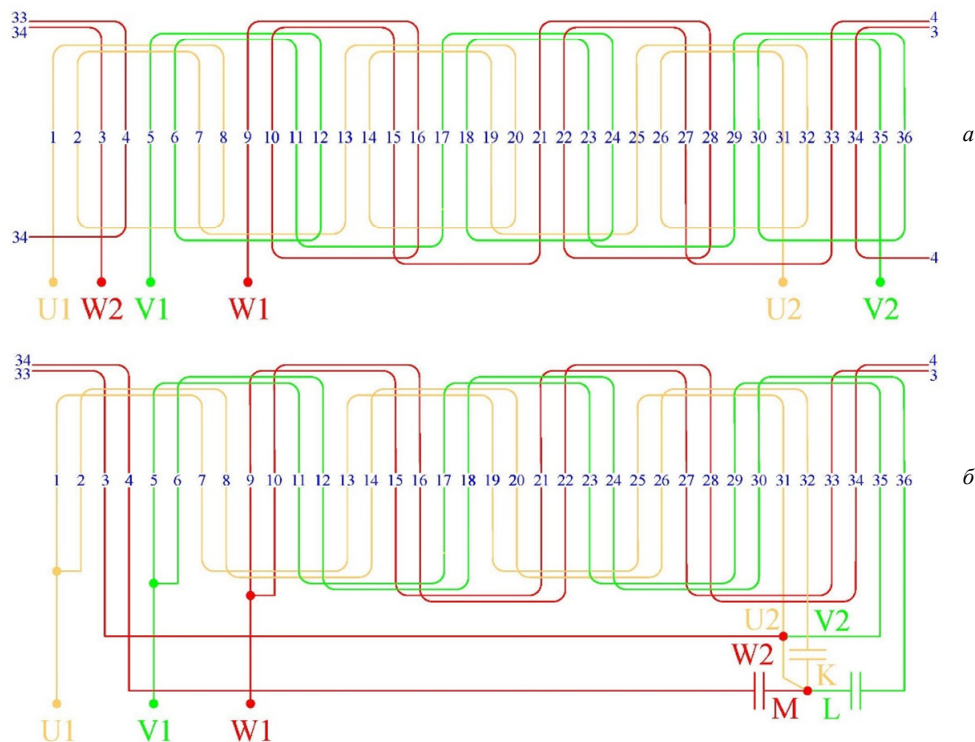


Рис. 2. Розгорнуті електричні схеми обмоток статора базового (а) та модифікованого (б) ШЕМП

Одна з паралельних віток утворює так звану основну або робочу обмотку, яка приєднується до мережі живлення. Інша паралельна вітка, зміщена у пазах осердя на  $30^\circ$  відносно основної обмотки, утворює додаткову обмотку, що вмикається за схемою поворотного автотрансформатора на електричну ємність (рис. 3,а).

Застосування внутрішньої ємнісної компенсації модифікованого ШЕМП за широкого діапазону зміни кута просторового зміщення основної і додаткової обмоток та компенсувальних ємностей дозволяє змінювати значення і фазу струмів, магніторушійних сил та інших електричних величин. Як наслідок з'являється можливість для підвищення енергетичної ефективності та обертового моменту модифікованого ШЕМП. На відміну від базового ШЕМП, де струм єдиної обмотки статора має активно-індуктивний характер як у пусковому, так і в робочому режимах роботи, обмотка статора модифікованого ШЕМП має дві робочі вітки. Струм основної обмотки  $I_1$  зберігає активно-індуктивний характер, а струм додаткової обмотки  $I_\Delta$  із послідовно увімкненим конденсатором набуває ємнісно-активного характеру (рис. 3,б).

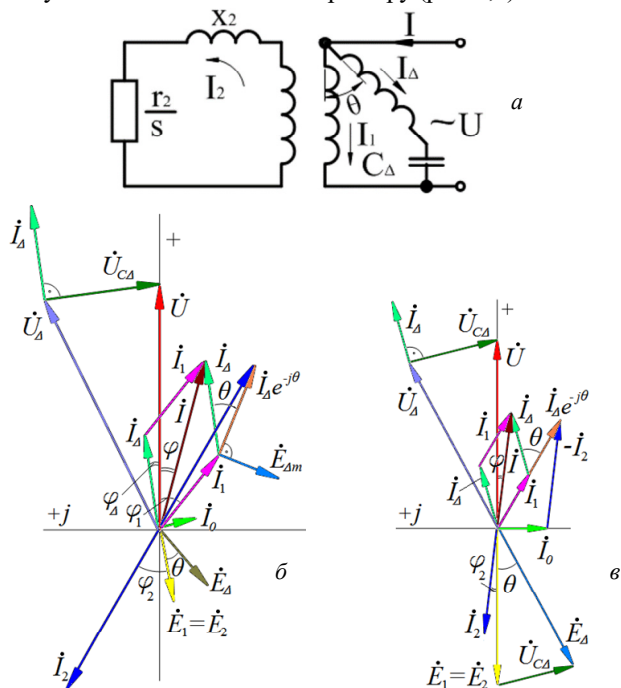


Рис. 3. Принципова електрична схема фази (а) та векторна діаграма під час пуску (б) та за номінального навантаження (в) модифікованого ШЕМП

Струм  $I_\Delta$  залежить не лише від напруги живлення та параметрів машини, а й від ємності конденсатора  $C_\Delta$ . Струм  $I_\Delta e^{-j\theta}$ , як зведений до осі основної фазної обмотки статора, бере участь у створенні струму намагнічування пристрою  $I_0 = I_1 + I_\Delta e^{-j\theta} + I_2$  та створює додаткову ЕРС  $\dot{E}_{\Delta m} = -jx_m I_\Delta e^{-j\theta}$ . ЕРС  $\dot{E}_{\Delta m}$ , індукована просторово зміщеним струмом додаткової обмотки  $I_\Delta$ , збільшує основні ЕРС статора і ротора. Збільшення ЕРС ротора за його незмінних активного та індуктивного опорів зумовлює збільшення пускового струму ротора, а, отже, і пускового моменту модифікованого ШЕМП. Під дією підвищеного пускового моменту прискорюється процес розгону пристрою і

він виходить на жорсткішу механічну характеристику у робочому режимі порівняно із базовим ШЕМП. Векторна діаграма модифікованого ШЕМП за номінального навантаження наведена на рис. 3,в.

Кут просторового зміщення основної і додаткової обмоток фаз статора модифікованого ШЕМП у  $30^\circ$  обрано з огляду на те, що саме за такого кута забезпечується збільшення на 20-30 % пускового моменту за незмінного у порівнянні із базовим пристроєм пусковим струмом. Врахована також технологічна простота виконання обмоток статора модифікованого ШЕМП шляхом поділу на дві рівні частини фазної зони  $60^\circ$  обмотки базового пристрою [20].

**Вихідні умови моделювання електромагнітних і електромеханічних характеристик ШЕМП.** Моделювання здійснювалось для ШЕМП з такими параметрами: довжина осердя статора  $L_s = 90$  мм; довжина відповідної ділянки спільного зовнішнього ротора  $L_r = 300$  мм; частота струму  $f_0 = 50$  Гц; кутова швидкість  $\omega_0 = 2\pi f_0$ , рад/с; об'ємна густина сталі ротора  $\rho_{st} = 7850$  кг/м<sup>3</sup>; амплітудне значення струму  $I_0 = 13\sqrt{2}$  А;  $t$  – параметр часу.

Змінні базового пристрою: струм фази  $U$   $I_U = I_0 \sin(\omega_0 t)$  А; струм фази  $W$   $I_W = I_0 \sin(\omega_0 t + 120^\circ)$  А; струм фази  $V$   $I_V = I_0 \sin(\omega_0 t - 120^\circ)$  А.

Змінні модифікованого пристрою: струм фази  $U$   $I_U = I_0 \sin(\omega_0 t)$  А; струм фази  $W$   $I_W = I_0 \sin(\omega_0 t + 120^\circ)$  А; струм фази  $V$   $I_V = I_0 \sin(\omega_0 t - 120^\circ)$  А; струм фази  $K$   $I_K = I_0 \sin(\omega_0 t + 30^\circ)$  А; струм фази  $M$   $I_M = I_0 \sin(\omega_0 t + 150^\circ)$  А; струм фази  $L$   $I_L = I_0 \sin(\omega_0 t - 90^\circ)$  А.

Топологія обмоток статора базового і модифікованого варіантів ШЕМП показана на рис. 4.

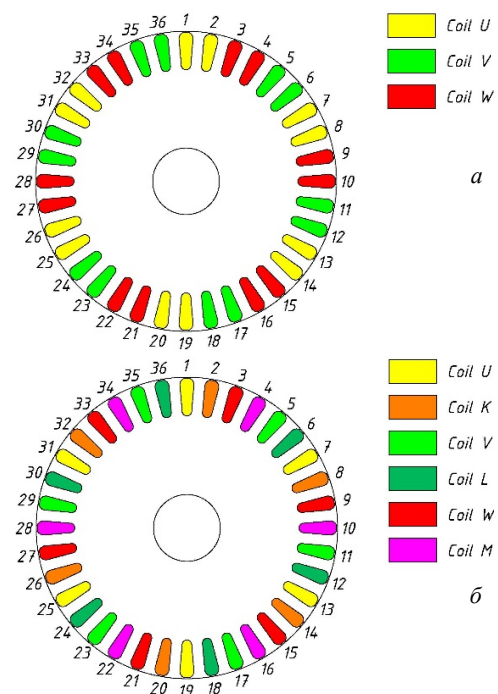


Рис. 4. Топологія обмоток статора ШЕМП: базового варіанта (а); модифікованого варіанта (б)

Характеристики модифікованого пристрою як у пусковому, так і робочому режимах залежать від ємності конденсатора, увімкненого послідовно із додатковою обмоткою. Оскільки при цьому змінюються стру-

ми основної та додаткової обмоток, фаза струму додаткової обмотки, а також втрати в двигуні, доцільно обирати таку ємність конденсатора у колі додаткової обмотки, яка забезпечує однакові струми у основній та додатковій обмотках фаз статора пристрою. Для забезпечення такого режиму роботи модифікованого пристрою ємність конденсатора становить 25 мкФ на 1 кВт номінальної потужності.

Моделювання виконано в програмному середовищі Comsol Multiphysics [21] відповідно до розрахункової схеми (рис. 1,б). Зважаючи на ідентичність електромагнітних, електромеханічних, теплових і вібраційних процесів, які відбуваються на модулях «статор-відповідна ділянка спільного ротора» електромагнітної системи ШЕМП, моделювання здійснено для одного з них. При наявності відмінностей параметрів або геометричних розмірів, моделювання проводиться окремо для кожного статора. Чисельний аналіз електромагнітного поля проводиться з використанням математичної моделі двогвинтового електромеханічного гідролізатора [22]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (1)$$

де  $\mathbf{H}$  – вектор напруженості магнітного поля, А/м;  $\mathbf{J}$  – вектор густини струму, А/м<sup>2</sup>;

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad (2)$$

де  $\mathbf{B}$  – вектор індукції магнітного поля, Тл;  $\mathbf{A}$  – векторний магнітний потенціал, Вб/м;

$$\mathbf{E} = -\partial \mathbf{A} / \partial t, \quad (3)$$

де  $\mathbf{E}$  – вектор напруженості електричного поля, В/м;

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (4)$$

де  $\sigma$  – питома електропровідність, См/м.

Формулювання скалярного потенціалу виконано згідно рівняння:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (5)$$

На зовнішній межі з магнітним скалярним потенціалом, нормальна складова індукції магнітного поля прирівнюється до нуля:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (6)$$

Намагніченість феромагнітного ротора задана як  $B-H$  крива і визначається з рівняння:

$$B = f(H) \frac{H}{|H|}. \quad (7)$$

Як джерело струму в моделі використовуються багатовиткові обмотки статора (рис. 2, 3) Обмотки забезпечують густину струму в напрямку провідників  $J_e$  згідно з рівнянням:

$$J_e = \frac{N \cdot I_{coil}}{A} \cdot e_{coil}, \quad (8)$$

де  $N$  – кількість витків в обмотці;  $A$  – загальний переріз, площа підобласті обмотки, м<sup>2</sup>;  $I_{coil}$  – струм, А;  $e_{coil}$  – векторна змінна, для візуалізації напрямку витків в обмотці.

Моделювання теплових параметрів виконано шляхом об'єднання фізик магнітних полів, теплопередачі в твердих тілах та електромагнітного нагріву в частотно-перехідній області дослідження. Математична модель теплообміну наведена у найбільш загальному вигляді, початкова температура 293 К. Теплообмін згідно закону Фур'є в диференціальній формі, що містить джерело тепла описується наступним рівнянням [23]:

$$d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = d_z Q + q_0 + d_z Q_{ted}, \quad (9)$$

де  $d_z$  – товщина підобласті в неплюському напрямку, м;  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – питома теплоємність при постійному тиску, Дж/(кг·К);  $T$  – температура, К;  $t$  – час, с;  $\mathbf{u}$  – вектор швидкості, м/с;  $q$  – тепловий потік, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q$  – джерело тепла, Вт/м<sup>3</sup>;  $q_0$  – зовнішній тепловий потік, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q_{ted}$  – термопружне демпфування, Вт/м<sup>3</sup>;

$$\mathbf{q} = -d_z k \nabla T, \quad (10)$$

де  $k$  – теплопровідність, Вт/(м·К).

На зовнішніх межах моделі застосовано теплоізоляцію [23]:

$$-n \cdot \mathbf{q} = 0, \quad (11)$$

де  $n$  – показник заломлення.

Тепловий потік з поверхонь визначається як [23]:

$$-n \cdot \mathbf{q} = d_z q_0, \quad (12)$$

$$q_0 = h \cdot (T_{ext} - T) \quad (13)$$

де  $h$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{ext}$  – температура оточуючого середовища, К.

Випромінювання від поверхні моделі до навколишнього середовища визначається з рівняння [23]:

$$-n \cdot \mathbf{q} = d_z \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4), \quad (14)$$

де  $\varepsilon$  – випромінювальна здатність поверхні;  $\sigma$  – постійна Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_{amb}$  – температура навколишнього середовища, К.

Електромагнітний нагрів визначається з рівнянь [23]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_e, \quad (15)$$

де  $Q_e$  – електромагнітне джерело тепла, Вт/м<sup>3</sup>:

$$Q_e = Q_{rh} + Q_{mi}, \quad (16)$$

де  $Q_{rh}$  – резистивні втрати, Вт/м<sup>3</sup>;  $Q_{mi}$  – магнітні втрати, Вт/м<sup>3</sup>:

$$Q_{rh} = 0,5 \cdot \text{Re}(\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}^*); \quad (17)$$

$$Q_{mi} = 0,5 \cdot \text{Re}(j \omega \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}^*); \quad (18)$$

де  $\mathbf{E}^*$  – вектор напруженості електричного поля за заданої частоти в певний момент часу, В/м;  $\mathbf{H}^*$  – вектор напруженості магнітного поля за заданої частоти в певний момент часу, А/м.

**Результати моделювання та дискусія.** Основна частина характеристик за результатами моделювання базового та модифікованого ШЕМП представлена в площині його поперечного перерізу. На рис. 5 представлено розподіл  $z$ -компоненти густини струму. Суттєва відмінність в розподілах густини струмів відмічається для пазових зон статора. Для модифікованого варіанта ШЕМП кількість пазів з близькою до нульового значення густиною струму удвічі менша у порівнянні з базовим варіантом. В роторі модифікованого варіанта ШЕМП на глибині проникнення електромагнітної хвилі спостерігаються 6 ділянок (по кількості полюсів) з значеннями густини струму, які на 15 % перевищують густину струмів на відповідних ділянках базового варіанта ШЕМП.

На рис. 6 показано розподіл об'ємної густини електричної енергії. Порівняння зображень вказує на те, що об'ємна густина електричної енергії статора модифікованого ШЕМП перевищує у середньому на 19 % густину електричної енергії статора базового ШЕМП. Оскільки поняття «енергія» відповідно до фізичних основ рівнозначно поняттю «робота», то мова йде про концентрацію і потенціал активної енергії в статорі.

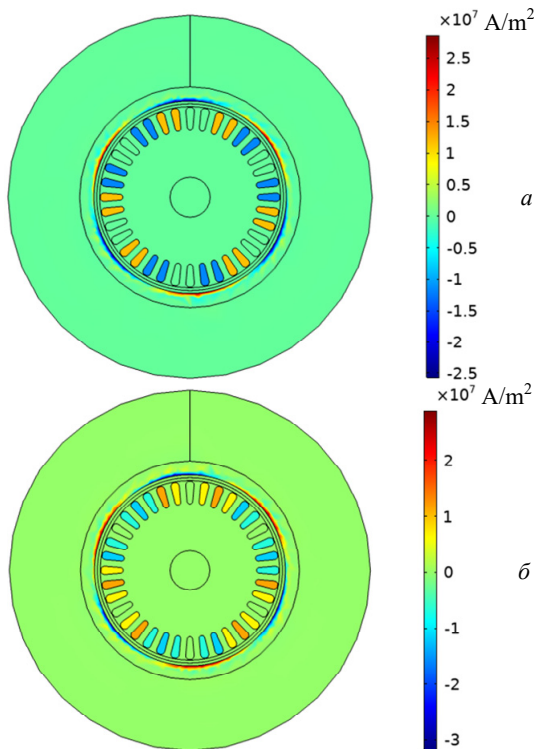


Рис. 5. Густина струму ( $z$ -компонента) базового (а) та модифікованого (б) ШЕМП

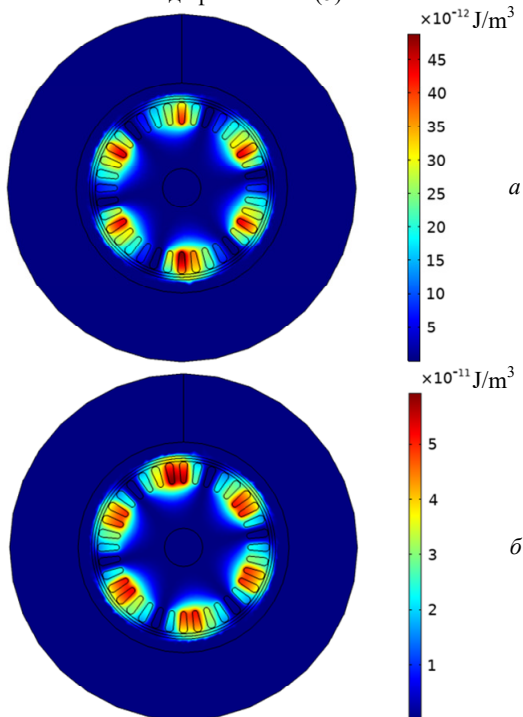


Рис. 6. Об'ємна густина електричної енергії базового (а) та модифікованого (б) ШЕМП

На рис. 7 наведено часову залежність електромагнітного моменту двох досліджуваних варіантів. Для модифікованого ШЕМП (рис. 7,б) отримано значне (в 1,5 рази) зростання значення та зменшення екстремальних пульсацій електромагнітного моменту.

На рис. 8, 9 представлено часову залежність та фазовий кут струмів одного модуля ШЕМП. У модифікованому ШЕМП завдяки використанню внутрішньої ємнісної компенсації з'являється можливість змінювати значення та фазу струму додаткової обмотки статора.

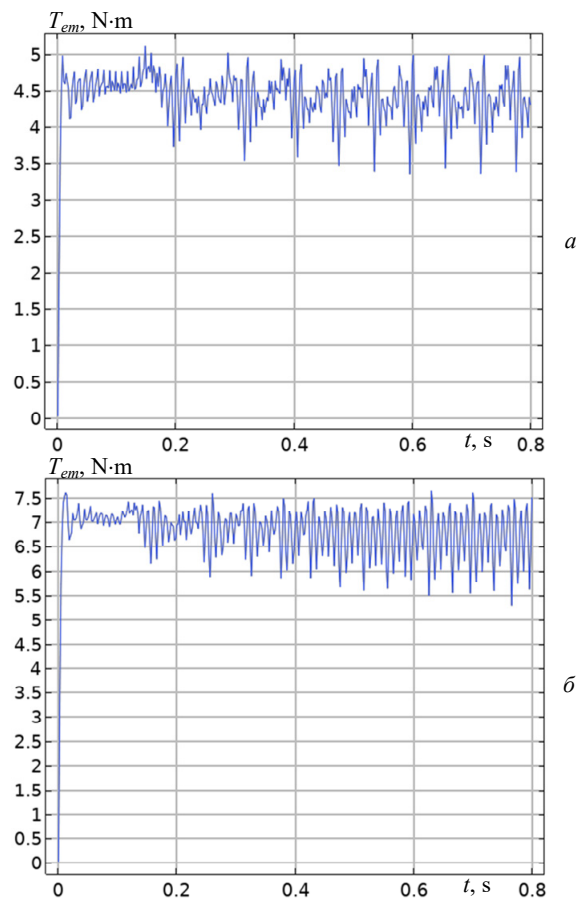


Рис. 7. Електромагнітний момент базового (а) та модифікованого (б) ШЕМП

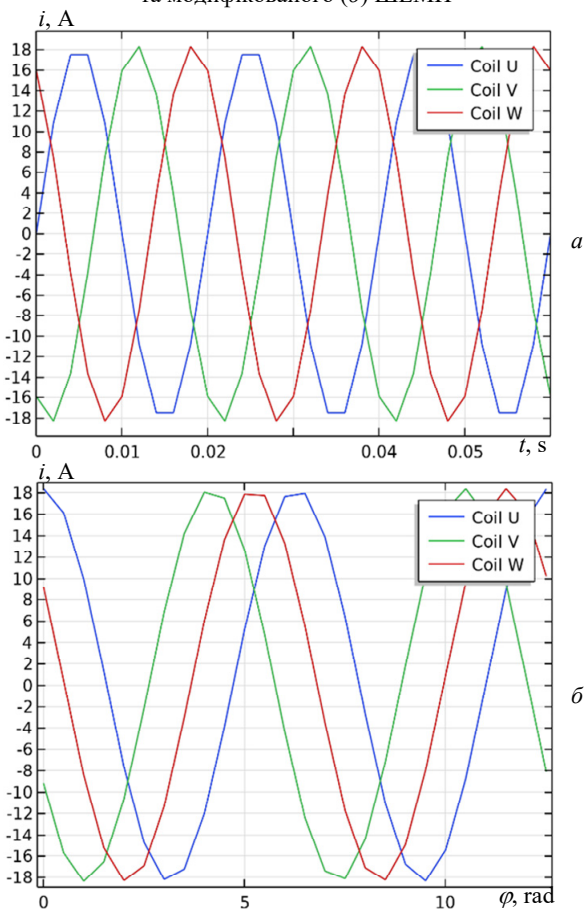


Рис. 8. Часова залежність (а) та фазовий кут (б) струмів одного модуля базового ШЕМП

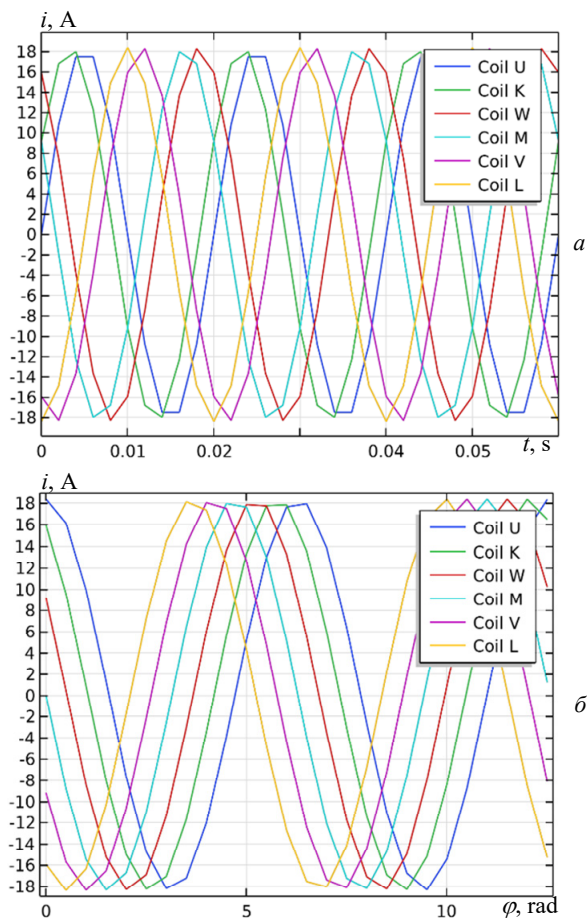


Рис. 9. Часова залежність (а) та фазовий кут (б) струмів одного модуля модифікованого ШЕМП

Для підвищення обертового моменту модифікованого ШЕМП необхідно змістити за фазою струм додаткової обмотки відносно струму основної обмотки на  $30^\circ$ . Оскільки у модифікованому ШЕМП основна і додаткова обмотка зміщені між собою у просторі, то це призводить до збільшення зони дії створюваних у роторі вихрових струмів. Зокрема, кут сектора, який займають максимуми струмів, складає 2,3 радіана для базового та 2,8 радіана для модифікованого ШЕМП відповідно. Струмами (рис. 8,б) формується результуюча магніторухійна сила по колу повітряного проміжку, результатом дії якої є створення вихрових струмів у масиві ротора. Відповідна зона дії створюваних вихрових струмів у масиві ротора (рис. 5) займає ділянку навпроти 5,5 зубцевих поділок статора для базового та 6 зубцевих поділок для модифікованого ШЕМП. Отже, модифікований ШЕМП за значеннями густини струму, і за шириною зони їх дії перевищує варіант базового ШЕМП. Як результат впливу фазового зсуву ШЕМП демонструє найкращу продуктивність, кращий час встановлення швидкості та крутного моменту при запуску та навантаженні (рис. 7), що спостерігається також в індукційних машинах при розгляді конфігурації подвійної 3-фазної обмотки [13, 22].

На рис. 10 показаний розподіл індукції магнітного поля, X-Y компоненти базового та модифікованого ШЕМП. Відмічається суттєва різниця у розподілі густини магнітного потоку по X-Y компонентах для базового та модифікованого ШЕМП. Якщо для базового

варіанта спостерігаються практично однакові значення густини магнітного потоку по X-Y компонентах, наприклад, навпроти середини полюсів в межах миттєвого їх розташування, то для варіанта модифікованого ШЕМП різниця значень густини магнітного потоку по X-Y компонентах доволі суттєва. Крім того, для варіанта модифікованого ШЕМП відмічається більша ступінь відгалужування магнітного потоку у ярмі статора вбік порожнистого валу.

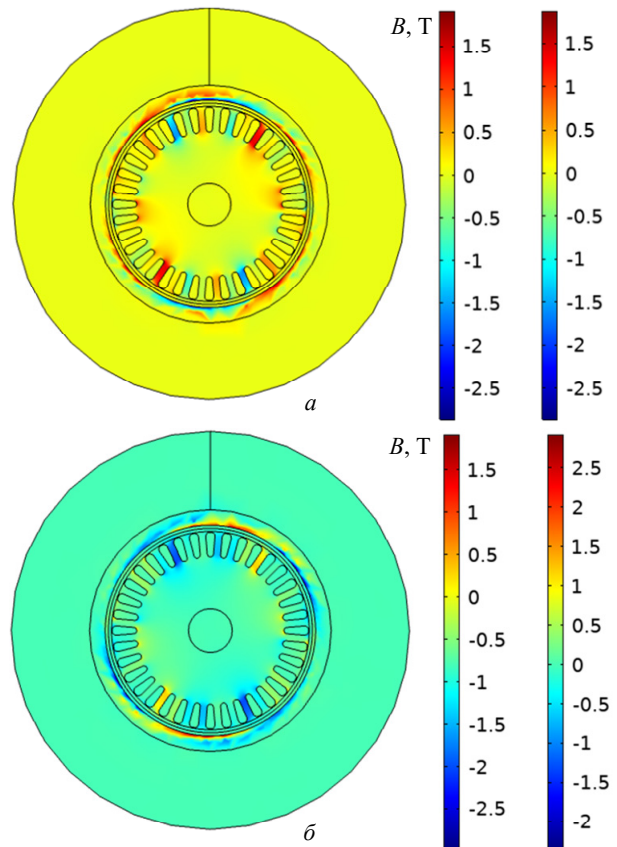


Рис. 10. Індукція магнітного поля (ліва легенда – X-компонента, права легенда – Y-компонента) базового (а) та модифікованого (б) ШЕМП

Це означає наявність меншого магнітного опору на шляху магнітного потоку для варіанта модифікованого ШЕМП і, відповідно, меншу реактивну потужність. В той же час реактивна потужність характеризує умови передачі активної потужності в кожен момент часу, а виходячи з рис. 6, об'ємна густина активної енергії статора модифікованого ШЕМП перевищує густину активної енергії статора базового ШЕМП, що опосередковано вказує на вище значення коефіцієнта потужності модифікованого ШЕМП. Підтвердженням цього положення є також порівняння розподілу намагніченості базового та модифікованого ШЕМП (рис. 11).

При однаковій намагніченості в масиві ротора ( $2,5 \cdot 10^6$  А/м) спостерігається перевищення на 23 % намагніченості магнітопроводу статора посередині полюсів в межах миттєвого їх розташування для базового ( $1,5 \cdot 10^6$  А/м) у порівнянні з модифікованим ШЕМП ( $1,0 \cdot 10^6$  А/м).

У табл. 1 представлені результати моделювання енергетичних характеристик базового та модифікованого ШЕМП.

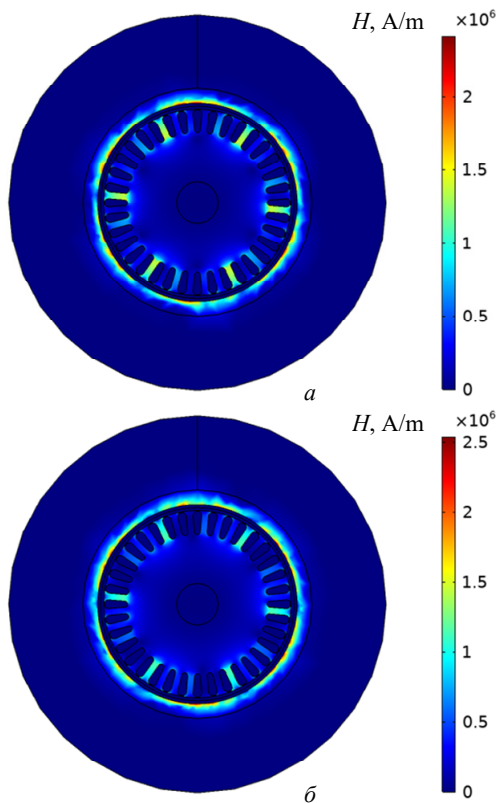


Рис. 11. Намагніченість базового (а) та модифікованого (б) ШЕМП

питься кількість теплоти, яка буде спрямована до оброблюваного матеріалу, тому термічний ККД модифікованого ШЕМП також збільшиться.

**Експериментальні дослідження макетного зразка ШЕМП.** Для перевірки результатів моделювання здійснено випробування макетного зразка базового (без внутрішньої ємнісної компенсації) варіанта двостаторного ШЕМП. Номінальні дані ШЕМП: споживана потужність  $P = 2078$  Вт; напруга живлення  $U = 80$  В; споживаний струм  $I = 30$  А; коефіцієнт потужності  $\cos\varphi = 0,5$ ; кількість полюсів – 6; частота обертання при узгодженому обертанні магнітних полів окремих модулів  $n = 450$  об/хв. На рис. 12 представлено вузли макетного зразка ШЕМП з визначенням зон вимірювання електромагнітних і температурних параметрів.

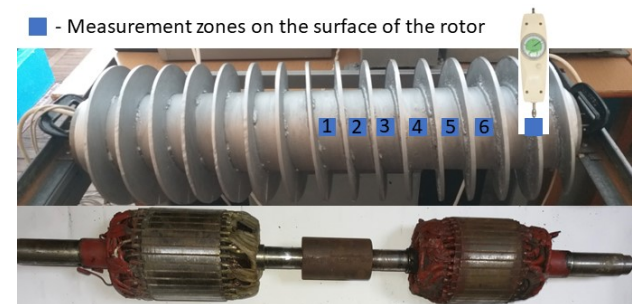


Рис. 12. Розподіл зон вимірювання електромагнітних, температурних і механічних параметрів на поверхні зовнішнього ротора макетного зразка ШЕМП

Таблиця 1  
Результати розрахунку характеристик базового та модифікованого ШЕМП

Показник	Базовий ШЕМП	Модифікований ШЕМП	Різниця
Споживана потужність, Вт	1080,70	1293,56	212,86
Корисна механічна потужність, Вт	103,62	148,60	44,98
Втрати в сталі, Вт	484,28	652,13	167,85
Втрати в міді, Вт	492,80	492,80	0
Частота обертання ротора, об/хв	180	200	20
Електромагнітний момент, Н·м	5,5	7,1	1,6
ККД по механічній потужності, %	9,58	11,44	1,86
Коефіцієнт потужності	0,59	0,71	0,12

Модифікований ШЕМП споживає з мережі живлення на 212,86 Вт (19,7 %) більше активної потужності порівняно із базовим ШЕМП. При цьому на 44,98 Вт (43,4 %) зростає корисна активна механічна потужність та на 167,85 Вт (34,7 %) збільшуються втрати в сталі модифікованого ШЕМП. Втрати в міді модифікованого ШЕМП порівняно із базовим пристроєм не змінюються. Модифікований ШЕМП створює на 1,6 Н·м (29 %) більший електромагнітний момент, внаслідок чого на 20 об/хв (11,1 %) збільшується його частота обертання. За рахунок використання внутрішньої ємнісної компенсації коефіцієнт потужності модифікованого ШЕМП збільшується до 0,71 (на 20,3 %), а електричний ККД, який враховує тільки механічну корисну потужність для транспортування сировинного матеріалу, зростає від 9,58 до 11,4 %. Слід відзначити, що за рахунок збільшення втрат в сталі модифікованого ШЕМП збіль-

На рис. 12 показано відповідне розташування системи суміжних статорів, які розміщені у порожнині зовнішнього ротора, а також розташування динамометра для вимірювання пускового моменту.

Вимірювання електромагнітних і температурних параметрів на макетних зразках виконувалось в режимі короткого замикання (загальмований ротор) при зниженні напруги живлення до рівня, при якому досягається номінальний струм.

Під час досліджень використовувались такі вимірювальні прилади: Tenmars TM-191 Magnetic Field Meter, призначений для вимірювання електромагнітних полів наднизької частоти від 30 Гц до 300 Гц; Tenmars TM-190 Multi Field EMF Meter – пристрій для вимірювання височастотних електромагнітних полів в діапазоні частот від 50 МГц до 3,5 ГГц і низькочастотних електричних і магнітних полів у частоті 50-60 Гц; інфрачервоний, оптичний пірометр Venetech GM533A, діапазон вимірювання  $-50...+530$  °С, показник візування 12:1, коефіцієнт теплового випромінювання 0,1-1, спектр 5-14 мкм; тепловізор Xintest НТІ НТ-18, теплова чутливість 0,07 °С, діапазон температур:  $-20...+300$  °С, частота захоплення зображення 8 Гц, діапазон довжин хвиль 8-14 мкм; динамометр аналоговий пружинний універсальний НК-300, використано для вимірювання пускового моменту, клас точності 0,5 %; вимірювач параметрів трансформаторів К540-3 використано для вимірювання електричних параметрів ШЕМП. В табл. 2 представлені експериментальні дані електричних і енергетичних показників макетного зразка базового (без внутрішньої ємнісної компенсації) варіанта двостаторного ШЕМП.

Навантаження ШЕМП здійснювалось шляхом фрикційного впливу механічного гальма на торцеву



частину ротора-шнека. Момент навантаження складає 7,4 Н·м. Вимірювання потужності, струму і напруги здійснювалось вимірювачем параметрів трансформаторів K540-3.

В табл. 3 представлені експериментальні дані поверхневих електромагнітних параметрів макетного

зразка базового (без внутрішньої ємнісної компенсації) варіанта двостаторного ШЕМП. Магнітна індукція, напруженість електричного поля, густина потоку електромагнітного випромінювання вимірювались в режимі короткого замикання на мінімально можливій відстані 1 мм від поверхні ротора ШЕМП.

Таблиця 2

Експериментальні дані електричних і енергетичних показників макетного зразка ШЕМП

Напруга, В	Потужність, Вт		Струм в режимі КЗ, А		Струм при навантаженні, А		Пусковий момент модуля, Н·м	Коефіцієнт потужності		Ковчання
	режим навантаження	режим КЗ	загальний	модуля	загальний	модуля		режим навантаження	режим КЗ	
60,5	1120	1320	23,17	11,6	23	11,5	4	0,508	0,546	0,84
70	1594	1876	27,5	13,75	26,2	13,1	5,6	0,5	0,556	0,73
77	1878	2266	30,12	15,7	28,5	14,3	12,3	0,492	0,562	0,63
81	2040	2384	33,7	22,5	29,8	14,9	13,7	0,486	0,57	0,55

Таблиця 3

Експериментальні дані поверхневих електромагнітних параметрів макетного зразка ШЕМП

Зона виміру	Параметри при напрузі живлення $U = 81$ В				
	Магнітна індукція, мТ	Напруженість електричного поля, В/м	Густина потоку електромагнітного випромінювання, мВт/м <sup>2</sup>	Температура, °С	
				Рис. 16,а	Рис. 16,б
1	60	0,03	0,7	28,5	48
2	100	0,03	0,9	30,5	51
3	170	0,03	1,8	41,2	62
4	400	0,2	523	61	74
5	380	0,15	520	63,3	76,2
6	410	0,15	525	63,1	76,3

На рис. 13 показано схему вимірювального стенду для реєстрації осцилограм струмів з використанням датчиків струму ACS758 на ефекті Холла з чутливістю 40 мВ/А.

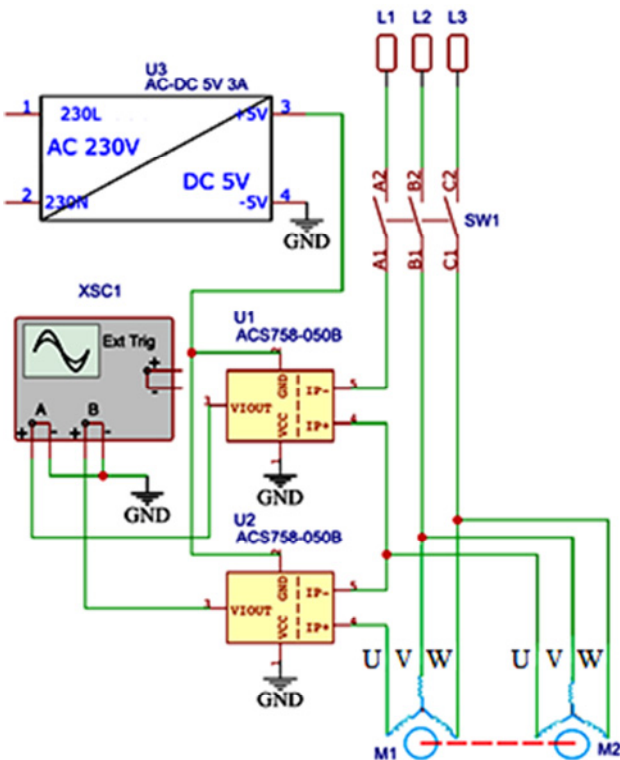
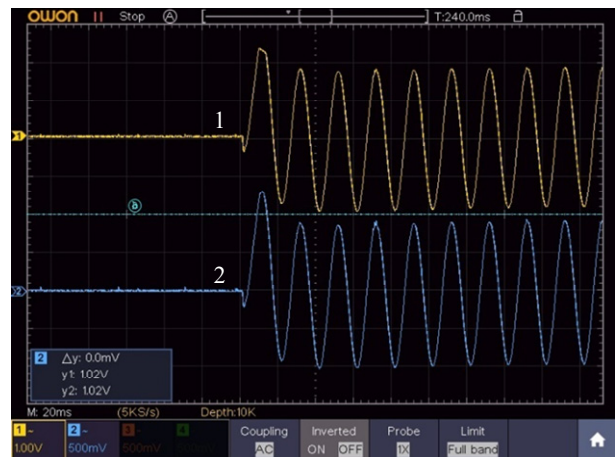
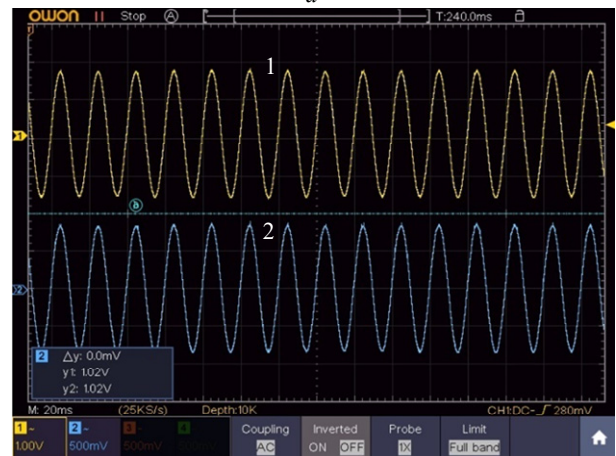


Рис. 13. Схема вимірювального стенду

На рис. 14 показані осцилограми загального струму ШЕМП і струму окремого модуля при напрузі живлення  $U = 81$  В.



а



б

Рис. 14. Осцилограми загального струму 1 і струму окремого модуля 2 ШЕМП: період пуску (а), після 7 хвилин роботи ШЕМП (б)

Через зміну параметрів статорів і ротора спостерігається зменшення амплітуд і діючих значень струмів до 5 % впродовж 7 хвилин роботи ШЕМП. Здійснено порівняння розподілу температурного поля на поверхні ротора макетного зразка ШЕМП з результатами моделювання. Термограми зафіксовані після 7 хвилин роботи в режимі короткого замикання при напрузі  $U = 73$  В. На рис. 15,а макетний зразок з довільним азимутальним розташуванням лобових частин суміжних статорів.

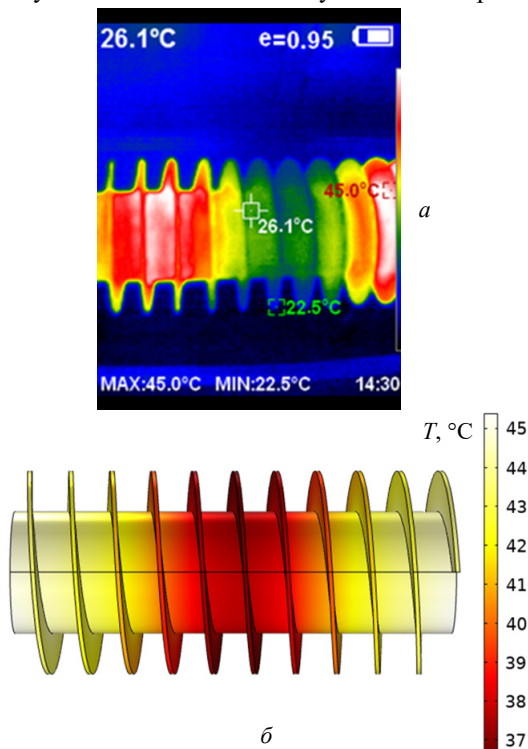


Рис. 15. Розподіл температури на поверхні ротора ШЕМП: експериментальна термограма макетного зразка після 7 хвилин обертання на неробочому ході при напрузі 81 В, частоті обертання 450 об/хв (а), результат моделювання (б)

Результати експериментальних досліджень (табл. 2, 3, рис. 14, 15), а саме параметрів і характеристик модуля ШЕМП: пускового моменту та струму; моменту і струму при навантаженні, індукції магнітного поля, температури поверхні ротора з точністю до 11 % співпадають з розрахунковими, що свідчить про достовірність математичної моделі ШЕМП.

#### Висновки.

1. Запропоновано метод просторового зміщення основної і додаткової обмоток статора та внутрішньої ємнісної компенсації та виконано порівняльний аналіз схем з'єднання і просторового розташування обмоток статора базового і модифікованого варіантів шнекового електромеханічного перетворювача (ШЕМП).

2. Доведено, що застосування внутрішньої ємнісної компенсації за широкого діапазону зміни кута просторового зміщення основної і додаткової обмоток та компенсуючих ємностей дозволяє змінювати значення і фазу струмів, магніторушійних сил та інших електричних величин. Для модифікованого ШЕМП досягнуто значне (на 29 %) зростання електромагнітного моменту та зменшення його екстремальних пульсацій.

3. За рахунок використання внутрішньої ємнісної компенсації досягається підвищення енергетичних пока-

зників: коефіцієнт потужності модифікованого ШЕМП збільшується на 20,3 %, а електричний ККД, який враховує тільки механічну корисну потужність для транспортування сировинного матеріалу, зростає на 1,86 %.

4. Використання запропонованого методу просторового зміщення основної і додаткової обмоток статора та внутрішньої ємнісної компенсації є перспективним для підвищення енергетичних показників ШЕМП.

**Фінансування.** Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (ДБ № 0120U102105 та № 0121U113746).

**Конфлікт інтересів.** Автори декларують відсутність конфлікту інтересів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

- Zhitao Han, Li Ding, Gang Wang. Experimental Investigation of Induction Motor Power Factor and Efficiency Impacted by Pulse Width Modulation Power and Voltage Controls of Variable-Frequency Drives. *ASHRAE Transactions*, 2021, vol. 127, pp. 817-828.
- Bortoni E.C., Bernardes J.V., da Silva P.V.V., Faria V.A.D., Vieira P.A.V. Evaluation of manufacturers strategies to obtain high-efficient induction motors. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2019, vol. 31, pp. 221-227. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.12.022>.
- Mbinkar E.N., Asoh D.A., Kujabi S. Microcontroller Control of Reactive Power Compensation for Growing Industrial Loads. *Energy and Power Engineering*, 2022, vol. 14, no. 9, pp. 460-476. doi: <https://doi.org/10.4236/epe.2022.149024>.
- Habyarimana M., Dorrell D.G., Musumpuka R. Reduction of Starting Current in Large Induction Motors. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 10, art. no. 3848. doi: <https://doi.org/10.3390/en15103848>.
- Antar R.K., Suliman M.Y., Saleh A.A. Harmonics resonance elimination technique using active static compensation circuit. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 2021, vol. 10, no. 5, pp. 2405-2413. doi: <https://doi.org/10.11591/eei.v10i5.3148>.
- Ferreira F.J.T.E., de Almeida A.T. Novel Multiflux Level, Three-Phase, Squirrel-Cage Induction Motor for Efficiency and Power Factor Maximization. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, vol. 23, no. 1, pp. 101-109. doi: <https://doi.org/10.1109/TEC.2007.914355>.
- Guo J., Ma X., Ahmadpour A. Electrical-mechanical evaluation of the multi-cascaded induction motors under different conditions. *Energy*, 2021, vol. 229, art. no. 120664. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120664>.
- Jagiela M., Garbiec T. Determination of best rotor length in solid-rotor induction motor with axial slitting. *Archives of Electrical Engineering*, 2012, vol. 61, no. 2, pp. 267-276. doi: <https://doi.org/10.2478/v10171-012-0022-2>.
- Zablodskiy M., Gritsyuk V., Rudnev Y., Brozhko R. Three-dimensional electromagnetic field model of an auger electromechanical converter with an external solid rotor. *Mining of Mineral Deposits*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 99-106. doi: <https://doi.org/10.33271/mining13.04.099>.
- Milykh V.I. Numerical-field analysis of active and reactive winding parameters and mechanical characteristics of a squirrel-cage induction motor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 4, pp. 3-13. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.4.01>.
- Trisha, Gupta G.S., Shiva Kumar S. Review of the Parameter Estimation and Transient Analysis of Three-Phase Induction Motor. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2021, vol. 693, pp. 223-232. doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-7675-1\\_21](https://doi.org/10.1007/978-981-15-7675-1_21).
- Nasir B.A. An Accurate Iron Core Loss Model in Equivalent Circuit of Induction Machines. *Journal of Energy*, 2020, vol. 2020, pp. 1-10. doi: <https://doi.org/10.1155/2020/7613737>.
- Ekpo E.G., Umoh G.D., Udokah Y.O.N. Effect of Phase-Shift in Six-Phase Induction Machine. *Journal of Emerging*

*Trends in Engineering and Applied Sciences*, 2022, vol. 13, no. 6, pp. 215-226.

14. Saneie H., Nasiri-Gheidari Z. Performance Analysis of Outer-Rotor Single-Phase Induction Motor Based on Magnetic Equivalent Circuit. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, vol. 68, no. 2, pp. 1046-1054. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2969125>.

15. Sharma U., Singh B. Robust design methodology for single phase induction motor ceiling fan. *IET Electric Power Applications*, 2020, vol. 14, no. 10, pp. 1846-1855. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2020.0017>.

16. Rezazadeh G., Tahami F., Capolino G.-A., Nasiri-Gheidari Z., Henao H., Sahebazamani M. Improved Design of an Outer Rotor Six-Phase Induction Motor With Variable Turn Pseudo-Concentrated Windings. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2022, vol. 37, no. 2, pp. 1020-1029. doi: <https://doi.org/10.1109/TEC.2021.3126538>.

17. Tornello L.D., Foti S., Cacciato M., Testa A., Scelba G., De Caro S., Scarcella G., Rizzo S.A. Performance Improvement of Grid-Connected Induction Motors through an Auxiliary Winding Set. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 8, art. no. 2178. doi: <https://doi.org/10.3390/en14082178>.

18. Di C., Petrov I., Pyrhonen J.J. Design of a High-Speed Solid-Rotor Induction Machine With an Asymmetric Winding and Suppression of the Current Unbalance by Special Coil Arrangements. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 83175-83186. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925131>.

19. Zabldoskiy N., Chuenko R., Gritsyuk V., Kovalchuk S., Romanenko O. The Numerical Analysis of Electromechanical Characteristics of Twin-Screw Electromechanical Hydrolyzer. *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, 2021, pp. 130-135. doi: <https://doi.org/10.1109/ACIT52158.2021.9548392>.

20. Kaplun V., Makarevych S., Chuenko R. Modelling of Asynchronous Motor with Split Stator Windings on the Principle of a Rotary Autotransformer. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2022, vol. 98, no. 3, pp. 39-43. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2022.03.10>.

21. *AC/DC Module User's Guide*. COMSOL Inc., Burlington, MA, USA, 2018.

22. Rezazadeh G., Tahami F., Capolino G.-A., Vaschetto S., Nasiri-Gheidari Z., Henao H. Improvement of Concentrated Winding Layouts for Six-Phase Squirrel Cage Induction Motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, vol. 35, no. 4, pp. 1727-1735. doi: <https://doi.org/10.1109/TEC.2020.2995433>.

23. *Heat Transfer Module User's Guide*. COMSOL Inc., Burlington, MA, USA, 2018.

Надійшла (Received) 16.10.2023

Прийнята (Accepted) 12.01.2024

Опублікована (Published) 01.05.2024

#### How to cite this article:

Zabldoskiy M.M., Chuenko R.M., Kovalchuk S.I., Kruhliak H.V., Kovalchuk O.I. Internal capacitive compensation of the reactive power of the screw electromechanical converter. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 3, pp. 11-21. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.3.02>

Заблодський Микола Миколайович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,

Чуєнко Роман Миколайович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,

Ковальчук Станіслав Ігорович<sup>1</sup>, PhD, м.н.с.,

Круляк Геннадій Віталійович<sup>1</sup>, асистент,

Ковальчук Орест Ігорович<sup>1</sup>, аспірант,

<sup>1</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України,

03041, Київ, вул. Героїв Оборони, 12,

e-mail: stas\_kovalchuk@outlook.com

M.M. Zabldoskiy<sup>1</sup>, R.M. Chuenko<sup>1</sup>, S.I. Kovalchuk<sup>1</sup>,

H.V. Kruhliak<sup>1</sup>, O.I. Kovalchuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 12, Heroyiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine.

#### **Internal capacitive compensation of the reactive power of the screw electromechanical converter.**

**Introduction.** A special category among induction machines with a massive rotor is occupied by the class of multifunctional electromechanical energy converters, which are integrated with the links of technological processes **Problem.** The exchange of reactive energy between the source and the electromechanical converter during periods of operation with a low load leads to a significant decrease in its efficiency and power factor. With the use of non-linear loads and taking into account possible resonance, it has become more difficult to improve the power factor by installing capacitor banks. **Goal.** Increasing the energy indicators of the electromechanical converter by spatial displacement of the main and additional stator windings and internal capacitive compensation. **Methodology.** Comparative analysis of connection schemes and spatial arrangement of stator windings when using internal capacitive compensation. Modeling and experimental studies of electromagnetic and electromechanical characteristics of a screw electromechanical converter.

**Results.** The distribution of electromagnetic quantities was established and the choice of the angle of spatial displacement of the main and additional windings of the stator phases of the modified converter, which ensure an increase in the value of the electromagnetic torque and power factor, was justified. The results of experimental studies of the screw electromechanical converter are presented. **Originality.** For the first time, a method of internal capacitive compensation of reactive power is proposed for multifunctional electromechanical converters of technological purpose. **Practical value.** The use of the proposed method of spatial displacement of the main and additional stator windings and internal capacitive compensation will ensure an increase in the energy performance of the screw electromechanical converter. References 23, tables 3, figures 15.

**Keywords:** Maxwell's equation, multifunctional electromechanical converter, stator winding, finite element method, capacitor capacity.