

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА МЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ АСИНХРОННО-СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА В РЕЖИМІ НЕРОБОЧОГО ХОДУ

М.І. Коцур*, канд. техн. наук
НУ «Запорізька політехніка»,
вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, 69063, Україна.
E-mail: kotsur_m@ukr.net.

Розроблено двовимірну коло-польову модель нестационарних електромагнітних та механічних процесів асинхронно-синхронного електромеханічного перетворювача, яка дає змогу встановити взаємозв'язок електромагнітних процесів у коловій та 2D-польовій частинах моделі, врахувати особливості конструкції його обмоток якоря та ротора через їхню схемну реалізацію та забезпечити комутацію з елементами звичайних та напівпровідникових систем живлення. Методами чисельного моделювання досліджено електромагнітні та механічні процеси в режимі неробочого ходу у разі спільної взаємодії суміщених асинхронної та синхронної частин в єдиній активній частині асинхронно-синхронного електромеханічного перетворювача. Показано наявність самосинхронізуючих властивостей для асинхронно-синхронних електромеханічних перетворювачів, за яких забезпечується асинхронний пуск з подальшим втягуванням його ротора у синхронізм в режимі неробочого ходу без збудження, пояснено умови їхнього виникнення. Встановлені співвідношення між струмом неробочого ходу та струмом збудження, яке визначає роботу синхронної частини асинхронно-синхронного електромеханічного перетворювача в режимах недозбудження, нормального збудження та перезбудження. Доведено, що в режимах недозбудження та нормального збудження його синхронна частина працює як компенсатор реактивної потужності, в режимі перезбудження – як генератор. Експериментальні дослідження підтверджують адекватність та точність чисельної реалізації, а також відповідність електромагнітним процесам у разі роботи асинхронно-синхронного електромеханічного перетворювача в режимі неробочого ходу. Бібл. 14, рис. 11.

Ключові слова: модель, електромеханічний перетворювач, режим, синхронізм, струм збудження.

Вступ. В сучасних системах електроприводу змінного струму можуть застосовуватися різні типи електромеханічних перетворювачів (ЕМП): асинхронні з короткозамкненим та фазним ротором, синхронні з контактними кільцями, безконтактні синхронні машини (БСМ) з електромагнітним або магнітоелектричним збудженням та інші. Переваги та недоліки цих ЕМП, а також їх регульовальні властивості відомі. Наряду з найпоширенішими класами ЕМП набувають розвитку каскадні суміщені в єдиному магнітопроводі ЕМП з суміщеними обмотками (СО) якоря [1–4]. Принципова ідея створення суміщених ЕМП відома давно і використовувалася під час створення цілого ряду різноманітних їхніх конструкцій [1–4]. Суміщені ЕМП не розглядалися з позиції загальної теорії ЕМП, а подальший розвиток їхньої теорії було віднесено до класу спеціальних ЕМП [1]. До останнього часу даний клас ЕМП не мав перспектив у подальшому розвитку за наявних недоліків конструкції: наявність випрямляча в роторі, що призводить до значного підвищення масогабаритних показників, складність у технології виготовлення, обслуговуванні; підвищена інерційність регулювання за рахунок збільшеної електромагнітної постійної обмотки збудження збудника [4]. У роботах [5–9] автором запропоновано новий клас асинхронно-синхронних ЕМП (АСЕМП), що є подальшим етапом розвитку вдосконалення конструкції каскадних тихохідних суміщених ЕМП, які поєднують властивості асинхронного двигуна (АД) та синхронного генератора (СГ) [8]. Особливість конструкції полягає у наступному: статорна обмотка першої ЕМП являє собою трифазну $2p_1$ полюсну обмотку, статорна обмотка другої ЕМП – однофазна $2p_2$ полюсна обмотка збудження. Трифазна $2p_1$ обмотка та однофазна $2p_2$ обмотка електрично суміщені між собою та формують єдину струмопровідну систему на статорній (якірній) стороні АСЕМП. Кожна фаза обмотки якоря складається з двох паралельних гілок котушкових груп, виводи яких з'єднані у дві окремі між собою нульові точки ("зірки"). До цих нульових точок приєднуються виводи катодної та анодної вентильних груп керованого (або некерованого) випрямляча для забезпечення живлення суміщеної обмотки якоря струмом збудження [9]. За допомогою розробленої

універсальної методики визначення оптимального обмотувального коефіцієнта ЕМП автором [9] було запропоновано для суміщених обмоток ротора виключити секції тих котушок, струми яких утворюють зустрічно спрямовані вектора МРС. А ті пази осердя ротора, в яких розміщувалися ці секції – не відштамповувати [9]. При цьому конструкція обмотки ротора значно спрощується та складається з електрично незв'язаних між собою короткозамкнених котушок, кількість яких визначається сумою кількості полюсів двох поєднаних ЕМП [9]. Таким чином, за простотою конструкції, технології виготовлення та масогабаритними показниками АСЕМП можна поставити у повну відповідність до класичних асинхронних ЕМП з КЗ ротором. Крім того, наявність обмотки збудження, яка електрично суміщена з обмоткою якоря на нерухомій стороні АСЕМП, дає змогу віднести цей клас ЕМП до класу безконтактних ЕМП з можливістю регулювання потоком збудження у широкому діапазоні, що є неможливим для синхронних ЕМП з постійними магнітами. Однак для АСЕМП досі відсутні дослідження, які пов'язані з визначенням закономірностей електромагнітних та механічних процесів в перехідних та квазіусталеному режимах його роботи, не визначені його регульовальні властивості. Це обумовлює необхідність застосування методів математичного моделювання нестационарного електромагнітного поля з врахуванням рівнянь динаміки, особливостей геометричної будови активної частини АСЕМП та схеми комутації його обмоток з елементами звичайних та напівпровідникових систем живлення, що дасть можливість забезпечити високу точність чисельних розрахунків електромагнітних та механічних процесів, наближених до реальних фізичних процесів експериментального зразка АСЕМП.

Метою роботи є розробка математичної моделі АСЕМП, дослідження особливостей протікання електромагнітних і механічних процесів в перехідному та квазіусталеному режимах роботи неробочого ходу (НХ) за спільної дії АД та СГ його суміщених частин та порівняння результатів чисельного розрахунку з даними експериментального дослідження.

Математична модель. Запропонована 2D коло-польова математична модель нестационарних електромагнітних та механічних процесів АСЕМП, яка дає змогу встановити взаємозв'язок електромагнітних процесів у коловій та 2D-польовій частинах моделі, врахувати особливості конструкції його обмоток якоря та ротора через їх схемну реалізацію та забезпечити комутацію з елементами звичайних та напівпровідникових систем живлення. За математичного опису електромагнітних процесів приймаються припущення про ізотропність електрофізичних та електромагнітних властивостей матеріалів, відсутність струмів зміщення та вільних зарядів [10]. У цьому випадку нестационарні електромагнітні процеси в розрахунковій області АСЕМП можуть бути описані системою нелінійних рівнянь у частинних похідних [10]

$$\sigma_j \frac{\partial A_j}{\partial t} + \nabla \times \left[\left(\mu_0 \mu_j(B) \right)^{-1} \nabla \times A_j \right] - \sigma_j \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_{ej}, \quad (1)$$

де \mathbf{A} – векторний магнітний потенціал; \mathbf{B} – індукція магнітного поля; μ , σ – відповідно відносна магнітна проникність та питома електропровідність (для кожної розрахункової області задається окремо згідно магнітної та електрофізичної властивостей матеріалів); \mathbf{J}_e – щільність стороннього джерела струму; індекси j – відповідають підобластям геометричної розрахункової області; \mathbf{v} – вектор швидкості руху розрахункової області ротора відносно системи координат якоря, який визначається через кутову швидкість ротора ω_m та радіус-вектор точки розрахункової області ротора \mathbf{r} ($\mathbf{v} = \omega_m \mathbf{r}$).

У плоско-паралельному формулюванні розподілу електромагнітного поля геометрична модель АСЕМП представляється у вигляді проекції в XU -площині за заданій еквівалентній глибині l_z розрахункової області (осьова довжина якоря), тому рівняння (1) необхідно доповнити наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} A_{i,j} = l_z \cdot A_{zi,j}; \mathbf{B}_{i,j} = \mathbf{i} \cdot B_{xi,j} + \mathbf{j} \cdot B_{yi,j}; \mathbf{H}_{i,j} = \mathbf{i} \cdot H_{xi,j} + \mathbf{j} \cdot H_{yi,j} \\ \bar{B}_{yi,j} = -\frac{\partial A_{i,j}}{\partial y}; \bar{B}_{xi,j} = -\frac{\partial A_{i,j}}{\partial x}; \bar{H}_{xi,j} = \frac{\bar{B}_{xi,j}}{\mu_{i,j}}; \bar{H}_{yi,j} = \frac{\bar{B}_{yi,j}}{\mu_{i,j}}. \end{cases} \quad (2)$$

У відповідності до [10], система рівнянь (1) доповнюється умовою калібрування Кулона. На зовнішніх границях 2D області геометричної моделі АСЕМП задаються однорідні граничні умови та умови сполучення для магнітних та електричних полів згідно [10]. Для кожної котушкової групи, що

формує паралельну гілку відповідної фази обмотки якоря АСЕМП, рівняння (1)-(2) згідно [11] потрібно доповнити рівняннями сполучення магнітного поля та електричного кола за живлення фаз A, B, C обмотки якоря від мережі, а також за живлення випрямленим струмом i_d від джерела збудження, який протікає через нульові точки «0+» та «0-»

$$\begin{cases} u_{m,n} \pm u_d = \frac{d\Psi_{m,n}}{dt} + L_{l,n} \cdot \frac{d}{dt}(i_{m,n} \pm i_{z\delta,n}) \pm L_{n,n} \cdot \frac{di_{z\delta,n}}{dt} + (r_{l,n} + r_{n,n}) \cdot (i_{m,n} \pm i_{z\delta,n}); \\ \Psi_{m,n} = 2 \cdot \frac{n_e \cdot l_z}{S_{n.e\phi}} \int A_{i,j} ds; i_{z\delta,n} = \frac{i_d}{3}; J_e = \frac{n_e \cdot (i_{m,n} \pm i_{z\delta,n})}{S_{n.e\phi}}, \end{cases} \quad (3)$$

де $m=A,B,C$, $n=1,2$ – відповідно індекс фази та паралельної гілки (котушкової групи) фази обмотки якоря; $u_{m,n}$ – підведена напруга до обмотки якоря відповідної фази; $\Psi_{m,n}$, $i_{m,n}$ – магнітні потокозчеплення, струми паралельних гілок фазних котушкових груп n відповідної фази m обмотки якоря; $L_{l,n}$, $L_{n,n}$, $r_{l,n}$, $r_{n,n}$ – відповідно індуктивності та активні опори лобової та пазової частин паралельної гілки обмотки якоря; u_d , i_d – випрямлена напруга та струм системи збудження; $i_{z\delta,n}$ – струм збудження, що протікає у відповідній паралельній гілці n фази m обмотки якоря (знак \pm відповідає напрямку протікання струму збудження (рис. 1); n_e – кількість витків обмотки якоря; $S_{n.e\phi}$ – поперечний переріз ефективного провідника; S_a – загальна площа перетину всіх витків паралельної гілки котушкової групи. Зменшення пульсації випрямленого струму i_d забезпечується індуктивністю обмотки якоря АСЕМП. Однак, якщо цього недостатньо, додатково у коло випрямленого струму випрямляча можна додати дросель. У такому випадку ліву частину першого рівняння у (3) необхідно доповнити складовою $-L_o(di_d/dt)$. Задля збільшення точності та адекватності відтворення електромагнітних та механічних процесів в АСЕМП, математичну модель (1)-(2) за аналогією (3) необхідно доповнити рівняннями сполучення магнітного поля та електричного кола обмотки ротора, яка складається з r електрично незв'язаних котушок

$$0 = \frac{d\Psi_{m2,r}}{dt} + L_{l,r} \cdot \frac{di_{m2,r}}{dt} + (r_{l,r} + r_{n,r}) \cdot i_{m2,r}, \quad (4)$$

де $\Psi_{m2,r}$, $i_{m2,r}$ – магнітні потокозчеплення та струми відповідної короткозамкненої котушки обмотки ротора; $L_{l,r}$, $r_{n,r}$, $r_{l,r}$ – відповідно індуктивність лобової частин та активні опори пазової та лобової частин короткозамкнених котушок обмотки ротора. Для проведення дослідження АСЕМП в режимах неробочого ходу (НХ) та під навантаженням систему рівнянь математичної моделі (1)-(4) необхідно доповнити рівняннями кутової швидкості ротора [12], а також рівнянням електромагнітного моменту за методом Арккіо, який є різновидом методу тензора напруг Максвелла [13]

$$\begin{cases} \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{M_e - M_c}{J}; \frac{d\phi}{dt} = \omega_m; \\ M_e = \frac{l}{R_o - R_i} \cdot \frac{l_z}{\mu_0} \int B_r B_\phi dS_{ag}, \end{cases} \quad (5)$$

де M_e – електромагнітний обертовий момент; M_c – момент навантаження; J – момент інерції ротора; ω_m – кутова швидкість ротора; ϕ – кут положення ротора; R_o – зовнішній радіус повітряного зазору; R_i – внутрішній радіус повітряного зазору; S_{ag} – площа поперечного перетину повітряного зазору. Під час дослідження процесів електромагнітного та електромеханічного перетворення енергії в АСЕМП приймається припущення, що його підключено до мережі з необмеженою потужністю та симетричною системою фазних напруг. Тому, початкові умови відповідають першому закону комутації [10]

$$\begin{cases} i_A|_{0-} = i_A|_{0+} = 0; i_B|_{0-} = i_B|_{0+} = 0; i_C|_{0-} = i_C|_{0+} = 0; i_d|_{0-} = i_d|_{0+} = 0; \\ u_A(t) = \sqrt{2} \cdot U_\phi \cdot \sin(\omega \cdot t); u_B(t) = \sqrt{2} \cdot U_\phi \cdot \sin(\omega \cdot t + 2\pi/3); \\ u_C(t) = \sqrt{2} \cdot U_\phi \cdot \sin(\omega \cdot t - 2\pi/3); u_d(t) = U_d. \end{cases} \quad (6)$$

Рівняння (1)–(5) відображають взаємозв'язок між польовою та коловою частинами 2D колопольової математичної моделі нестационарних електромагнітних та механічних процесів АСЕМП, які вирішуються спільно для кожної ітерації за допомогою метода Ньютона-Рафсона. Для 2D колопольової моделі лобові частини обмотки якоря та ротора АСЕМП представляються елементами електричного кола. Задля визначення їхніх параметрів $L_{l,n}$, $r_{l,n}$, $L_{l,r}$, $r_{l,r}$ ставилася окрема задача 3D польо-

вого аналізу з виділенням лобових частин обмоток АСЕМ, застосовуючи варіаційне формулювання рівнянь електромагнітного поля. В окремих випадках, коли проведення 3D польового аналізу є неможливим, можна застосувати методичку щодо визначення цих параметрів за наближеним розрахунком відповідно до [14]. Однак для цього повинні бути визначені параметри пазових частин обмоток якоря та ротора $L_{n,n}$, $L_{n,r}$, $r_{n,n}$, $r_{n,r}$. Для 2D коло-польової моделі АСЕМП пазові частини обмоток якоря та ротора є розрахунковими підобластями польової моделі, тому їхні параметри можна визначити за результатами 2D польового аналізу через визначення енергії магнітного поля, активних втрат та дійсного значення струмів в провідниках з врахуванням еквівалентної глибини l_z розрахункової області активної частини АСЕМП

$$\left\{ W_{em}|_j = \frac{1}{2} \iint_{S_j} (B_j \cdot H_j) dx dy; P|_j = \iint_{S_j} \sigma_j^{-1} |J_{e,j}|^2 dx dy; R|_j = \frac{P}{I^2} \Big|_j; L|_j = \frac{2 \cdot W_{em}}{I^2} \Big|_j \right. \quad (7)$$

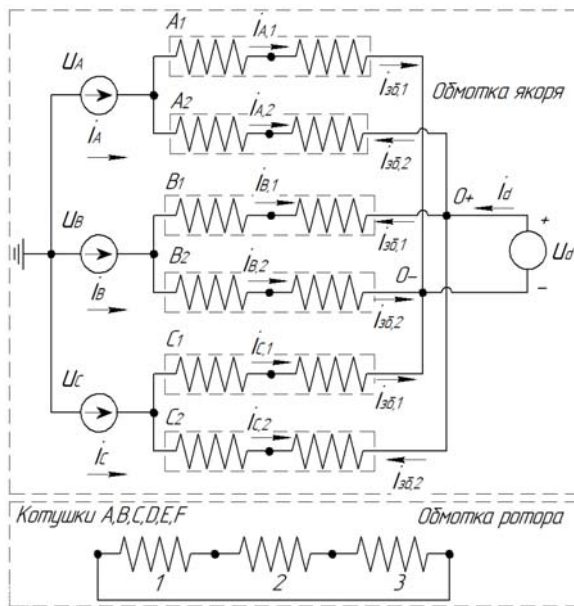


Рис. 1

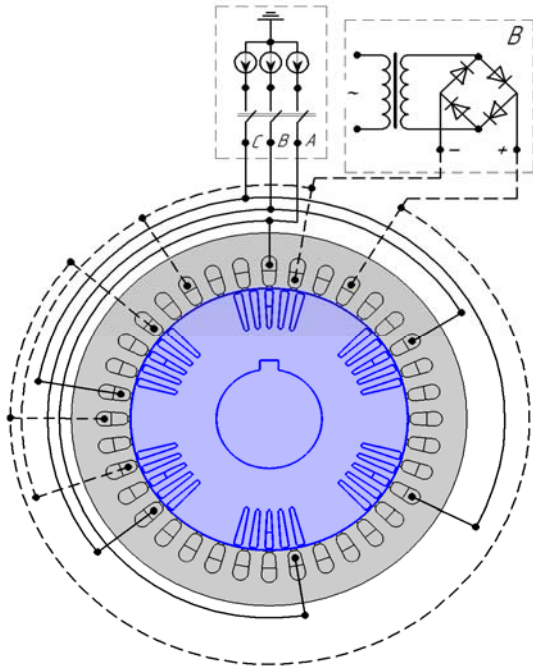


Рис. 2

Результати дослідження. Дослідження електромагнітних та механічних процесів АСЕМП проводилися для виготовленого експериментального зразка АСЕМП (на основі кранового двигуна МТФ-111-6) з суміщеною $2p_1=4$ та $2p_2=8$ обмоткою якоря (каскадна швидкість обертання $n=500$ об/хв) з кількістю фазних котушок обмотки ротора $m_2=6$, частотою живлення обмотки якоря $f_1=50$ Гц за $U_\phi=54$ В (номінальна фазна напруга $U_{\phi,n}=74$ В). Електричну схему модельної реалізації обмоток якоря та ротора АСЕМП наведено на рис. 1. Конструкція двошарової обмотки якоря АСЕМП містить 2 котушкові групи (по 2 котушки в кожній групі) на фазу (A_1 та A_2 , B_1 та B_2 , C_1 та C_2). Виводи котушкових груп усіх фаз з'єднано у дві незалежні між собою «зірки» «0+» та «0-». Обмотка ротора для експериментального зразка складається з 6-ти незалежних короткозамкнених котушок (A, B, C, D, E, F), які розміщуються навколо масивного зубця. Секції 1, 2, 3 кожної котушки

з'єднані послідовно, а виводи секцій 1 та 3 закорочуються. Схемна реалізація обмотки якоря та обмотки ротора разом з рівняннями математичної моделі електромагнітного поля виконана за допомогою програмного забезпечення Comsol Multiphysics з використанням мультифізичної структури при поєднанні "Rotating Machinery, Magnetic" та "Electrical Circuit" інтерфейсів. Зв'язок та погодження параметрів пазових частин обмоток якоря та ротора, що є елементами як польової моделі, так і елементами електричного кола, виконується за допомогою "External I vs. U" терміналів. Для живлення АСЕМП електрична схема обмотки якоря доповнюється елементами джерела змінної напруги, які під'єднані до ввідів обмотки якоря, а до виводів обмотки якоря, які утворюють нульові вузли «0+» та «0-», – анодну та катодну групи випрямляча. Схемо-геометричну інтерпретацію 2D коло-польової моделі АСЕМП наведено на рис. 2 (спряження лобових та пазових частин обмоток якоря та ротора не відображено).

Розглянемо роботу АСЕМП у процесі пуску та усталеному режимі неробочого ходу (НХ) за умови відсутності його збудження (нульові точки від'єднання від системи збудження «0+» та «0-»). В такому випадку до трифазної обмотки якоря підведено тільки напругу від мережі, що забезпечує роботу тільки АД частини АСЕМП з такими самими властивостями, як у звичайного АД. При цьому в режимі НХ АСЕМП має самосинхронізуючі властивості, які забезпечують асинхронний пуск з подальшим втягуванням ротора у синхронізм за відповідній номінальній каскадній швидкості обертання його ротора $n_k = (60 \cdot f_1) / (p_1 + p_2)$.

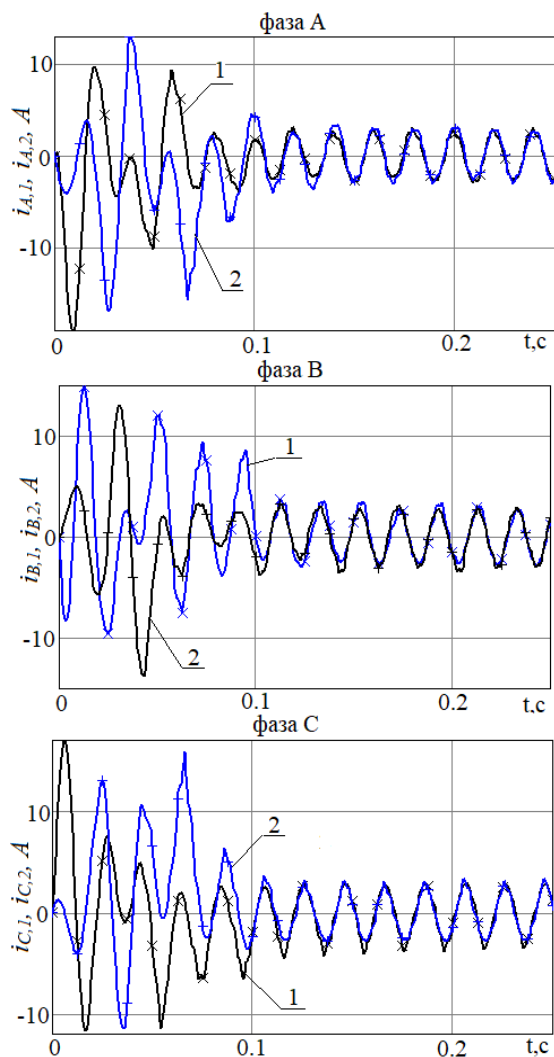


Рис. 3

(перехідний чи усталений) частота фазних струмів ротора є постійною, яка дорівнює частоті змінного струму якоря $f_1 = f_2$ (рис. 3 та рис. 4). Це свідчить про те, що електромагнітне поле якоря обертається з однаковою швидкістю (синхронно) з електромагнітним полем ротора ($\omega_{n,я} = \omega_{n,р}$), яке утворене відповідно індукованими струмами в фазних короткозамкнених котушках обмотки ротора АСЕМП. Для випадків, коли швидкість обертання ротора ω_p менша за синхронну швидкість електромагнітного поля

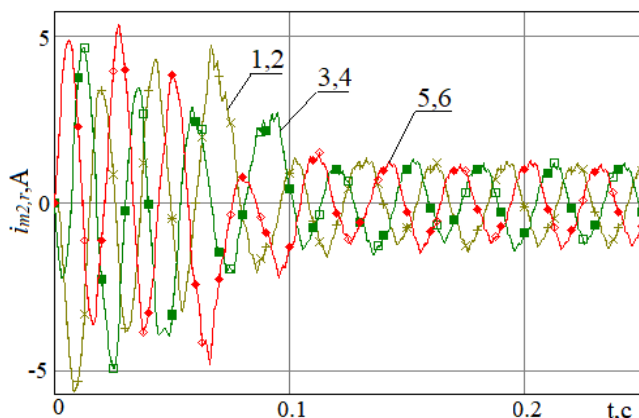


Рис. 4

якоря $\omega_{n,я}$ та ротора $\omega_{n,р}$ ($\omega_p < (\omega_{n,я} = \omega_{n,р})$), тобто коли ротор має ковзання s , в якійній обмотці виникає зрівняльний струм, який капротіжну між нульовими точками «0+» та «0-» через котушкові групи паралельних гілок відповідної фази обмотки якоря за контурами: «0-»→A1→A2→«0+»; «0-»→B2→B1→«0+»; «0-»→C1→C2→«0+» (рис. 1). Зрівняльний струм є змінним за напрямком, частота якого залежить від ковзання s ротора та дорівнює $f_{зр.с.} = f_1 \cdot s$. На рис. 5 наведено осцилограми зрівняльного струму $i_{зр}$ між нульовими точками «0+» та «0-» в процесі розгону та подальшим виходом на каскадну синхронну швидкість обертання

В процесі пуску та розвинення швидкості АСЕМП струми якоря в паралельних гілках (1) ($i_{A,1}$, $i_{B,1}$, $i_{C,1}$) та (2) ($i_{A,2}$, $i_{B,2}$, $i_{C,2}$) фаз A, B, C зміщені один від одного на кут 90 ел. град. (рис. 3). До моменту втягування в синхронізм ротора АСЕМП струми в паралельних гілках кожної з фаз мають постійні складові, які за напрямком співпадають зі струмом збудження (за умови його наявності, рис. 1). Після моменту часу, коли ротор втягнувся у синхронізм та АСЕМП працює в режимі НХ на номінальній синхронній швидкості ротора, струми в паралельних гілках кожної з фаз вже співпадають за фазою та за своїм амплітудним значенням (рис. 3). Неузгодженість струмів в паралельних гілках кожної з фаз обмотки якоря в перехідному режимі роботи АСЕМП викликано утворенням зрівняльного струму (пояснення буде наведено далі).

На рис. 4 наведено струми в короткозамкнених котушках (1 – котушка A, 2 – котушка B; 3 – котушка C; 4 – котушка D; 5 – котушка E; 6 – котушка F) обмотки ротора. В момент пуску АСЕМП в короткозамкненій обмотці ротора індукуються трифазна система струмів. Так як кількість фазних незалежних короткозамкнених котушок обмотки ротора АСЕМП дорівнює 6, струми в фазних котушках, які розташовані на одній геометричній нейтралі A та D, B та E, C та F, співпадають за фазою та амплітудним значенням. Причому, незалежно від режиму роботи АСЕМП

якоря $\omega_{n,я}$ та ротора $\omega_{n,р}$ ($\omega_p < (\omega_{n,я} = \omega_{n,р})$), тобто коли ротор має ковзання s , в якійній обмотці виникає зрівняльний струм, який капротіжну між нульовими точками «0+» та «0-» через котушкові групи паралельних гілок відповідної фази обмотки якоря за контурами: «0-»→A1→A2→«0+»; «0-»→B2→B1→«0+»; «0-»→C1→C2→«0+» (рис. 1). Зрівняльний струм є змінним за напрямком, частота якого залежить від ковзання s ротора та дорівнює $f_{зр.с.} = f_1 \cdot s$. На рис. 5 наведено осцилограми зрівняльного струму $i_{зр}$ між нульовими точками «0+» та «0-» в процесі розгону та подальшим виходом на каскадну синхронну швидкість обертання

ня ротора АСЕМП в режимі НХ, а також випадок, коли ковзання ротора s змінюється від 0 до 1 (через додавання навантаження), де залежність його частоти від ковзання виражена найкраще. Під час синхронізації ротора АСЕМП, зрівняльний струм в обмотці якоря майже відсутній, а залишкова його дія спрямована на підтримання номінальної каскадної синхронної швидкості ротора (рис. 5). У разі появи ковзання ротора знову з'являється зрівняльний струм, частота та амплітудне значення якого буде зростати зі збільшенням ковзання ротора (рис. 5). Накладання струму якоря та зрівняльного струму призводить до появи автоколивальних процесів загального струму якоря в паралельних гілках кожної з фаз обмотки якоря з тією ж частотою $f_{зр.с.} = f_1 \cdot s$. Наявність автоколивальних процесів струму якоря в паралельних гілках кожної з фаз, особливо за значних значень ковзання ротора s , є небажаним явищем, так як призводить до пульсації електромагнітного моменту, швидкості обертання його ротора, отже до зростання активних втрат й додаткового перегріву обмотки якоря.

Розглянемо роботу АСЕМП на каскадній синхронній швидкості обертання ротора в усталеному режимі НХ за наявності струму збудження. У разі подачі постійної напруги U_d до нульових точок «0+» та «0-» в котушкових групах паралельних гілок кожної з фаз обмотки якоря з'являється струм збудження $i_{зб}$, який, згідно схеми з'єднання кінців котушкових груп обмотки якоря у нульові точки (рис.1), дорівнює $i_{зб} = i_d/3$. При цьому сумісно з АД частиною АСЕМП починає працювати його СГ частина. СГ частина АСЕМП працює в трьох режимах роботи: режим недозбудження, режим нормального збудження та режим перезбудження.

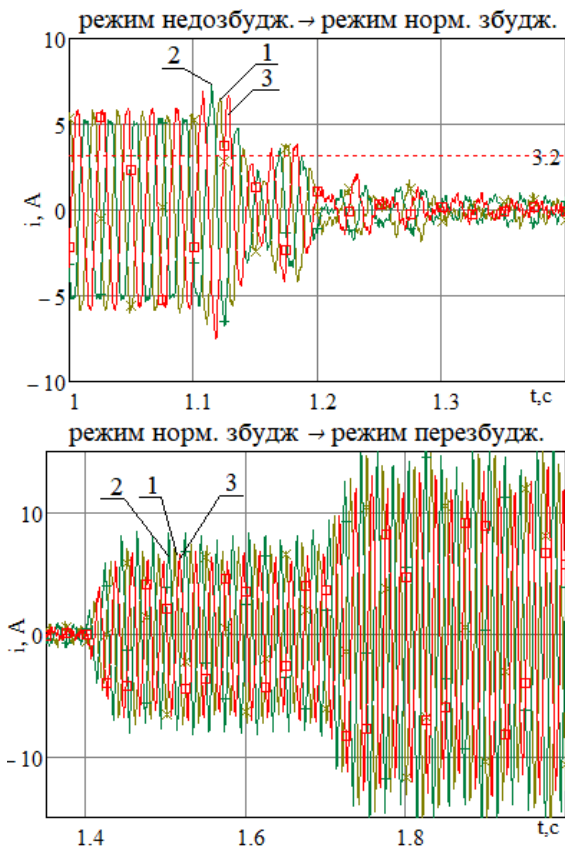


Рис. 6

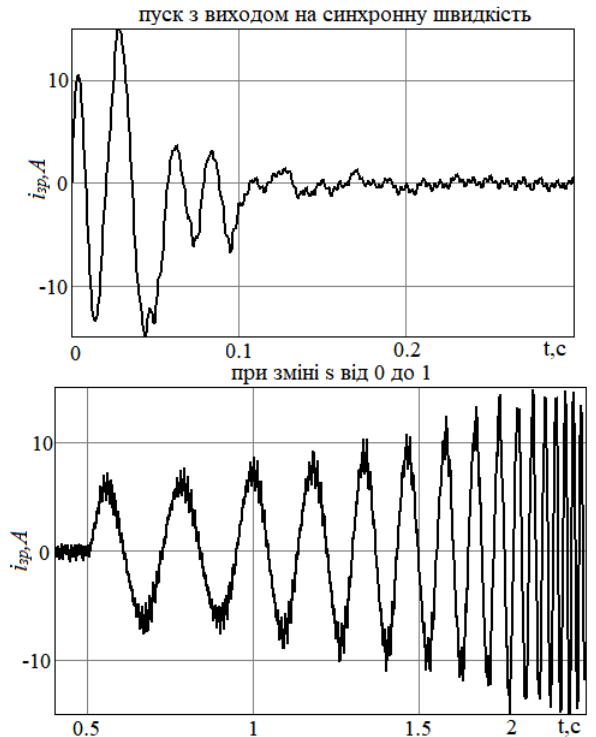


Рис. 5

режим недозбудження, режим нормального збудження та режим перезбудження.

В режимі недозбудження струм, який генерується в обмотках якоря та ротора СГ частиною АСЕМП, буде випереджати ЕРС СГ частини АСЕМП та має реактивний (ємнісний) характер. Цей струм знаходиться у протифазі реактивної (індуктивної) складової струму якоря, який утворюється АД частиною АСЕМП. Це призводить до зменшення реактивної складової результуючого струму якоря, отже його повного струму (рис. 6: 1 – фаза А, 2 – фаза В, 3 – фаза С). Повний струм якоря, який споживається з мережі, не має постійної складової від дії струму збудження, який протікає, як і зрівняльний струм (за його наявності) за контурами «0-»→А1→А2→«0+»; «0-»→В2→В1→«0+»; «0-»→С1→С2→«0+» та не впливає на мережу.

На рис. 7 наведено осцилограми струму якоря в паралельних гілках (відповідно криві 1 та 2) фази А. Струм якоря в паралельних гілках містить позитивні та від'ємні постійні складові, що обумовлено напрямом протікання струму збудження.

Через подальше зростання струму збудження $i_{зб}$ СГ частина АСЕМП переходить до режиму нормального збудження, за якого реактивна складова загального струму обмотки якоря (рис. 6) та струму в паралельних гілках обмотки якоря (рис. 7) повністю компенсуються. При цьому струм збудження в режимі нормального

збудження СГ частини АСЕМП буде дорівнювати дійсному значенню загального струму НХ його АД частини $I_{зб}=I_{HX}$ (згідно рис. 6 – рис. 7 $I_{зб}=I_{HX}=3,2A$).

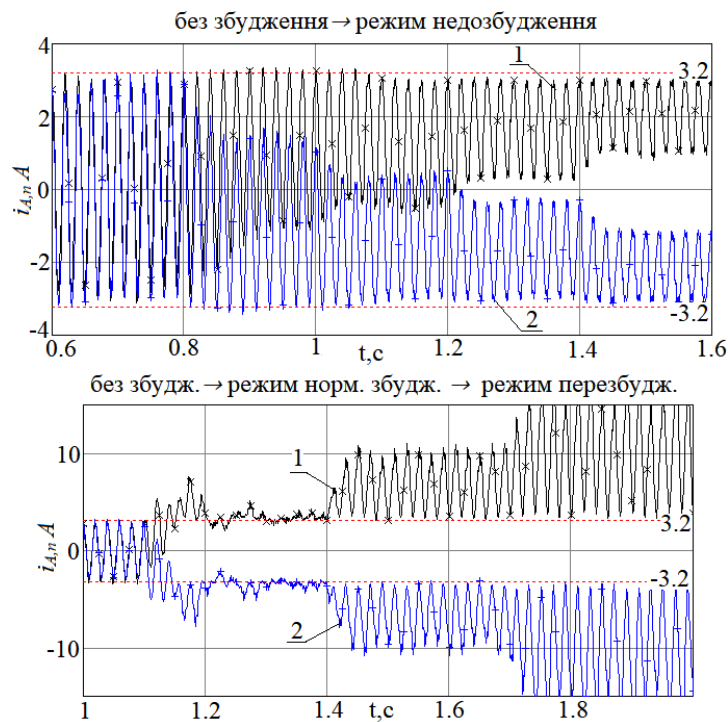


Рис. 7

частини АСЕМП відображає їхню активну складову. В такому випадку СГ частина АСЕМП працює в режимі компенсатора реактивної потужності.

У разі подальшого збільшення струму збудження $I_{зб}$ СГ частина АСЕМП переходить з режиму нормального збудження до режиму перезбудження (рис. 6, рис. 7). При цьому, в обмотці ротора та якоря АСЕМП результуючі вектори струмів будуть зміщені за фазою та відставати за векторами ЕРС СГ частини АСЕМП. Струми якоря та ротора вже будуть утворюватися переважно СГ частиною АСЕМП, де повний струм буде мати як активну, так і індуктивну складові. В даному режимі СГ частина АСЕМП працює вже не в режимі компенсації реактивної потужності, а в генераторному режимі роботи, так як значення ЕРС СГ частини АСЕМП E_{CG} перевищує значення напруги мережі U_{ϕ} ($E_{CG} > U_{\phi}$). В такому випадку АСЕМП вже працює одразу в обох режимах – двигуновому та генераторному одночасно, а електромагнітний момент, який утворює СГ частина АСЕМ, має зустрічний напрям по

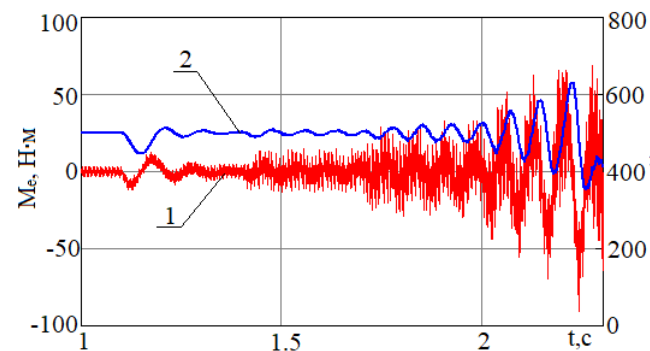


Рис. 8

супроводжуватися зростанням пульсації швидкості обертання ротора та його результуючого електромагнітного моменту з подальшим його "опрокиненням".

Експериментальне дослідження. Задля підтвердження адекватності досліджуваних електромагнітних та механічних процесів АСЕМП та точності чисельних розрахунків за запропонованою коло-польовою моделлю на базі кранового двигуна МТФ-111-6 виготовлено експериментальний зра-

Режим нормального збудження буде завжди виконуватися рівністю струмів $I_{зб}=I_{HX}$, так як кількість витків відносно АД частини АСЕМП дорівнює кількості витків його СГ частини, тобто $w_{AD} = w_{CG}$ незалежно від значення підведеної напруги U_{ϕ} до фазних ввідів якірної обмотки АСЕМП. Таким чином характеристики НХ АД та СГ частин АСЕМП будуть однаковими (ЕРС генератора дорівнює значенню напруги мережі $E_{CG}=U_{\phi}$) за синхронній каскадній швидкості обертання його ротора $n_k=const$. Таким чином для АСЕМП номінальне значення струму збудження $I_{зб,n}$ буде завжди визначатися дійсним значенням струму НХ $I_{HX,n}$ (за $U_{\phi,n}=U_{\phi,n}$).

В режимі незбудження та нормального збудження СГ частини АСЕМП реактивна складова струму ротора, як і реактивна складова струму якоря, буде компенсуватися, а залишкова наявність струмів якоря та ротора в режимі нормального збудження СГ

відношенню до електромагнітного моменту АД частини АСЕМП. При цьому будуть утворюватися автоколивальні процеси в системі фазних струмів якоря та ротора АСЕМП, що визвано почерговою перевагою двигунового та генераторного режимів роботи АСЕМП. А також це призведе до зростання пульсації результуючого електромагнітного моменту (1) та швидкості обертання ротора (2) АСЕМП (рис. 8). Таким чином, перехід до режиму перезбудження СГ частини АСЕМП під час його роботи в двигуновому режимі може визвати аварійний режим, що буде



Рис. 9

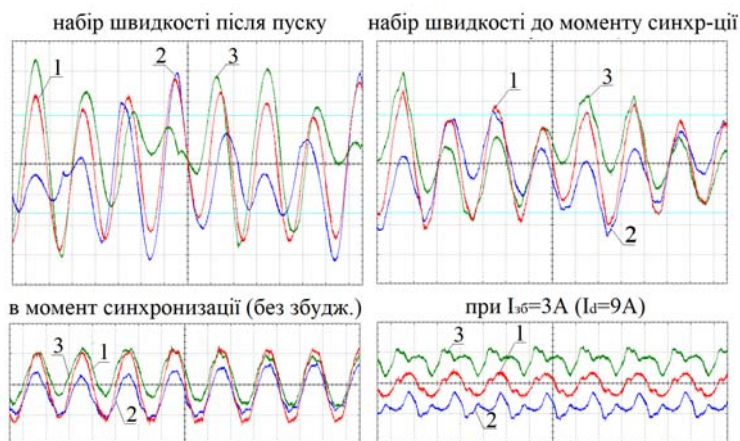


Рис. 10

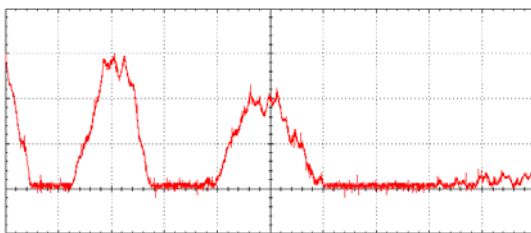


Рис. 11

який відсікає негативний півперіод i_{zp} . За появи та збільшення струму збудження $I_{зб}$ фіксується зменшення струму якоря (рис. 10, за $I_{зб}=3A$). Під час наступного збільшення $I_{зб}$ спостерігається поява пульсації швидкості обертання ротора з подальшим її зростанням, яка супроводжується вібрацією АСЕМП. Наступне збільшення $I_{зб}$ призводить до різкого зменшення швидкості з подальшим заклинюванням ротора. Проведено валідацію даних чисельного та фізичного експерименту АСЕМП. Нев'язка за амплітудними значеннями за основною гармонікою струмів якоря за фазами A, B, C в режимі НХ АСЕМП складає $\delta I_{я|A,B,C}=7,96\div 8,61\%$, струму якоря в котушкській групі першої паралельної гілки – $\delta I_{я|A1,B1,C1}=7,89\div 8,26\%$, другої – $\delta I_{я|A2,B2,C2}=7,89\div 8,26\%$. Нев'язка за струмом збудження в кожній з паралельних гілок фаз A, B, C в режимі КЗ АСЕМП – $\delta I_{зб,я|A,B,C}=3,11\div 3,31\%$. Таким чином, отримані результати дослідження підтверджуються результатами фізичного випробування експериментального зразка. Адекватність 2D коло-польової моделі та достовірність електромагнітних процесів в перехідному та усталеному режимі НХ АСЕМП підтверджується збігом кривих струмів отрима-

зок АСЕМП (рис. 9). В лабораторних умовах НУ "Запорізька політехніка" проведені фізичні випробування експериментального зразка АСЕМП (рис. 9). Під час випробування вводили якорної обмотки експериментального АСЕМП були під'єднані до вторинної обмотки регульованого автотрансформатора. Виводи трифазно-однофазної обмотки якоря (нульові точки «0-» та «0+») під'єднані до системи збудження, що представляє собою трифазний некерований випрямляч з регулюванням випрямленої напруги за допомогою ЛАТР. Для навантаження АСЕМП використовується двигун постійного струму (ДПС) типу ПЗ2 потужністю 3,2 кВт, вал якого механічно спряжено з валом АСЕМП за допомогою муфти. В режимі НХ АСЕМП спряження валу АСЕМП з ДПС відсутнє. Струми в фазах обмотки якоря, в її паралельних гілках, а також між нульовими точками вимірювалися за допомогою осцилографа типу OWON XDS3202E (рис. 9). Для фізичного зразка проведені випробування пуску АСЕМП в режимі НХ без збудження його СГ частини. Встановлена наявність асинхронного пуску АСЕМП з подальшим втягуванням ротора у синхронізм на каскадній номінальній синхронній швидкості $n=500$ об/хв. (швидкість обертання ротора

вимірювалася за допомогою безконтактного лазерного тахометра типу DT-2234C+). На рис. 10 наведені осцилограми загального струму якоря (1), струму якоря в першій (2) та другій (3) паралельних гілках котушкської групи фази A (при $U_{\phi}=54V$). На рис. 11 наведено осцилограму зрівняльного струму i_{zp} в процесі розгону та подальшого втягування ротора АСЕМП в синхронізм. Наявність тільки позитивного півперіоду i_{zp} пояснюється наявністю по контуру його замикання діодного моста,

них осцилограм за результатами чисельних розрахунків (рис. 3, рис. 5 – рис. 7) та фізичного експерименту (рис.10, рис. 11).

Висновки.

1. Запропоновано двовимірну коло-польову модель нестационарних електромагнітних та механічних процесів асинхронно-синхронного електромеханічного перетворювача, яка дає змогу встановити взаємозв'язок електромагнітних процесів у коловій та 2D польовій частинах моделі, врахувати особливості конструкції його обмоток якоря та ротора через їхню схемну реалізацію та забезпечити комутацію з елементами звичайних та напівпровідникових систем живлення. Адекватність моделі та достовірність електромагнітних процесів підтверджується результатами фізичного експерименту.

2. Вперше проведено дослідження електромагнітних та механічних процесів в режимі НХ за спільної взаємодії АД та СГ частин АСЕМП в двигуновому режимі його роботи. Встановлено, що АСЕМП мають самосинхронізуючі властивості, які забезпечують асинхронний пуск з подальшим втягуванням його ротора у синхронізм в режимі НХ без збудження його СГ частини. Незалежно від режимів роботи АСЕМП та швидкості обертання ротора, електромагнітні поля якоря та ротора обертаються за номінальною каскадною синхронною швидкістю, що забезпечується рівністю частоти струмів якоря та ротора $f_1=f_2$, а також кількістю їх фаз $m_1=m_2$. У випадках обертання ротора АСЕМП не на синхронній швидкості в обмотці якоря утворюється зрівняльний струм з частотою залежною від ковзання ротора $f_{зр.с.} = f_1 \cdot s$, наявність якого відображає розсинхронізацію ротора АСЕМП.

3. Вперше досліджено роботу СГ частини АСЕМП в режимах недозбудження, нормального збудження та перезбудження. Встановлено, що режим недозбудження СГ частини АСЕМП забезпечується за умови $I_{зб} < I_{НХ}$ (струм збудження не перевищує струм НХ), режим нормального збудження – за $I_{зб} = I_{НХ}$ (струм збудження дорівнює струму НХ), а режим перезбудження – за $I_{зб} > I_{НХ}$ (струм збудження перевищує струм НХ). В режимах недозбудження та нормального збудження СГ частина АСЕМП працює як синхронний компенсатор, а в режимі перезбудження – як генератор. Режим перезбудження СГ частини під час роботи АСЕМП в двигуновому режимі роботи є аварійним.

1. Попов В.И. Электромашинные совмещенные преобразователи частоты. М.: Энергия, 1980. 176 с.
2. Луцик В.Д. Суміщені електричні машини та апарати. К.: Техніка, 1993. 203 с.
3. Загрядцкий В.И. Совмещенные электрические машины. Основы теории. Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1971. 164 с.
4. Караваев В.Т. Бесконтактный совмещенный синхронный генератор. *Электричество*. 1990. № 11. С. 17-25.
5. Луцик В.Д., Іваненко В.С. Багатополюсні каскадні синхронні машини. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2011. Вип. 2. С. 121-123.
6. Луцик В.Д., Іваненко В.С., Борзів В.Л. Синхронний каскадний двигун з суміщеними обмотками. *Електротехніка і електромеханіка*. 2011. № 1. С. 31-32.
7. Луцик В.Д. Асинхронні двигуни з фазними роторами з каскадними властивостями при пуску. *Електротехніка і електромеханіка*. 2005. № 2. С. 39-41.
8. Луцик В.Д., Семенов В.В. Новый тип тихоходного асинхронно-синхронного двигателя. *Уголь України*. 2008. № 9. С.39-41.
9. Луцик В.Д. Перспективні напрямки удосконалення електричних машин: монографія. К.: ПрАТ Миронівська друкарня, 2015. 264 с.
10. Kotsur M., Yarymbash D., Kotsur I., Yarymbash S. Improving efficiency in determining the inductance for the active part of an electric machine's armature by methods of field modeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6. No 5 (102). Pp. 39-47. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185136>.
11. Васильковський Ю.М., Гайденок Ю.А. Дослідження електромагнітних процесів у синхронних машинах із постійними магнітами на основі коло-польових математичних моделей. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 2. С. 47-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2018.02.047>.
12. Sadowski N., Lefevre Y., Lajoie-Mazenc M., Cros J. Finite element torque calculation in electrical machines while considering the movement. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1992. Vol. 28. No 2. Pp. 1410-1413. DOI: <https://doi.org/10.1109/20.123957>.
13. Skalka M., Ondrůšek Č., Schreier L., Michailidis P. Torque components identification of induction machine by FEM. Proc. International Aegean Conference on *Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion*. Istanbul, Turkey, 08-10 September 2011. Vol. 1. Pp. 185-189. DOI: <https://doi.org/10.1109/АСЕМР.2011.6490592>.
14. Міліх В.І., Тимін М.Г. Порівняльний аналіз параметрів індуктора обертового магнітного поля при використанні концентричної і петльової обмоток. *Електротехніка і електромеханіка*. 2021. № 4. С. 12-18. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.02>.

STUDY OF ELECTROMAGNETIC AND MECHANICAL PROCESSES OF AN INDUCTION-SYNCHRONOUS ELECTROMECHANICAL CONVERTER IN IDLE MODE

M.I. Kotsur

National University "Zaporizhzhia Polytechnic",
Zhykovski str., 64, Zaporizhzhia, 69063, Ukraine.

E-mail: kotsur_m@ukr.net.

A two-dimensional circuit-field model of non-stationary electromagnetic and mechanical processes of an induction-synchronous electromechanical converter has been developed. It allows establishing the relationship between electromagnetic processes in the circuit and 2D-field parts of the model, taking into account the features of the construction of its armature and rotor windings through their schematic implementation, and ensuring switching with elements of conventional and semiconductor power systems. Electromagnetic and mechanical processes in idle mode have been investigated using numerical modeling methods, considering the combined interaction of the coupled induction and synchronous parts in a single active part of the electromechanical converters. The presence of self-synchronization properties for induction -synchronous electromechanical converters has been demonstrated, wherein asynchronous starting is provided with subsequent synchronization of its rotor into synchronism in idle mode without excitation, and the conditions for their occurrence are explained. The relationships between the idle current and excitation current have been established, determining the operation of the synchronous part of the induction-synchronous electromechanical converter in underexcited, normally excited, and overexcited modes. It has been proven that in underexcited and normally excited modes, its synchronous part operates as a reactive power compensator, while in the overexcited mode, it operates as a generator. Experimental studies confirm the adequacy and accuracy of numerical implementation, as well as the correspondence to electromagnetic processes during the operation of the induction-synchronous electromechanical converter in idle mode. References 14, figures 11.

Keywords: model, electromechanical converter, mode, synchronism, excitation current.

1. Popov V.I. Electric machine combined frequency converters. Moskva: Enerhiia, 1980. 176 p. (Rus)
2. Luschyk V.D. Combined electric machines. Basic theory. Kyiv: Tekhnika, 1993. 203 p. (Ukr)
3. Zahriadtskyi V.I. Combined electric machines. Fundamentals of the theory. Kyshynev: Kartia Moldoveniaske, 1971. 164 p. (Rus)
4. Karavaev V.T. Contactless combined synchronous generator. *Elektrychestvo*. 1990. No 11. Pp. 17-25. (Rus)
5. Luschyk V.D., Ivanenko V.S. Multipole cascade synchronous machines. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi systemy*. 2011. Vol 2. Pp. 121-123. (Ukr)
6. Lushchyk V.D., Ivanenko V.S., Borzik V.L. Synchronous cascade motor with combined windings. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. 2011. No 1. Pp. 31-32. (Ukr)
7. Luschyk V.D. Asynchronous motors with phase rotors with cascade properties at start-up. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. 2005. No 2. Pp. 39-41. (Ukr)
8. Luschyk V.D., Semenov V.V. A new type of low-speed asynchronous-synchronous motor. *Ugol Ukrainy*. 2008. No 9. Pp. 39-41. (Ukr)
9. Luschyk V.D. Prospective directions for improving electric machines: monograph. Kyiv: PrAT Mironivska drukarnia, 2015. 264 p. (Ukr)
10. Kotsur M., Yarymbash D., Kotsur I., Yarymbash S. Improving efficiency in determining the inductance for the active part of an electric machine's armature by methods of field modeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6. No 5 (102). Pp. 39-47. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185136>.
11. Vaskovskiy Ju.M., Haydenko Ju.A. Research of electromagnetic processes in permanent magnet synchronous motors based on a "electric circuit - magnetic field" mathematical model. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 2. Pp. 47-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.047>.
12. Sadowski N., Lefevre Y., Lajoie-Mazenc M., Cros J. Finite element torque calculation in electrical machines while considering the movement. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1992. Vol. 28. No 2. Pp. 1410-1413. DOI: <https://doi.org/10.1109/20.123957>.
13. Skalka M., Ondrůšek Č., Schreier L., Michailidis P. Torque components identification of induction machine by FEM. Proc. International Aegean Conference on *Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion*. Istanbul, Turkey, 08-10 September 2011. Vol. 1. Pp. 185-189. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACEMP.2011.6490592>.
14. Milykh V.I., Tymin M.G. A comparative analysis of the parameters of a rotating magnetic field inductor when using concentric and loop windings. *Elektrotekhnika i Elektrichestvo*. 2021. No 4. Pp. 12-18. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.02>.

Надійшла 28.01.2024
Остаточний варіант 15.03.2024