

УДК 621.316.13

РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО ДЕМПФЕРУ

- ТАТАРЧУК Т.В. канд. техн. наук, доцент кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: tanko.ho1@gmail.com;
- ГАВРОВ А.І. студент гр. Е-127сп Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: lordbusya@gmail.com
- МАСЛОВ С.О. студент гр. Е-127сп Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: ser.maslov.97@gmail.com

Мета роботи. Дослідити залежність магнітних властивостей матеріалу від його хімічного складу, що отриманий за різного тиску при певних температурах. На основі певного складу та властивостей цього матеріалу дослідити, як змінюються його робочі точки та втрати на перемагнічення, що в свою чергу впливатиме на конструкційні та експлуатаційні особливості магнітного демпфера двигуна.

Методи дослідження. Вибір екстремумів функції залежності енергії магніту від індукції та напруженості через диференціювання виразу, розрахунок робочих точок магніту методом підбіру та за допомогою середовища MathCad, визначення енергії перемагнічення через інтегрування петлі гістерезису, аналітичний розрахунок магнітних сил у магнітному демпфері, використовуючи формули з дослідів демпферних опор Бекерса.

Отримані результати. У ході виконання поставленого завдання було визначено робочі точки петлі гістерезису магніту, у яких магнітна енергія найбільша шляхом диференціювання виразу залежності енергії магніта від індукції та напруженості. На основі цих даних було виявлено максимальну магнітну індукцію та коефіцієнт сили магнітного поля у цих точках. Ці точки характеризують найбільшу питому енергію магніта, яку надалі використовують за призначенням. Далі, спираючись на петлю гістерезису, шляхом інтегрування було знайдено енергію втрат на перемагнічення магніту. За цими даними було розраховано розвантажуючу силу магнітного демпфера.

Наукова новизна. Було проведено більш точний аналіз магнітних процесів у магнітних матеріалах за допомогою математичного апарату, з використанням програмних середовищ, такі як MathCad, OriginLaB. Проаналізована залежність магнітних властивостей матеріалу від його хімічного складу, енергії та втрат, що в свою чергу робить більш ефективним використання постійного магніту у техніці, апаратах та машинах.

Практична цінність. За отриманими результатами розрахунку енергії втрат та робочих точок магніту визначається оптимальний хімічний склад, його геометричний розмір, що дозволяє знизити втрати на виробництво, зекономити матеріали при цьому підвищити корисну дію магнітного матеріалу у конструкції двигунів. При цьому збільшується експлуатаційний строк роботи машин, їх надійність. Оптимальні розміри магнітів в обмотках забезпечують потрібні повітряні проміжки, що в свою чергу через відсутність тертя зменшують втрати, що збільшує розвантажуючу силу.

Магнітні матеріали; петля гістерезису; робоча точка; енергія втрат; магнітний демпфер; магнітна індукція, розвантажувальна сила, індукція насичення, напруженість, коерцитивна сила.

I. ВСТУП

У авіаційній промисловості основною метою розробників турбореактивних двигунів є створення високо-економічних і надійних, з низькою питомою вагою силових установок. Ресурс і надійність сучасних машин з елементами, що обертаються, значною мірою залежить від рівня вібрацій, довговічності підшипників, величини динамічних навантажень, що викликані дисбалансом роторів. Однією з причин, яка викликає підвищений рівень вібрацій на авіаційному двигуні, є підвищений дисбаланс ротора (або роторів), який може привести до збудження однієї або декількох критичних швидкостей власних коливань ротора, а також викликати резонансні явища в опорній конструкції [1], [3], [6]. Найбільш ефективним засобом зниження рівня вібрацій та динамічних навантажень у

вузлах двигунів є застосування демпферних опор. Опори роторів – це окремі модулі, які входять до конструктивно-силової системи двигуна. Конструкції демпферних опор доволі різноманітні, але незалежно від цього їм притаманні наступні основні функції: знижувати жорсткість опори ротора, що призводить до зміни пружної динамічної системи двигуна (при цьому знижуються частоти власних коливань системи, усуваються резонанси на робочих режимах) та поглинати енергію коливань динамічної системи двигуна, перетворюючи її на тепло, що не дозволяє розвиватись великим амплітудам коливань, динамічним навантаженням та напруженням у деталях двигуна.

На ДП «Івченко-Прогрес» при доведенні двигуна Д-436Т1 (проведення спеціальної перевірки по колесу вентилятора) при оборотах вентилятора 5900...6100

об/хв виникали підвищені вібрації двигуна на частотах ротора внаслідок резонансних коливань валу вентилятора. Ці коливання викликали вигин вала вентилятора і торкання його о статорні і роторні деталі компресора низького тиску. Зміна конструкції вала вентилятора для усунення резонансу було неможливою. Добалансировка колеса вентилятора та наявний в конструкції вентилятора пружно-масляний демпфер не забезпечували усунення резонансу. Для вирішення вищезгаданої проблеми спільно з ДП «Івченко-Прогрес» згідно договору про співробітництво була поставлена задача щодо розробки конструкції такого демпфера, яка дозволяла б у наявних геометричних розмірах не змінювати технологію складання двигуна та забезпечувала працездатність двигуна на всіх режимах роботи.

Для вирішення поставленої задачі необхідно використовувати математичний апарат та моделювання, за допомогою яких можна досить точно дослідити характеристики магнітного матеріалу. Збільшення коерцитивної сили, надасть змогу отримувати вищі робочі точки, у яких питома енергія магніту найбільша. Більші робочі точки надають змогу отримувати більше енергії від експлуатації постійного магніту. Відповідно, якщо знати максимуми робочого діапазону цих матеріалів то можливо досягти зменшення габаритів самого магнітного матеріалу в конструкції устаткування чи приладу. Це призведе до економії на матеріалах, та зробить їх виробництво більш ергономічно вигідним та дешевшим. У свою чергу зменшення габаритів призведе до розвитку таких галузей, як: нанотехнології, робототехніка та мікропроцесорна техніка. Окрім цього при розрахунку робочих точок магніту, аналізу залишкової індукції та коерцитивної сили можна досягти зменшення втрат на перемагнічування. Також можливо розробити способи подовження строку експлуатації магнітних матеріалів та зберігання у них залишкової індукції без перемагнічування.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДІВ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

З розвитком авіабудування, конструювання двигунів турбін тощо розглядалися питання модернізації та підвищення їх надійності. В науково-освітніх закладах, конструкторських бюро були поставлені питання поліпшення авіадвигунів, насамперед їх вібростійкості різними методами у тому числі і демпферуванням. Є видання таких авторів як: Пономарев Ю.К., Пронічев Ю.Н., Чегодаєв Д.Є., Кирилин А.Н., Вершигоров В.М., роботи та книги цих авторів присвячені темі демпферування двигунів літальних апаратів. У них розглядалися важливі питання застосування багато- та одношарових демпферів, демпферів з гофруванням, досліджувалось гідродинамічне демпферування, конструкційні особливості демпферів, тощо. А питанням саме магнітних властивостей, хімічного складу приділялось мало уваги. Не був знайдений зв'язок між магнітними властивостями та складом

магніту, що використовується для виготовлення демпферних обмоток. Дана робота, у порівнянні з іншими, шляхом математичного аналізу магнітних властивостей, енергії та втрат магнітів допомагає досягти оптимальних геометричних розмірів, знайти певний хімічний склад постійного магніту, який буде ефектніше виконувати поставлені функції у конструкції авіадвигунів, компресорів тощо та буде більш економічно вигідний. Для звичайних електродвигунів, генераторів з демпферною обмоткою будуть вирішені питання якіснішого гасіння струмів короткого замикання, вихрових струмів.

III. МЕТА РОБОТИ

Мета роботи. Розрахувати робочі точки постійних магнітів складу $Nd_{15,2}Fe_{74,99}B_{6,6}C_{0,51}Cu_{1,57}Ti_{1,38}$, що були отримані при різних умовах, безпосереднім підбором точок та при використанні середовища MathCad, а також енергію перемагнічування для даних зразків.

Завдання дослідження.

1. Розрахувати робочі точки постійних магнітів складу $Nd_{15,2}Fe_{74,99}B_{6,6}C_{0,51}Cu_{1,57}Ti_{1,38}$, що були отримані при різних умовах, безпосереднім підбором точок, використовуючи розмагнічуючи частини петель гістерезису.

2. Розрахувати робочі точки постійних магнітів складу $Nd_{15,2}Fe_{74,99}B_{6,6}C_{0,51}Cu_{1,57}Ti_{1,38}$, що були отримані при різних умовах, при використанні середовища MathCad.

3. Розрахувати енергію перемагнічування для постійних магнітів складу $Nd_{15,2}Fe_{74,99}B_{6,6}C_{0,51}Cu_{1,57}Ti_{1,38}$, що були отримані при різних умовах, методом інтегрування вздовж контуру максимальної петлі гістерезису.

4. Розрахувати магнітні сили, що діють у магнітному демпфері.

Предмет дослідження – матеріал $Nd_{15,2}Fe_{75,5}B_{6,6}C_xCu_{1,57}Ti_{1,38}$ та його магнітні характеристики.

Об'єкт дослідження – магнітні сили, що діють у магнітному демпфері

Методи дослідження: моделювання.

Очікувані результати. Розрахунок робочих точок дає можливість у подальшому більш ефективно використовувати готові вироби за їх прямим призначенням, а розрахунок енергії перемагнічування (енергії втрат) дозволить більш економічно використовувати енергоресурси.

IV. ВИКЛАД ОСНОВОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1 Матеріали та методи дослідження.

Вимоги, які пред'являються до магнітних матеріалів:

висока коерцитивна сила;
низька питома вага;
мала собівартість;
стабільність характеристик в широкому температурному діапазоні та часі;
високий електричний опір.

Використання постійних магнітів з високими значеннями коерцитивної сили, яка характеризує опір розмагнічуванню, витікають з особливості даного підвісу: магніт у полі іншого магніту. Необхідні значення розвантажуючої сили можуть бути досягнені за умови, що не відбудеться значного взаємного розмагнічування опорних елементів. Цій умові відповідають кобальтові сплави та композиційні матеріали на основі сплаву Nd-Fe-(B,C). При розгляді другого типу сплавів виконується також і третя умова – низька собівартість порівняно з кобальтовими сплавами. Питома вага отриманих спечених магнітів – 9375 кг/м³.

Високий електричний опір магнітних матеріалів необхідний для зведення до мінімуму втрат на вихрові струми, які виникають при обертанні валу.

При розробці конструкції магнітного демпфера був використаний відомий на той момент магнітний матеріал на основі сплаву Sm-Co з відомими характеристиками. Однак, дорожняча Sm, великі енергетичні витрати для отримання кобальта і необхідність збереження основних характеристик досить довгий час не дає їм достатнього широкого застосування. Для здешевлення таких магнітів можна використовувати магніти на основі сплавів системи Fe-Nd-B і Fe-Nd-C.

У табл. 1 представлена порівняльна характеристика магнітів на основі систем Sm-Co, Fe-Nd-B і Fe-Nd-C (T_c – температура Кюрі, I_s – спонтанна намагніченість, H_A – поле анізотропії, $(BH)_{max}$ – максимальна магнітна енергія). Робочі температури порядку 470 К.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика магнітів на основі систем Sm-Co, Fe-Nd-B і Fe-Nd-C [10,11]

З'єднання	T_c , К	I_s , Т	B_r , Тл	H_A , МА/м	$(BH)_{max}$, кДж/м ³
SmCo ₅	1020	1,14	0,77	1,3	140
Nd ₂ Fe ₁₄ C	535	1,5	0,8	7,6	450
Nd ₂ Fe ₁₄ B	585	1,6	1,2	5,4	512

В роботі досліджували постійні магніти одного складу, що були отримані при різних умовах (див. табл. 2).

Таблиця 2. Умови отримання постійних магнітів складу Nd_{15,2}Fe_{74,99}B_{6,6}C_{0,51}Cu_{1,57}Ti_{1,38} [25]

№ зразка	Хімічний склад постійного магніту	Початковий тиск, Р, МПа	Температура спікання / відпалу, К
1	Nd _{15,2} Fe _{74,99} B _{6,6} C _{0,51} Cu _{1,57} Ti _{1,38}	0,5	1323 /
2		3	
3		9,5	

За отриманими розмагнічуючими частинами петлі гістерезису розраховували робочі точки – значення напруженості H та індукції B магнітного поля, при яких питома магнітна енергія постійного магніту максимальна. Розрахунок проводили безпосереднім підбором точок (див. рис. 1а) та при використанні середовища MathCad (див. рис. 1б). Для визначення енергії перемагнічування необхідно знайти площу петлі гістерезису методом інтегрування вздовж контуру петлі.

4.2 Визначення робочої точки постійного високоенергетичного магніту.

Для проведення розрахунків у середовищі MathCad [12] використовувались наступні припущення: якщо відомо вид функції залежності $W = f(H, B)$, то після диференціювання виразу можна знайти екстремуми, що і буде відповідати робочим точкам (див. табл. 3). Для визначення виду функції залежності магнітної енергії W від індукції B та напруженості H магнітного поля ($W = f(H, B)$) необхідно, по-перше, визначити залежність індукції B від напруженості H магнітного поля ($B = f(H)$) у вигляді полінома п-ступеню. Для вирішення даної проблеми у середовищі MathCad було побудовано сплайни по вихідних точках для зразків та отримано набір точок H-B (рис. 1).

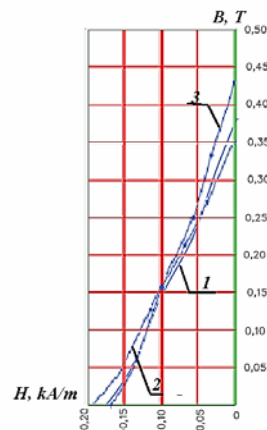


Рисунок 1. Сплайни, що були отримані у середовищі MathCad

У подальшому було розраховано енергетичний добуток $W = f(H, B)$, побудовано дану залежність та визначено максимальне значення енергії. Результати подано на рис. 2 та у табл. 3.

Паралельно, за отриманим набором точок H-B у програмі Excel отримали поліноми 3-го ступеню. Для визначення робочої точки постійного магніту необхідно знайти похідну від виразу:

$$W = \frac{B \cdot H}{2}$$

та розв'язати отримані рівняння.

Зразок № 1:

$$B = 1 \cdot 10^{-8} H^3 + 7 \cdot 10^{-6} H^2 + 0,003H + 0,3847 ;$$

$$W = 0,5 \cdot 10^{-8} H^4 + 3,5 \cdot 10^{-6} H^3 + 1,5 \cdot 10^{-3} H^2 + 0,19235 H;$$

$$\frac{dW}{dH} = 2 \cdot 10^{-8} H^3 + 10,5 \cdot 10^{-6} H^2 + 0,003 H + 0,19235$$

Зразок № 2:

$$B = -6 \cdot 10^{-9} H^3 - 2 \cdot 10^{-7} H^2 + 0,002 H + 0,3472;$$

$$W = -3 \cdot 10^{-9} H^4 - 1 \cdot 10^{-7} H^3 + 0,001 H^2 + 0,1736 H;$$

$$\frac{dW}{dH} = -12 \cdot 10^{-9} H^3 - 3 \cdot 10^{-7} H^2 + 0,002 H + 0,1736$$

Зразок № 3:

$$B = 2 \cdot 10^{-8} H^3 + 8 \cdot 10^{-6} H^2 + 0,0035 H + 0,4353;$$

$$W = 1 \cdot 10^{-8} H^4 + 4 \cdot 10^{-6} H^3 + 1,75 \cdot 10^{-3} H^2 + 0,21765 H;$$

$$\frac{dW}{dH} = 4 \cdot 10^{-8} H^3 + 12 \cdot 10^{-6} H^2 + 0,0035 H + 0,21765.$$

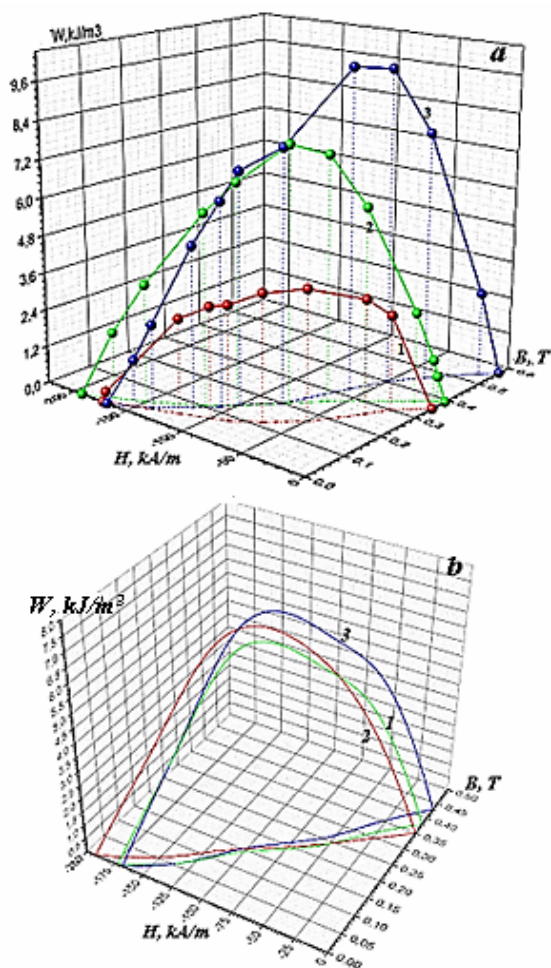


Рисунок 2. Залежності $W = f(H, B)$ для зразків 1, 2, 3: а) по точках, б) у середовищі MathCad

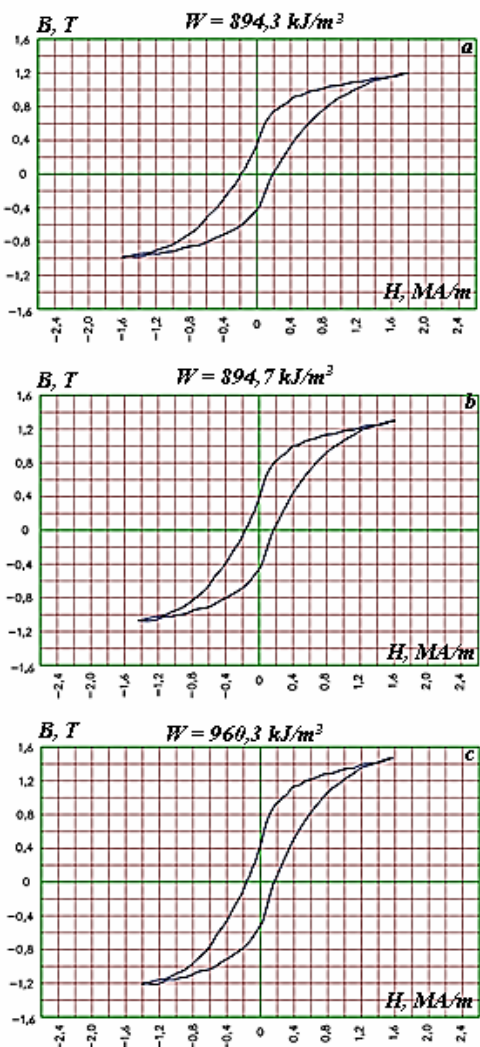
Результати розрахунку робочої точки для всіх способів подано у табл. 3.

Таблиця 3. Результат розрахунку робочих точок постійного магніту різними способами

№ зразка	1	2	3
B, Тл	0,17	0,21	0,33
H, кА/м	-49,5	-77,5	-61,8
W, кДж/м³	4,21	8,14	10,2
У середовищі MathCad			
B, Тл	0,1627	0,1622	0,184
H, кА/м	-89,88	-95,17	-87,81
W, кДж/м³	7,3094	7,7193	8,0797
Через поліном			
B, Тл	0,136	0,140	0,181
H, кА/м	-85,57	-85,60	-77,44
W, кДж/м³	5,8176	6,0075	7,0233

4.3 Визначення енергії перемагнічування постійного високоенергетичного магніту

Енергію перемагнічування зразків було розраховано як площу петлі гістерезису (див. рис. 2).



а – 0,5 МПа; б – 3 МПа; с – 9,5 МПа

Рисунок 3. Петлі гістерезису для зразків складу $Nd_{15,2}Fe_{74,99}V_{6,6}C_{0,51}Cu_{1,57}Ti_{1,38}$, що спечені при різних умовах

Для виконання поставленої задачі отримали сплайн та розрахували площу фігур чисельними методами. Враховуючи, що зразки, які досліджувались, були у формі циліндру $h = 5$ мм та $d = 9$ мм ($S = 3,18 \cdot 10^{-7}$ м²), то можна знайти реальну енергію перемагнічування для кожного зразка. Результати розрахунків подано у табл. 4.

Таблиця 4. Значення питомої та дійсної енергії перемагнічування зразків

№ зразка	1	2	3
Чисельні методи			
$W_{\text{пит}}, \text{кДж/м}^3$	894,3	894,7	960,3
$W, \text{Дж}$	0,2844	0,2845	0,3054
По точках			
$W_{\text{пит}}, \text{кДж/м}^3$	784,5	792,6	869,7
$W, \text{Дж}$	0,2495	0,2521	0,2766

4.4 Розрахунок магнітних сил у магнітному демпфері

Магнітний демпфер – пристрій, що забезпечує захист прецизійних апаратів, обладнання від зовнішніх силових впливів, таких як вібрації, поштовхи, обертові коливання внаслідок небалансу енергій тощо. Магнітний демпфер відноситься до області електротехніки і може бути використаний для гасіння коливань і кінетичних енергій. На рис. 3 представлена конструкція кілець ротора і статора.

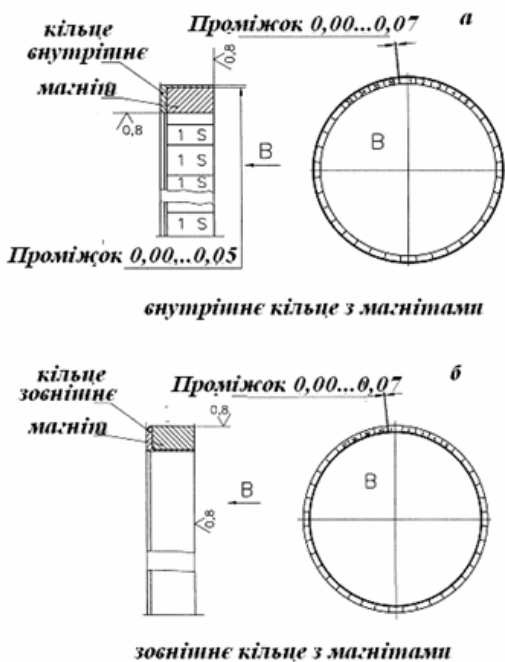


Рисунок 4. Конструкція кілець ротора і статора

Розроблений магнітний демпфер складається з частини, що обертається – роторна, та нерухомої частини (статорної). Роторна частина магнітного демпфера складається з набору радіально намагнічених

секторів, зібраних в кільце з немагнітної сталі (ЕП 33-ВД) та встановлених в обоймі з магнітом'якої сталі (ЕП 609-Ш) з чергуванням магнітних полюсів кожної пари сегментних кілець. Нерухома частина демпфера зібрана з сегментів радіально намагнічених постійних магнітів, зібраних в кільце з немагнітної сталі (ЕП 33-ВД) та встановлених в обоймі з магнітом'якої сталі (ЕП 609 - Ш) з чергуванням магнітних полюсів кожної пари сегментних кілець. Таким чином, полюса магнітів ротора та статора створюють по всьому колу відштовхуюче зусилля. На рис. 4 представлена втулка з магнітами.

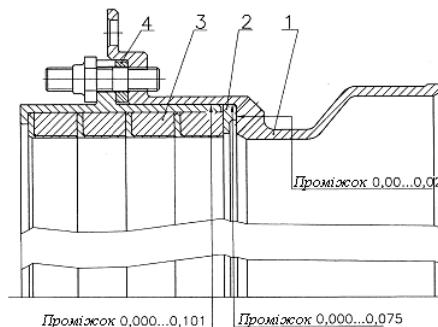


Рисунок 5. Втулка з магнітами: 1 – втулка, 2 – кільце, 3 – втулка з магнітами, 4 – кільце регулювальне.

Раніше за результатами досліджень опор з демпферами на постійних магнітах Беккерсом був зроблений наступний висновок: при збільшенні радіуса опори її вантажопід'ємність зростає лінійно, а вага валу збільшується у квадраті. Тобто, при певних умовах опора буде компенсувати лише вагу вала. Тому вал необхідно виконувати порожнім, а внутрішні кільця підшипника – мінімальні [2].

Для розрахунку розвантажуючої сили була використана наступна формула:

$$F = \frac{\mu_0 \cdot J^2 \cdot l \cdot (r + x / 2)}{2} \cdot e^{-\frac{\pi \cdot x}{d}} \cdot \sin \varphi \quad (1)$$

Магнітну насиченість можна визначити так:

$$J = \frac{B}{\mu_0} - H \quad (2)$$

Всього в даній конструкції використовується 390 магнітів. Розміри магнітів, які використовуються у конструкції, 6x12x16 мм, висота – 6 мм, робоча частина магніту 12x16 мм, таким чином, дану площину можна розділити на 12 елементарних магнітиків квадратного розрізу. Таким чином, для одного магніту значення розвантажуючої сили, отримане за формулою 7, необхідно збільшити в 12 разів.

Використовуючи дані табл. 3 визначаємо розвантажуючу силу за формулою (1). Для розрахунку залежності даної сили від величини зазору у магнітному демпфері вважалось, що синус кута повороту максимальний [2].

Відомо, що чим менший зазор у демпфері, тим

більшої розвантажуючої сили можна досягти [4, 7-9]. Необхідно відмітити, що особливості виготовлення не дозволяють зменшити зазор до мінімальних значень. У запропонованій конструкції величина зазору складає 1 мм. На рис.5 представлено залежність розвантажуючої сили від зазору у магнітному демпфері. На рис. 5б представлено залежність розвантажуючої (осьової) сили від значень напруженості та індукції зовнішнього магнітного поля для спечених магнітів складу Nd-Fe-B, що леговані Cu, C, Ti у магнітному демпфері.

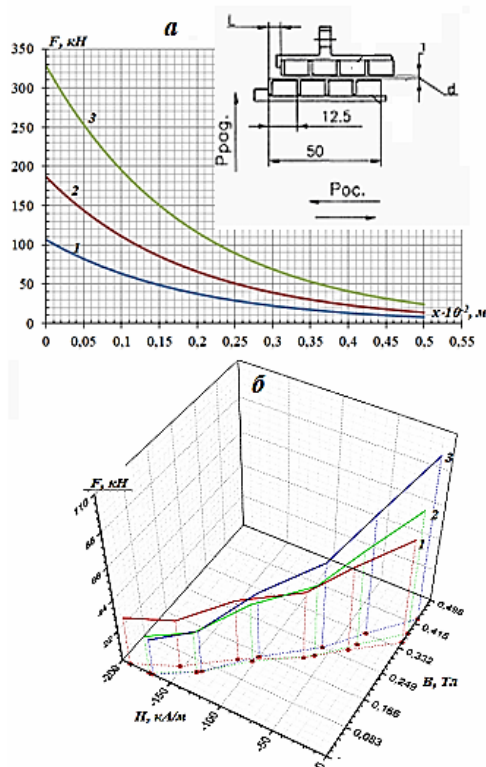


Рисунок 6. Залежність розвантажуючої (осьової) сили від зазору (а) та від значень напруженості та індукції зовнішнього магнітного поля (б) у магнітному демпфері для зразків № 1, № 2, № 3

V. ВИСНОВКИ

1. Аналіз отриманих результатів показав, що значення робочих точок постійного магніту, які визначені безпосереднім підбором точок та при використанні середовища MathCad майже не відрізняються. Це свідчить про достовірність отриманих результатів моделювання у середовищі MathCad.

2. Розрахунок енергії розмагнічування показав, що ці значення суттєво залежать від способу отримання постійного магніту.

3. Представлена конструкція валу вентилятора з магнітним демпфером, що мала завдання щодо відпрацювання можливості застосування такого виду демпфера додаткової опори для довгих валів авіадви-

гунів. Така конструкція опори не вимагає традиційного підведення мастила для охолодження підшипника і позбавлена типових недоліків міжвальних опор.

4. Представлена залежність розвантажуючої (осьової) сили від зазору у магнітному демпфері. Видно, що при збільшенні величини зазору значення розвантажуючої сили зменшується.

5. Представлена залежність розвантажуючої (осьової) сили від значень напруженості та індукції зовнішнього магнітного поля для спечених магнітів складу Nd-Fe-B, що леговані Cu, C, Ti у магнітному демпфері. Видно, що при наближенні напруженості магнітного поля до «0» значення розвантажуючої сили зменшується.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Мартыненко Г. Ю. Определение жесткостных характеристик радиальных магнитных подшипников на двух кольцевых постоянных магнитах / Г. Ю. Мартыненко // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип. «Динаміка і міцність машин». – Харків: НТУ«ХПІ», 2007. – №38. – С. 83 – 95.
- [2] Метлин В. Б. Магнитные и магнито-гидродинамические опоры / В. Б. Метлин. – М.: Энергия, 1968. – 191 с.
- [3] Конструктивно-схемное решение [Электронный ресурс].–Режим доступа URL: <http://www.aviagazoturbina.ru/index.php/konstruktivno-shejnoe-reshenie>.
- [4] Болотов А. Н. Триботехника магнитопассивных опор скольжения: монография / А.Н. Болотов, В.Л. Хренов. – Тверь: ТГТУ, 2008. – 124 с.
- [5] Патент № RU2287729C1. Электромагнитный демпфер [Электронный ресурс] / Е. В.Сидоров, Р. И. Тюкавин. – Режим доступа к странице URL: <http://www.findpatent.ru/patent/228/2287729.html>.
- [6] Gulyaeva T. V. Magnetic damper for aircraft engine-436T / T. V. Gulyaeva, L. V. Gulyaeva, O. V. Tatarchuk. – *Science and Education a New Dimension: Natural and Technical Sciences. – VI (18). – Issue: 158. – Budapes, 2018. – P. 51-55: <https://doi.org/10.31174/NT2018-158VI18-13>*
- [7] Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение/ Ю. Н. Журавлев. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
- [8] Petzold O. Hybridmagnete für einen magnetisch gelagerten Rundtisch/ O.Petzold//Technische mechanik, Band 26, Heft 2, – 2006. – P. 85–86.
- [9] Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 250 с.
- [10] Кринчик, Г.С. Физика магнитных явлений / Г.С. Кринчик. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976. – 262 с.
- [11] Вонсовский С. В. Магнетизм / С.В. Вонсовский. – М.: Наука, 1971. – 1032с.

[12] Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в MathCad. Учебный курс/ Е.Г.Макаров. – СПб: Питер, 2005. – 448 с.: ил.

Стаття надійшла до редакції 01.03.2020

РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО ДЕМПФЕРУ

- ТАТАРЧУК Т.В. канд. техн. наук, доцент кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: tanko.ho1@gmail.com;
- ГАВРОВ А.І. студент гр. Е-127сп Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: lordbusya@gmail.com
- МАСЛОВ С.О. студент гр. Е-127сп Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: ser.maslov.97@gmail.com

Мета роботи. Дослідити залежність магнітних властивостей матеріалу від його хімічного складу, що отриманий за різного тиску при певних температурах. На основі певного складу та властивостей цього матеріалу дослідити, як змінюються його робочі точки та втрати на перемагнічення, що в свою чергу впливатиме на конструкційні та експлуатаційні особливості магнітного демпфера двигуна.

Методи дослідження. Вибір екстремумів функції залежності енергії магніту від індукції та напруженості через диференціювання виразу, розрахунок робочих точок магніту методом підбору та за допомогою середовища MathCad, визначення енергії перемагнічення через інтегрування петлі гістерезису, аналітичний розрахунок магнітних сил у магнітному демпфері, використовуючи формули з дослідів демпферних опор Бекерса.

Отримані результати. У ході виконання поставленого завдання було визначено робочі точки петлі гістерезису магніту, у яких магнітна енергія найбільша шляхом диференціювання виразу залежності енергії магніта від індукції та напруженості. На основі цих даних було виявлено максимальну магнітну індукцію такої коерцитивної сили магнітного поля у цих точках. Ці точки характеризують найбільшу питому енергію магніта, яку надалі використовують за призначенням. Далі, спираючись на петлю гістерезису, шляхом інтегрування було знайдено енергію втрат на перемагнічення магніту. За цими даними було розраховано розвантажуючу силу магнітного демпфера.

Наукова новизна. Було проведено більш точний аналіз магнітних процесів у магнітних матеріалах за допомогою математичного апарату, з використанням програмних середовищ, такі як MathCad, OriginLaB. Проаналізована залежність магнітних властивостей матеріалу від його хімічного складу, енергії та втрат, що в свою чергу робить більш ефективним використання постійного магніту у техніці, апаратах та машинах.

Практична цінність. За отриманими результатами розрахунку енергії втрат та робочих точок магніту визначається оптимальний хімічний склад, його геометричний розмір, що дозволяє знизити втрати на виробництво, зекономити матеріали при цьому підвищити корисну дію магнітного матеріалу у конструкції двигунів. При цьому збільшується експлуатаційний строк роботи машин, їх надійність. Оптимальні розміри магнітів в обмотках забезпечують потрібні повітряні проміжки, що в свою чергу через відсутність тертя зменшують втрати, що збільшують розвантажувальну силу.

Магнітні матеріали; петля гістерезису; робоча точка; енергія втрат; магнітний демпфер; магнітна індукція, розвантажувальна сила, індукція насичення, напруженість, коерцитивна сила.

РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ДЕМПФЕРА

- ТАТАРЧУК Т.В. канд. техн. наук, доцент кафедры физики Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: tanko.ho1@gmail.com;
- ГАВРОВ А.И. студент гр. Е-127сп Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: lordbusya@gmail.com
- МАСЛОВ С.А. студент гр. Е-127сп Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: ser.maslov.97@gmail.com

Цель работы. Исследовать зависимость магнитных свойств материала от его химического состава, полученный за разного давления при определенных температурах. На основе определенного состава и свойств этого материала исследовать, как меняются его рабочие точки и потери на перемагничивания, что в свою

очередь повлияет на конструктивные и эксплуатационные особенности магнитного демпфера двигателя.

Методы исследования. Выбор экстремумов функции зависимости энергии магнита от индукции и напряженности из-за дифференцировки выражения, расчет рабочих точек магнита методом подбор и с помощью среды MathCad, определения энергии перемагничивания через интегрирование петли гистерезиса, аналитический расчет магнитных сил в магнитном демпфере, используя формулы из опытов демпферных опор Беркера.

Полученные результаты. В ходе выполнения поставленной задачи были определены рабочие точки петли гистерезиса магнита, в которых магнитная энергия самая путем дифференцирования выражения зависимости энергии магнита от индукции и напряженности. На основе этих данных было обнаружено максимальную магнитную индукцию такоерцитивную силу магнитного поля в этих точках. Эти точки характеризует наибольшую удельную энергию магнита, которую в дальнейшем используют по назначению. Далее, опираясь на петлю гистерезиса, путем интегрирования был найден энергию потерь на перемагничивания магнита. По этим данным было рассчитано разгружая силу магнитного демпфера.

Научная новизна. Было проведено более точный анализ магнитных процессов в магнитных материалах с помощью математического аппарата, с использованием программных сред, такие как MathCad, OriginLaB. Проанализирована зависимость магнитных свойств материала от его химического состава, энергии и потерь, в свою очередь делает более эффективным использование постоянного магнита в технике, аппаратах и машинах.

Практическая ценность. По полученным результатам расчета энергии потерь и рабочих точек магнита определяется оптимальный химический состав, его геометрический размер, что позволяет снизить потери на производство, сэкономить материалы при этом повысить полезное действие магнитного материала в конструкции двигателей. При этом увеличивается эксплуатационный срок работы машин, их надежность. Оптимальные размеры магнитов в обмотках обеспечивают нужны воздушные промежутки, в свою очередь из-за отсутствия трения уменьшают потери, избыточную развантажующую силу.

Магнитные материалы; петля гистерезиса; рабочая точка; энергия потерь; магнитный демпфер; магнитная индукция, разгрузочная сила, индукция насыщения, напряженность, коэрцитивная сила.