

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Головань Іван Васильович

**МАТЕМАТИЧНІ ЗАСОБИ ОПТИМІЗАЦІЙНОГО ПРОЕКТНОГО
СИНТЕЗУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА
З МОНОЛІТНИМ ОСЕРДЯМ (SOLID CORE)**

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини і апарати

Науковий консультант –
Попович Олександр Миколайович,
доктор техн. наук

Стратегії наукового пошуку при проектуванні електромеханічних систем на базі асинхронного двигуна

2



АД з монолітно-стальним осердям ротора

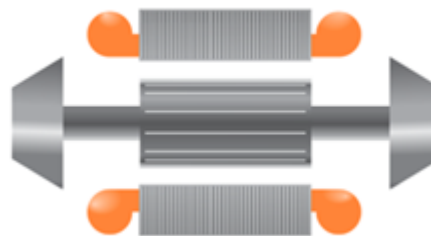
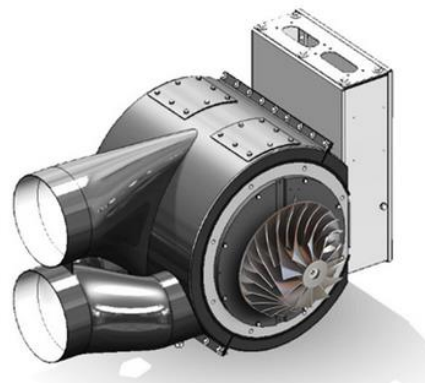
Характеризуються підвищеною міцністю конструкції, жорсткістю на вигин, здатністю витримувати високі відцентрові сили, зменшеною схильністю до вібрацій і шуму, більш простою, дешевшою конструкцією та технологією виробництва.

Застосування

- високошвидкісні електричні машини з прямим приводом, без механічної коробки передач, що дозволяє досягти більш високих швидкостей та високої енергоефективності.



- напівінтегровані машини, що включають компресор, турбіну або робоче колесо насоса, встановлене безпосередньо на валу електричної машини. Підшипникова система та динаміка ротора можуть бути розраховані та адаптовані до застосування.



- повністю інтегровані рішення. Для максимальної простоти системи, Switch пропонує вбудовані машини. Активні частини машини з монолітним ротором можуть бути повністю адаптовані до різних застосувань.



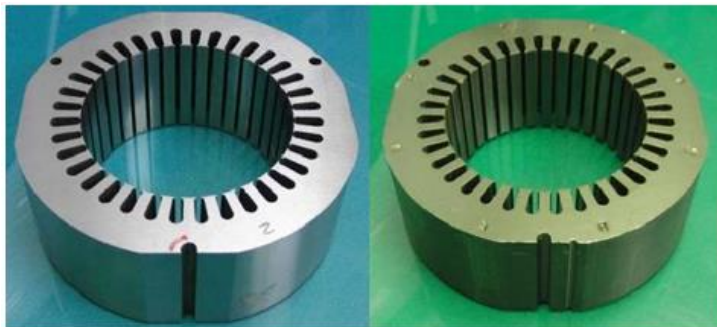
АД з магніто-м'яким композитним (SMC) матеріалом осердя статора

5

Характеризуються нижчим рівнем шуму і вібрації, можливість виробництва статора складної форми з високою точністю, вищою корозійною стійкістю, меншими гріючими втратами та затратами за виробництво

Застосування

В автомобільній промисловості в якості електричних тягових машин



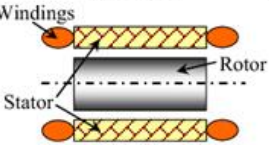
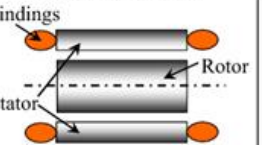
SMC core

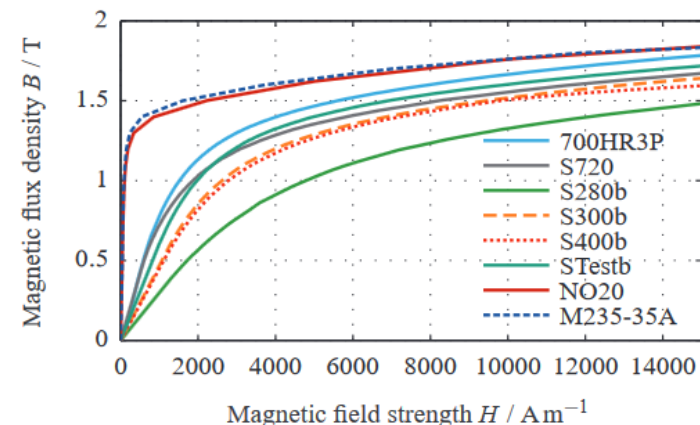
Laminated iron core

Appliance of stator cores



Composite stator of an induction motor made from SMC

MATERIAL COMPONENTS OF TWO MOTORS		
	SMC motor	Conventional motor
Structure		
Stator material	SMC	Electromagnetic steel
Rotor material	Electromagnetic steel	Electromagnetic steel
Rotor conductor	Aluminum	Aluminum



АД з магніто-м'яким композитним (SMC) матеріалом осердя статора та монолітно-стальним осердям ротора

6

Область застосування — в складі спеціалізованого обладнання електромеханічних систем переробної та транспортної галузей, комунального господарства та побуту.

Актуальність досліджень — завдяки використанню технологій гнучкого виробництва виникають нові можливості в частині конструювання АД з урахуванням особливостей умов конкретної експлуатації системи і, відповідно до них, застосуванню оптимальних конструктивних і параметричних рішень.

Покращення техніко-економічних показників досягається завдяки:

- покращенню електромагнітних характеристик магніто-м'яких композитних (SMC) та електротехнічних матеріалів;
- удосконаленню виготовлення елементів машини за технологіями порошкової і ливарної металургії;
- отримання синергетичних ефектів за результатами реалізації комплексного оптимізаційного проектного синтезу АД в складі електромеханічних систем, в тому числі з функціональним та конструктивним суміщенням їх елементів з робочими органами навантажувальних механізмів.

Актуальною задачею є покращення техніко-економічних показників АД з монолітним сердечником.

Наукова проблема полягає в реалізації оптимізаційного параметричного синтезу АД, зокрема монолітним осердям, за критеріями ефективності протікання електромагнітних і електромеханічних процесів і яка є основою створення інноваційних конструкцій АД з покращеними властивостями енергетичної і ресурсної ефективності, інтегрованості із іншими елементами електромеханічної системи.

Дана наукова проблема впливає з наявності протиріччя між адекватністю, адаптивністю та ресурсоемністю існуючих математичних засобів в контексті реалізації оптимізаційного проектного синтезу АД з монолітним осердям.

Об'єкт дослідження - процеси електромеханічного перетворення енергії у асинхронних двигунах з монолітним осердям

Предмет дослідження — математичні моделі, алгоритми, методи оптимізаційного проектного синтезу АД з монолітним осердям та методології розрахунку параметрів АД та комплексних критеріїв ефективності електромеханічних систем

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АД

8

КОЛОВА

Рівняння електричної і механічної рівноваги відносно змінних: струмів статора і ротора, кутової швидкості ротора

КОЛО-ПОЛЬОВА

Система диференціальних рівнянь відносно змінних: струмів в обмотках АД, векторного магнітного потенціалу, координати і кутової швидкості ротора

ПОЛЬОВА

Рівняння електромагнітного поля (Максвелла) відносно векторного магнітного

Ефективність використання при дослідженні режиму роботи АД з монолітним осердям в частині реалізації оптимізаційного проектного синтезу

Низько-ефективна в частині адекватності та адаптивності

Низько-ефективна в частині ресурсоемності

Низько-ефективна в частині ресурсоемності

З МЕТОЮ ВИРІШЕННЯ НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ РОЗРОБЛЕНО:

9

Параметрична коло-польова математична модель АД

Рівняння електромагнітного поля польової ММ
АД визначеного в частотній області

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \dot{A}_z \right) + j\omega\sigma\dot{A}_z = \dot{J}_{стор}$$

Рівняння колової ММ АД, які сформовано
відносно комплексних змінних

$$\begin{aligned} \dot{U}_s &= r_1 \dot{I}_s + j(x_1 + x_m) \dot{I}_s + jx_m \dot{I}'_r; \\ 0 &= \frac{r'_2}{s} \dot{I}'_r + j(x'_2 + x_m) \dot{I}'_r + jx_m \dot{I}_s, \end{aligned}$$

Сукупність рівнянь колової та польової ММ з врахуванням характеру зв'язку між їх змінними, що полягає у визначенні змінних систем рівнянь на кожному кроці їх послідовного розв'язку, можна класифікувати як слабкозв'язану

$$\begin{cases} par = f_1(|\dot{I}_s|, s) \\ |\dot{I}_s| = f_2(par, s) \\ s = f_3(par, |\dot{I}_s|) \end{cases}$$

Змінні: електромагнітні параметри $par = x_{1n}, x_m, r'_2, x'_2$
модуль часового комплекс струму статора $\dot{I}_s$
ковзання, s

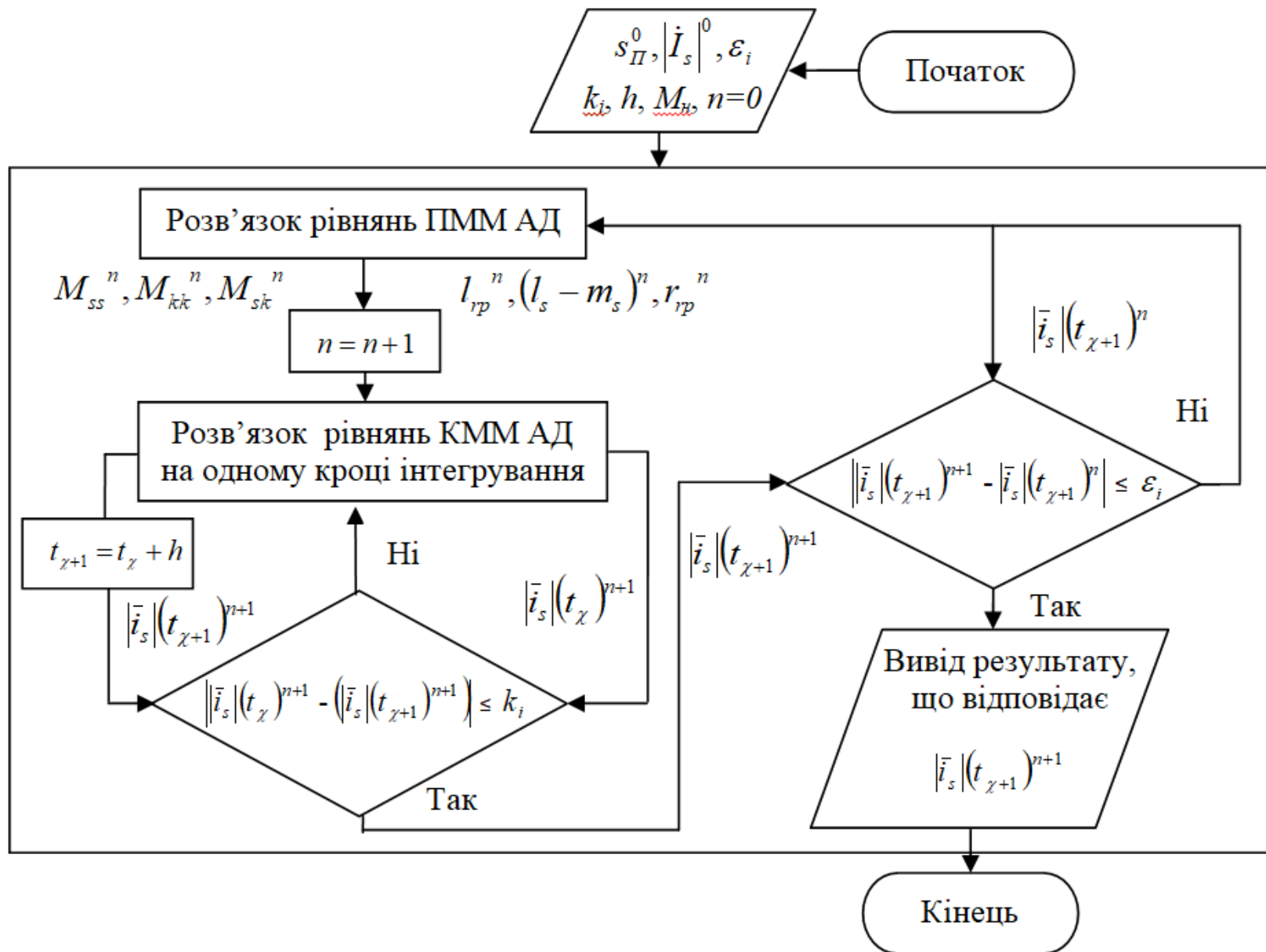
Ітераційний процес досягнення збіжності розв'язку рівнянь колової ММ АД та рівнянь польової ММ АД можна рахувати закінченим, як тільки будуть виконані нерівності:

$$\left| |\dot{I}_s|_n - |\dot{I}_s|_{n-1} \right| < \varepsilon_i \quad \left| s_n - s_{n-1} \right| < \varepsilon_s \quad \left| par_n - par_{n-1} \right| < \varepsilon_{par}$$

$\varepsilon_{par}, \varepsilon_i, \varepsilon_s$ – величина різниці між двома сусідніми значеннями наближень до шуканих значень електромагнітних параметрів, часового комплексу струму статора та ковзання рівнянь колової та польової ММ АД (похибка розв'язку рівнянь)

Алгоритм ітераційного розв'язку системи рівнянь слабкозв'язаної параметричної коло-польової математичної моделі АД

10



Методика розрахунку електромагнітних параметрів колової ММ та інтегральних характеристик АД з монолітним осердям

11

За результатами розв'язку рівнянь електромагнітного поля у вузлах дискретної сітки 2D та 3D розрахункової області польової ММ АД розраховуються електромагнітні параметри колової ММ АД з монолітним осердям

$$x_m = \frac{-(P_c + P_k)}{3sI_s I_r^I}; \quad r'_2 = \frac{P_c + P_k}{3|\dot{I}'_r|^2}; \quad x_{1n} = \frac{\omega_0 \operatorname{Re}(\dot{\psi}_s)}{\sqrt{2}I_s} - x_m \left(1 + \frac{I_r^R}{I_s}\right); \quad x'_2 = -x_m \left(1 + \frac{I_r^R I_s}{|\dot{I}'_r|^2}\right)$$

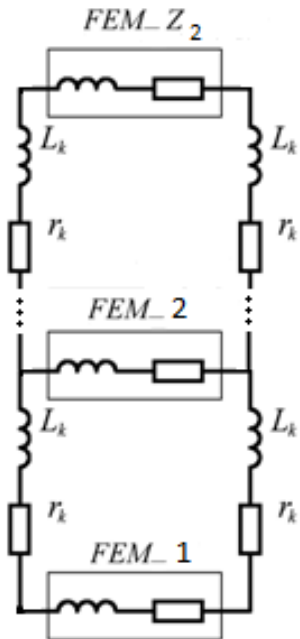
де $\dot{\psi}_s$ – перша симетрична складова амплітудних значень часових комплексів поточозчеплень фаз статора $\dot{\psi}_{si}$; P_c, P_k – потужності електричних втрат в стрижнях ротора та в обох ділянках кільця ротора; I_s – діюче значення струму статора (отримано через комплекс струму статора, який за умовами має тільки дійсну складову); I_r^R, I_r^I – дійсна та уявна складові комплексу струму ротора $\dot{I}'_r$ за робочою гармонікою з кількістю пар полюсів p зведеного до статора; x_{1n} – індуктивний опір пазового розсіювання статора.

Отримані вирази параметрів спираються на інтегральні характеристики 2D польової ММ АД з еквівалентними колами торцевих ділянок ротора

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_{si} &= \frac{2l_\delta W_s}{S_{si}} \int_{S_{si}} \dot{A} ds \\ P_c &= l_\delta \sum_{i=1}^{z_2} \left(\int_{S_{ci}} \frac{J_{mi}^2}{2\gamma_{c2}} ds \right) \\ I_{ci} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{S_{ci}} j_{mi} ds \\ P_k &= 2r_k \cdot \left(\frac{|\dot{I}_c|}{2 \sin(p\pi/z_2)} \right)^2 \\ \dot{I}_c &= e^{jp\delta_1} \sum_{i=1}^{z_2} \dot{I}_{ci} e^{j(i-1)p\delta_k} \\ \dot{I}'_r &= \frac{e^{jp\delta_1}}{6W_s K_{o\delta}} \sum_{i=1}^{z_2} \dot{I}_{ci} e^{j(i-1)p\delta_k}; \end{aligned}$$

де $\dot{I}_{mi}$ - поточне значення часового комплексу максимуму густини струму в межах області поперечного перерізу i -го стержня; $\dot{I}_{ci}$ - діючі значення часових комплексів струмів усіх стрижнів ротора ($i=1, \dots, z_2$), що визначено інтегруванням за площею провідника S_{ci} густини струму $\dot{I}_{mi}$; $\dot{I}_c$ - результуюче діюче значення часового комплексу струму стрижнів ротора; γ_{c2} - питома провідність матеріалу обмотки ротора; $K_{об}$ - обмотковий коефіцієнт; $\delta_k = 2\pi / z_2$ - кут між сусідніми стрижнями; r_k - активний опір ділянки кільця ротора; W_s - кількість витків фази статора; p - кількість пар полюсів; l_δ - довжина магнітопроводу машини.

Схема z_2 роторних контурів 2D розрахункової області польової ММ АД з еквівалентними електричними колами торцевих ділянок ротора



r_k, L_k - активний опір та індуктивність розсіювання ділянки короткозамкненого кільця ротора відповідно.

r_k, L_k визначаються за результатами розрахунку 3D розрахунково області польової ММ АД

$$r_k = \frac{P_c \cdot 2 \sin(pn / Z_2)}{|\dot{I}_c|}$$

$$P_c = \sum_{i=1}^{z_2} \left(\int_{V_{ci}} \frac{J_{mi}^2}{2\gamma_{c2}} dV \right) / l_\delta \Big/ Z_2$$

$$\dot{I}_{ci} = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{V_{ci}} j_{mi} dV \Big/ l_\delta$$

$$\dot{I}_c = e^{jp\delta_1} \sum_{i=1}^{z_2} \dot{I}_{ci} e^{j(i-1)p\delta_k}$$

L_k визначається шляхом наближення значення $\dot{I}_c$ в 3D до значення $\dot{I}_c$ в 2D розрахункової області польової ММ АД

Розрахунок робочого режиму роботи АД 4А80А2У3 за параметричною коло-польовою ММ

13

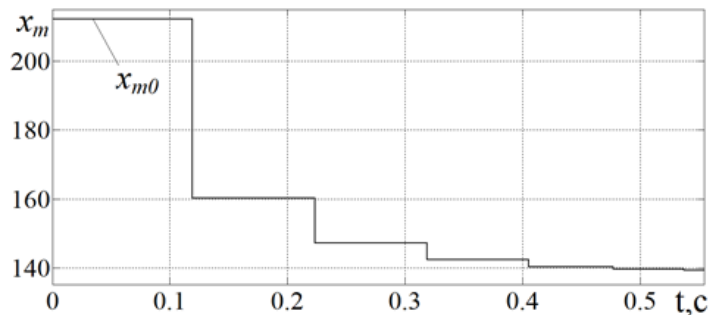


Рис.1.

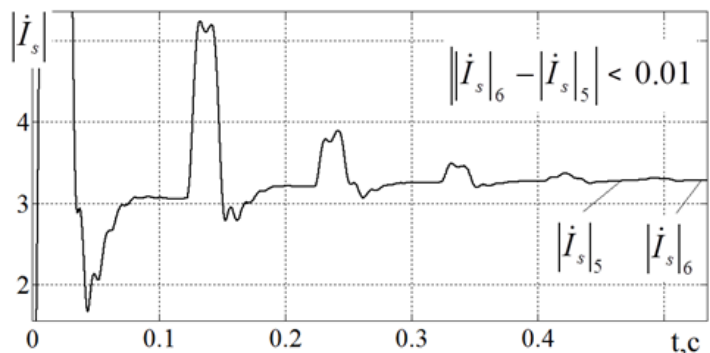


Рис.2.

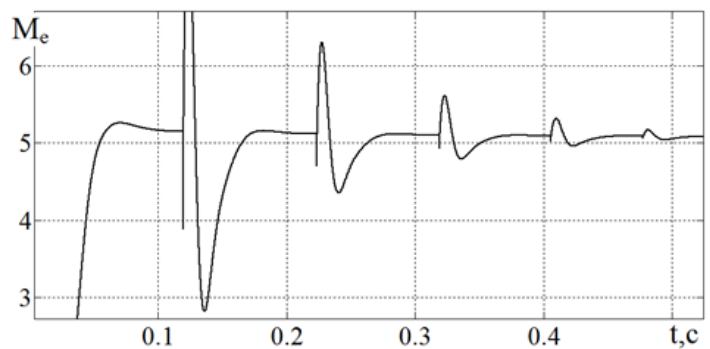


Рис.3.

Вхідні дані: $U=220V$, $s=0.042$, $|\dot{I}_s|_0 = 1.0 A$ $\varepsilon_i = 0.01$

Отримані значення електромагнітних параметрів:

$(x_1)_6 = 2.42 \Omega$, $(x_m)_6 = 139 \Omega$, $(r'_2)_6 = 3.095 \Omega$, $(x'_2)_6 = 4.857$

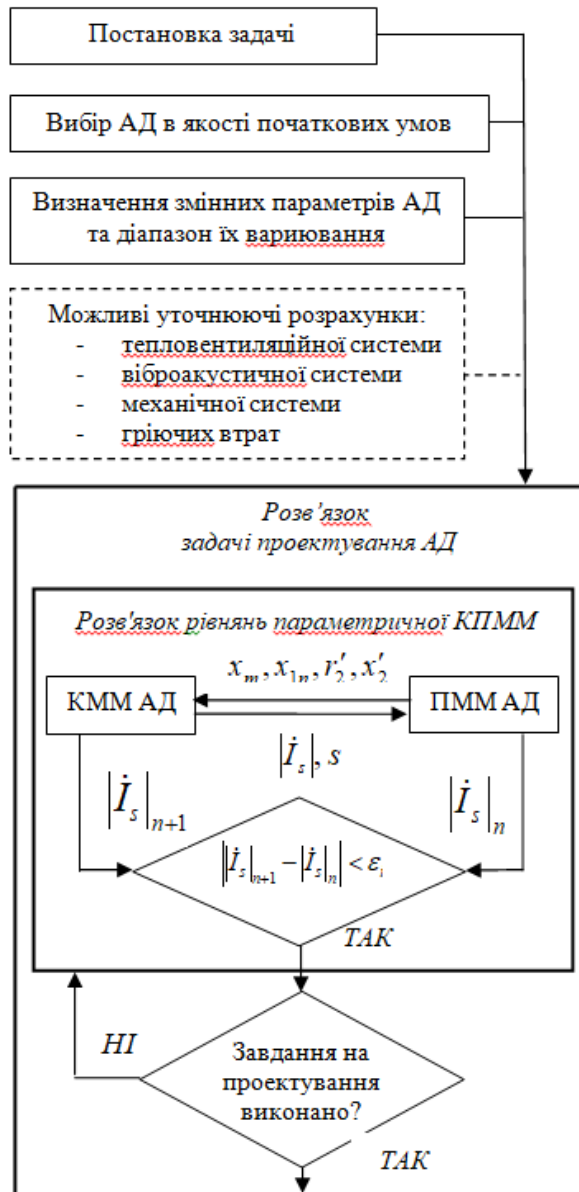
З виконанням, на 6 циклі розв'язку рівнянь, умови $||\dot{I}_s|_n - |\dot{I}_s|_{n-1}| < \varepsilon_i$ розрахунок припиняється з фіксацією отриманого електромагнітного моменту M_e

Співставлення отриманих характеристик робочого режиму: $I_s = 3.28A$, $M_e = 5.087 H \cdot m$, $\eta = 81.1\%$, $\cos\varphi = 85.2\%$ з каталоговими даними $I_s = 3.3A$, $M_e = 5.1 H \cdot m$, $\eta = 81\%$, $\cos\varphi = 85\%$ свідчить про високу адекватність представленої параметричної коло-польовою ММ АД.

За 0.55с модельного часу було знайдено розв'язок рівнянь параметричної коло-польової ММ АД 4А80А2У3, що на процесорі Ryzen 2200 (3.5GHz) зайняло близько 5.7хв фізичного часу.

Ітераційний метод оптимізаційного проектного синтезу АД за параметричною коло-польовою ММ

14



Згідно з алгоритмом ітераційного методу оптимізаційного проектного синтезу АД пошук розв'язку задачі проектування АД зводиться до багатократного розрахунку його режиму роботи. Кількість розрахунків режиму роботи за параметричною коло-польовою ММ АД визначається розв'язком задачі проектування за вибраним алгоритмом його пошуку. Вибір алгоритму пошуку залежатиме від постановки задачі до проектування.

Реалізації алгоритму пошуку розв'язку задачі проектування передус: визначення постановки задачі; вибір АД в якості початкових умов; визначення змінних параметрів АД та діапазону їх варіювання; можливих уточнюючих розрахунків тепловентиляційної, віброакустичної, механічної систем, гріючих втрат тощо.

За результатами польового аналізу, розроблений спосіб визначення і математичного представлення зв'язку параметрів заступної схеми асинхронного двигуна з його конструктивними і режимними параметрами.

Для цілей оптимізаційного проектного синтезу АД, за даним способом створено поліноміальну математичну модель системи електромагнітних параметрів узагальненого асинхронного двигуна, яка в сукупності з коловою математичною моделлю асинхронного двигуна є аналогією польової математичної моделі

$$Y_1 = B_{01} + B_{11}X_1 + \dots + B_{n1}X_n + \dots + B_{121}X_1X_2 + \dots + B_{n-1,n,1}X_{n-1}X_n + \dots + B_{111}X_1^2 + \dots + B_{nn,1}X_n^2 + \dots$$

$$Y_2 = B_{02} + B_{12}X_1 + \dots + B_{n2}X_n + \dots + B_{122}X_1X_2 + \dots + B_{n-1,n,2}X_{n-1}X_n + \dots + B_{112}X_1^2 + \dots + B_{nn,2}X_n^2 + \dots$$

$$Y_m = B_{0m} + B_{1m}X_1 + \dots + B_{nm}X_n + \dots + B_{12m}X_1X_2 + \dots + B_{n-1,n,m}X_{n-1}X_n + \dots + B_{11m}X_1^2 + \dots + B_{nnm}X_n^2 + \dots$$

де $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ – параметри заступної схеми АД; $X_1, X_2, \dots, X_n$ – конструктивні та режимні параметри; $B_{0m}, B_{1m}, \dots, B_{nm}, \dots, B_{12m}, \dots, B_{n-1,n,m}, \dots, B_{11m}, \dots, B_{nnm}$ – коефіцієнти степеневого ряду.

$$x_m = 101.4502 + 39.9504 \cdot s - 34.0767 \cdot I_s + 15.1169 \cdot s^2 + 5.0412 \cdot I_s^2 - 18.2837 \cdot s \cdot I_s$$

$$x_{1n} = 2.4363 + 0.0455 \cdot s - 0.1144 \cdot I_s + 0.0012 \cdot s^2 + 0.0124 \cdot I_s^2 + 0.0092 \cdot s \cdot I_s$$

$$r_2' = 3.0987 + 0.0014 \cdot s - 0.0007 \cdot I_s + 0.0009 \cdot s^2 + 0.0002 \cdot I_s^2 - 0.0009 \cdot s \cdot I_s$$

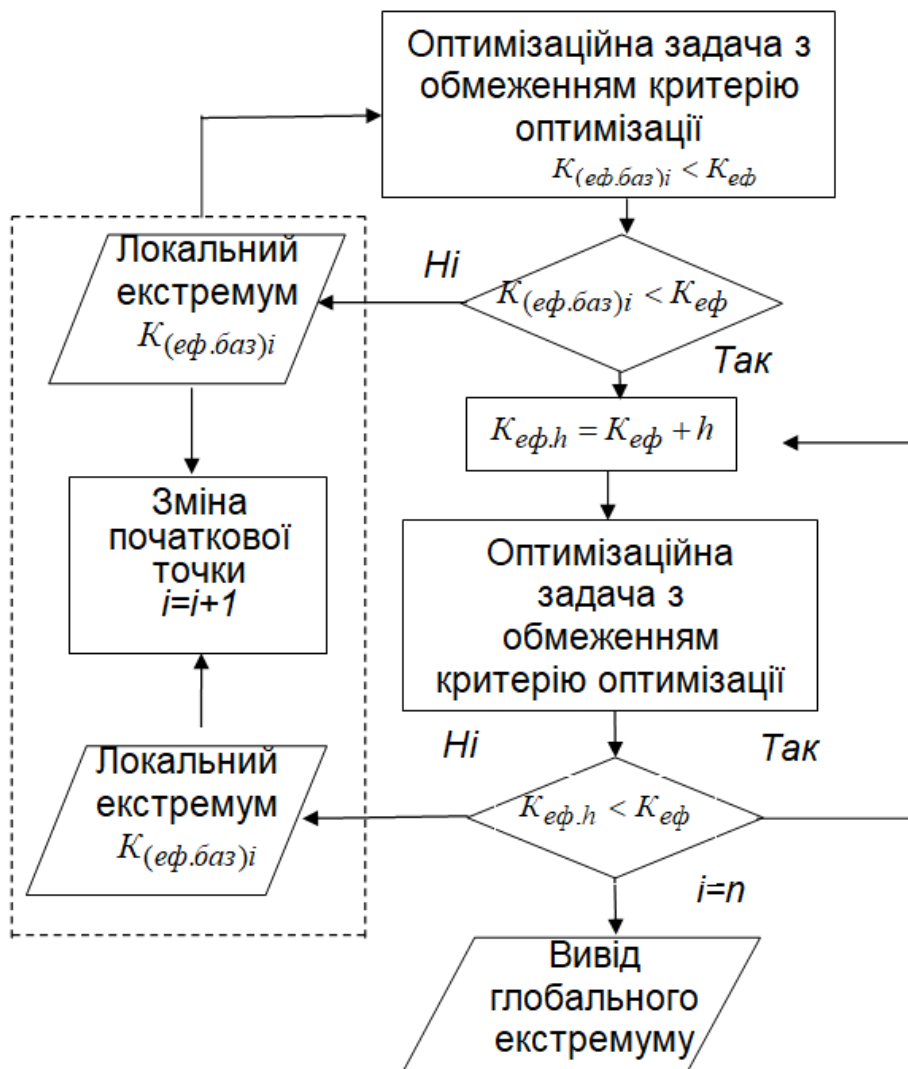
$$x_2' = 4.6109 + 0.1651 \cdot s - 0.2574 \cdot I_s + 0.1438 \cdot s^2 + 0.0322 \cdot I_s^2 - 0.1668 \cdot s \cdot I_s$$

Ступінь адекватності поліноміальної ММ системи електромагнітних параметрів АД на прикладі порівняння результатів розрахунку номінального режиму роботи АД 4А80А2У3 з її використанням, з результатами отриманих за коло-польовою ММ АД та каталоговими даними

Параметри режиму роботи	Дані за каталогом	З урахуванням $P_s, r_{1л}, x_{1л}, k_{st}$		Без урахуванням $P_s, r_{1л}, x_{1л}, k_{st}$		
		Поліноміальна ММ системи параметрів АД	$\Delta, \%$	Розрахунок за коло-польовою ММ АД	Поліноміальна ММ системи параметрів АД	$\Delta, \%$
I_s, A	3.3	3.298	0	3.3	3.3	-
η	0.81	0.814	0.5	-	0.854	-
$\cos\phi$	0.85	0.841	1.0	-	0.833	-
$M, H \cdot m$	4.98	4.98	-	5.38	5.35	0.5

Ітераційний метод оптимізаційного проектного синтезу АД в складі ЕМС за поліноміальною ММ системи електромагнітних параметрів узагальненого АД

17



Модифікація алгоритму знаходження глобального екстремуму, що ґрунтується на організації руху пошуку за маршрутом покрокового знаходження зростаючого локального екстремуму

Для реалізації оптимізаційного проектного синтезу АД в складі електромеханічної системи запропонована математична модель АД, що представляє собою сукупність системи рівнянь електричної рівноваги колової ММ та системи алгебраїчних рівнянь поліноміальної ММ електромагнітних параметрів узагальненого АД

Метод планування експерименту з вкладеним ортогональним центрально-композиційним планом

Розроблений план є модифікацією ортогонального центрально-композиційного плану. Характеризується попарною кількістю заданих незалежних змінних, більшою кількістю необхідних експериментів але з отриманням більш якісної апроксимуючої поверхні відгуку

Ефективний у формуванні поліномів для розрахунку режиму роботи АД у всьому діапазоні ковзання за поліноміальною ММ системи електромагнітних параметрів узагальненого АД.

$$u(1) - D_{вн} \quad u(2) - H_{п.ротора}, \quad u(3) - s, \quad u(4) - I_s$$

$$\begin{aligned} x_1 = & (6.0393 + 2.8238*u(3) + (-1.7976)*u(4) + (-0.84961)*u(3)^2 + (-0.37529)*u(4)^2 + \\ & 0.1905*u(3)*u(4)) + u(1)*(-0.20647 + 0.21529*u(3) + (-0.32023)*u(4) + (-0.19801)*u(3)^2 + \\ & 0.0181*u(4)^2 + 0.035666*u(3)*u(4)) + u(2)*(0.09795 + (-1.1561)*u(3) + \\ & (-0.27387)*u(4) + 0.29927*u(3)^2 + (-0.063473)*u(4)^2 + 0.30594*u(3)*u(4)) + u(1)^2*(- \\ & 0.0495 + (-2.3545)*u(3) + 0.11303*u(4) + 1.3545*u(3)^2 + (-0.31117)*u(4)^2 + \\ & 0.097159*u(3)*u(4)) + u(2)^2*(-0.12675 + 0.59901*u(3) + 0.42453*u(4) + (-0.4806)*u(3)^2 + \\ & 0.34363*u(4)^2 + (-0.13243)*u(3)*u(4)) + u(1)*u(2)*(-0.074725 + (-0.46399)*u(3) + \\ & 0.50822*u(4) + 0.15561*u(3)^2 + 0.13206*u(4)^2 + 0.010319*u(3)*u(4)) \end{aligned}$$

Критерій енергетичної ефективності АД підйомно-транспортних механізмів

$$k_{eef} = mgH / \left[\int_0^{t_s} P_1 dt + \int_{t_s}^{t_c} P_1 dt \right]$$

t_s, t_c – час пуску і циклу аналізу процесів

$$k_{eef} = \frac{m_l g H}{\frac{P_{1s.up}(H - h_{s.up})\omega_{rN}}{\omega_{rs.up} v_{lN}} + \int_0^{t_{s.up}} p_{1up} dt + \frac{P_{1s.d}(H - h_{s.d})\omega_{rN}}{\omega_{rs.d} v_{lN}} + \int_0^{t_{s.d}} p_{1d} dt}$$

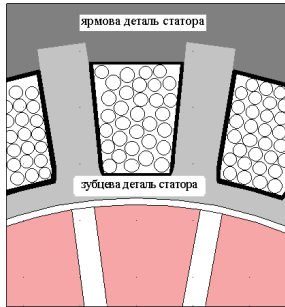
up – позначається етап підйому вантажу

d – етап спуску порожньої кабіни підйомника

$$p_1 = u_{AC} \cdot i_A + u_{BC} \cdot i_B \quad - \text{миттєва потужність за період пуску}$$

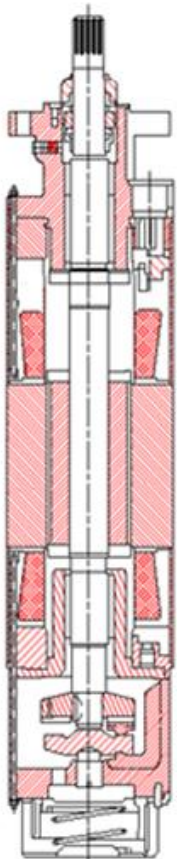
Оптимізаційний параметричний синтез зануреного АД з магніто-м'яким композитним матеріалом осердя статора та монолітно-стальним осердям ротора

20



Особливості конструкції

- суцільний магнітопровід статора з закритими пазами виготовлений по технології порошкової металургії з магнітно-м'якого композиту Somaloy 130i 5p (електричний опір $20000 \mu\Omega\text{m}$ та магнітною характеристикою на рис. Завдяки суцільній конструкції магнітопроводу статора зменшується не магнітний проміжок у порівнянні з традиційною конструкцією, спрощується збірка конструкції АД з підвищенням технології укладки обмотки та перехід на технологію безвідходного виробництва магнітопроводу.
- суцільний масивний феромагнітний ротор з прорізами виготовлений із сталі Ст3 (електричною провідністю $\gamma=5\text{e}6 \text{ Ом/м}$) та короткозамкненими мідними кільцями. В суцільному феромагнітному масиві ротора спостерігається суміщення магнітопроводу та струмопроводу, можливість розширення площі перерізу протікання магнітного потоку через умовний вал масивного ротора, підвищення жорсткості конструкції на вигин із здатністю витримувати високі відцентрові сили та термоциклювання.
- відсутність, на відміну від серійної конструкції АД, ізолюючої труби в розточці статора та наявність суцільного пазового містка в конструкції магнітопроводу статора мінімізує наявність додаткових втрат від вищих гармонік поля.



- Критерій оптимізації

- $\max \text{ККД}$
- Умова оптимізації

- $P_{\text{зр}}=690\text{кВт}$ - допустимі за нагрівом втрати що відповідають гріючим втратам серійної машини

Параметри оптимізації

-

Конструктивні параметри		Діапазон зміни параметрів	Серійний двигун	Оптимізований за критерієм максимуму ККД
h_z	Глибина прорізів (м)	$0.02 \leq h_z \leq 0.034$	-	0.020
z	Кількість прорізів	32, 42, 64	-	42
b_z	Ширина прорізів (м)	$0.0005 \leq b_z \leq 0.0012$	-	0.000587
H_j	Висота ярма статора (м)	$0.0105 \leq H_j \leq 0.02$	0.011	0.017
R	Радіус розточки (м)	$0.023 \leq R \leq 0.035$	0.0345	0.028
W	Кількість витків	$15 \leq W \leq 30$	25	17
$D_{\text{пр}}$	Діаметр проволки (м)	$0.00085 \leq D_{\text{пр}} \leq 0.00138$	0.00104	0.0019

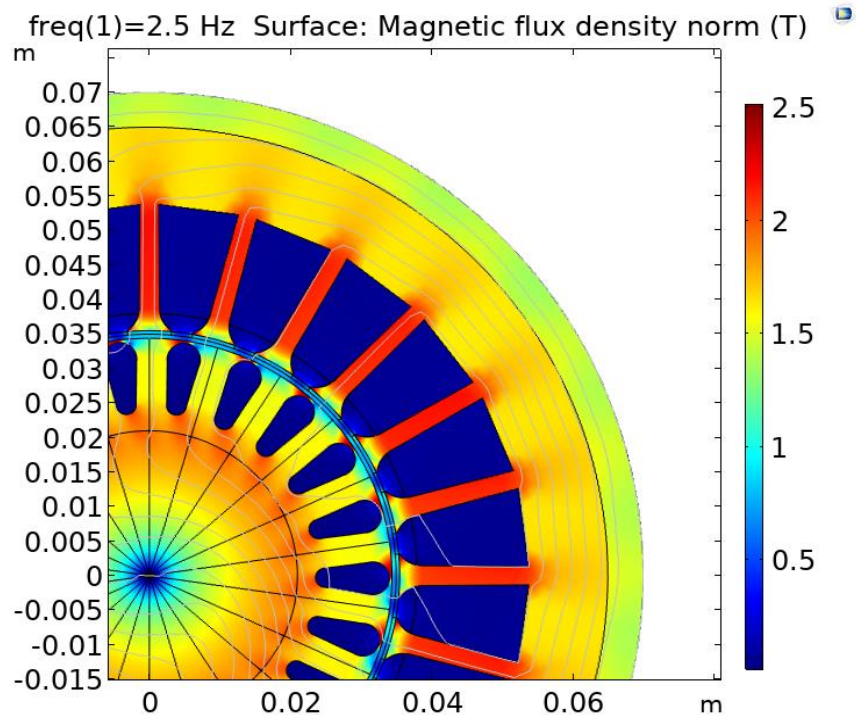
Для визначення глобального екстремуму здійснювався пошук локальних екстремумів за різних початкових умов. Повний час пошуку одного з локальних екстремумів, за функцією fmincon (мінімізації з обмеженнями) інструментарію пакета Optimization Toolbox системи Matlab, на процесорі Ryzen 5 тривав 12÷20 год. Повний час з визначення глобального екстремуму становив близько 400 год.

Конфігурація оптимізованої конструкції АД за критерієм максимуму ККД

22

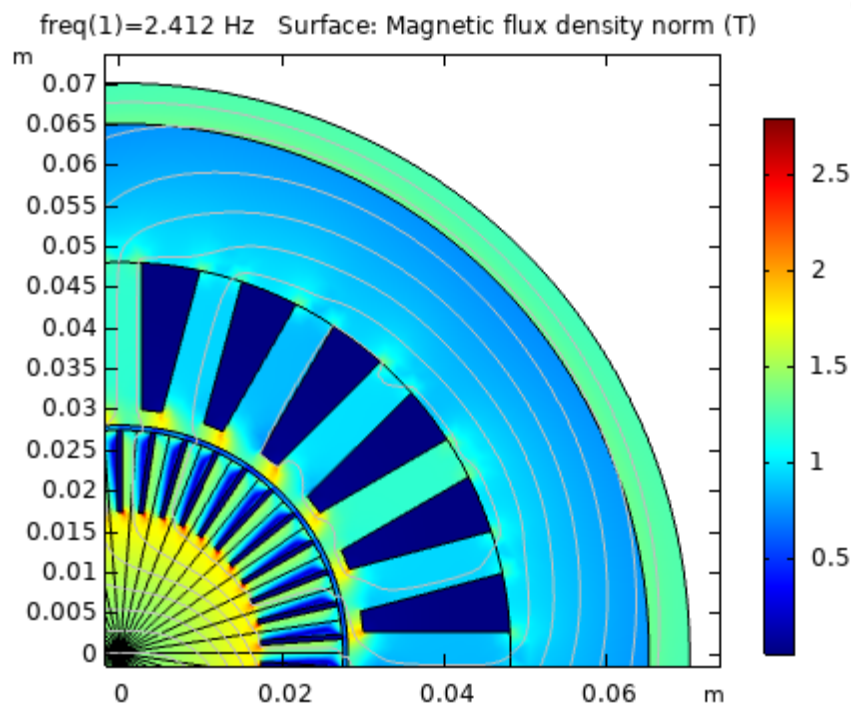
Режимні параметри	Серійний двигун	Оптимізований за критерієм максимуму ККД
Електромагнітний момент (Nm)	10.3	10.3
ККД (%)	74.5	80.0
cos φ	0.83	0.45
Струм робочого режиму(A)	6.9	11.7
Струм пускового режиму (A)	41	52
Пусковий момент на валу (Nm)	28	52
Гріючі втрати (W)	690	510
Механічні втрати (W)	267	182
Втрати в сталі (W)	180	103
Додаткові втрати від вищих гармонік поля (W)	19	≈0
Втрати в обмотці статора (W)	328	185
Застосування компенсатора реактивної потужності		
Ємність (μF)	20	45
Струм робочого режиму (A)	5.8	5.5
ККД (%)	74.5	80.0
cos φ	0.99	0.98
Струм пускового режиму (A)	38	44
Електромагнітний момент (Nm)	28	52

Конфігурація конструкції серійного зануреного АД



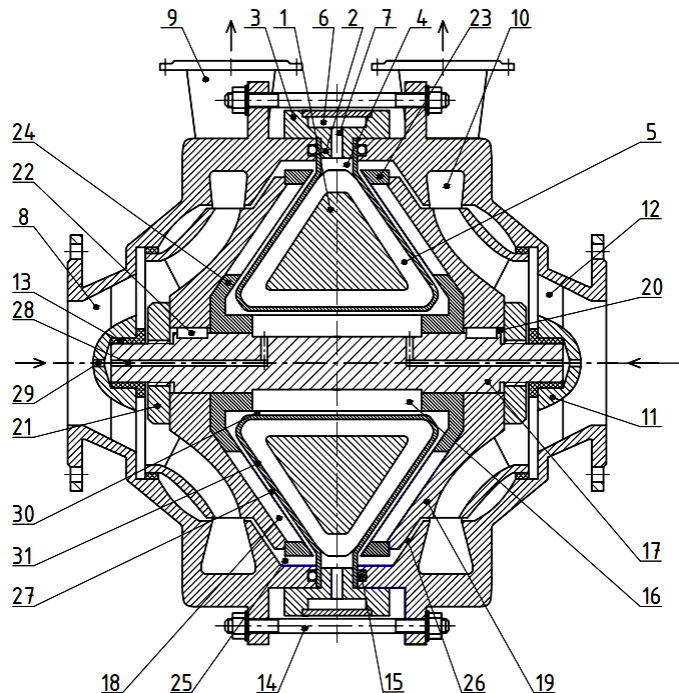
Конфігурація оптимізованої конструкції зануреного АД з магніто- м'яким композитним матеріалом осердя статора та монолітно-стальним осердям ротора

23



- збільшення ККД з 74.5% до 80%;
- збільшення відношення кратності пускових моменту і струму у 2,3 рази;
- зменшення у 2 рази маси ротора з 7.4 до 3.6 кг.

Насосний агрегат двостороннього входу з інтегрованим АД з монолітним осердям та тороїдним статором з композитного матеріалу



Технічний засобів напірного електроприводного переміщення рідин. Герметичний відцентровий насосний агрегат з вбудованим електродвигуном і інтеграцією його елементів з елементами насоса. Може використовуватися для перекачування різних рідин, наприклад, в системах водопостачання, технологічних лініях промислового виробництва та інших системах з високою вимогою до їх надійності та економічності.

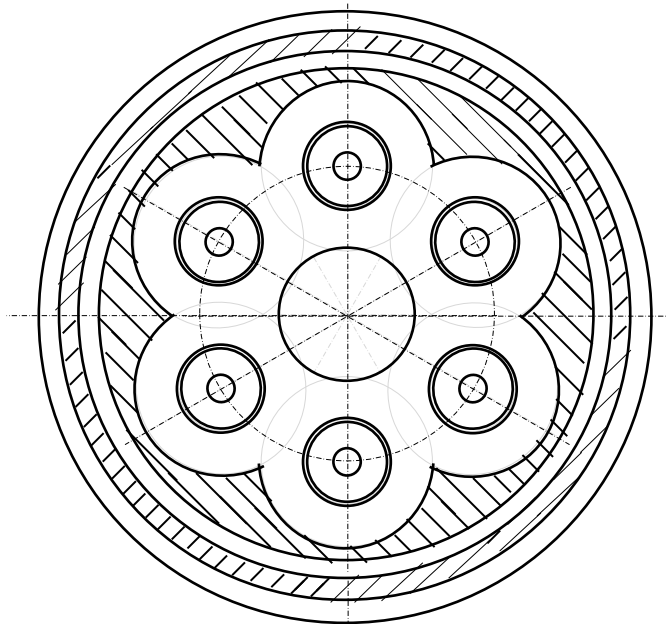
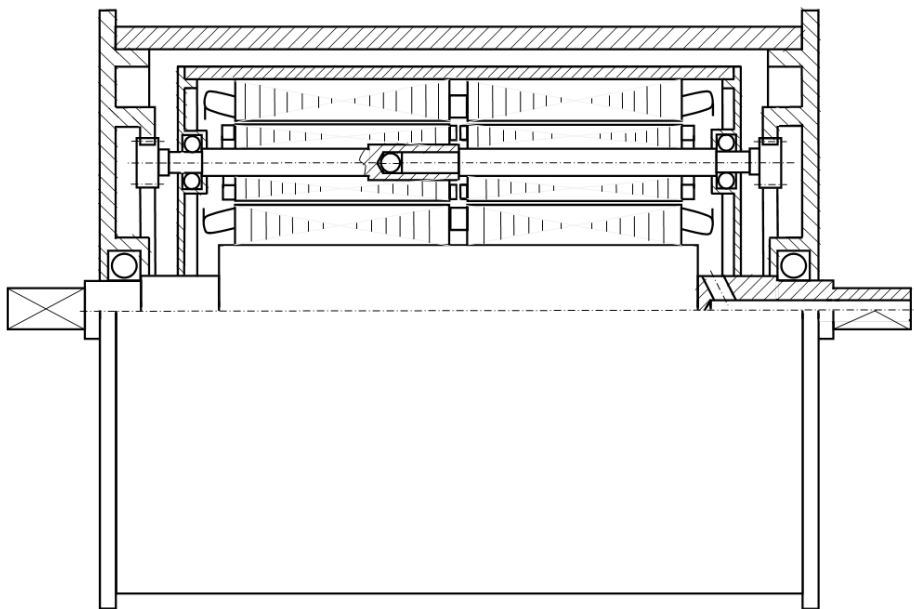
Мета досліджень: покращення ККД та питомих масо-габаритних показників, спрощення технології виготовлення і складання, покращення умов охолодження

Багатомашинна електромеханічна система мотор-редуктор-барабана на базі АД з монолітним осердям

25

Мета досліджень: створення ефективних одноступеневих редукторів із великим передавальним відношенням, з можливістю отримання оптимального співвідношення діаметру і довжини шестерні для мінімізації її масо-габаритних показників

Вбудована конструкція забезпечує ефективну передачу рушійного моменту (з мінімізацією проміжних конструктивних елементів) до робочих органів механізмів, які виконують обертовий рух: колеса, барабани, вітрові турбіни,



Комплексний параметричний синтез АД електромеханічної системи підйомно-транспортного механізму за поліноміальною ММ системи електромагнітних параметрів.

26

Для комплексного дослідження та проектування електромеханічних перетворювачів енергії, що працюють у складі електромеханічних систем в умовах змінного навантаження, їх математичні моделі повинні враховувати особливості режимів експлуатації, забезпечувати спільний аналіз електромагнітних і електромеханічних процесів з урахуванням нелінійності електромагнітних параметрів і магнітних втрат, навантаження, системи керування і адекватно відображати робочі режими і реалізовувати технологічні вимоги щодо зміни параметрів керування.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!