

ЛІТЕРАТУРА

1. Солод В.С. Универсальная математическая модель формоизменения металла в вытяжных калибрах / В.С. Солод, Р.Ю. Кулагин, Я.Е. Бейгельзимер // Сталь. – 2006. – № 8. – С. 16–18. ISSN 0038-920X.
2. Händemark M. Improved roll pass design for long products with WICON / M. Händemark // MILLENNIUM STEEL. – 2011. – P. 144–151.
3. Händemark M. Improved roll pass design for long products with WICON [Электронный ресурс] / M. Händemark // Режим доступа: <http://www.morgardshammar.se/pdf/wicon.pdf>.
4. Солод В.С. Моделирование процесса сортовой прокатки с помощью программного комплекса «Сортпро» / В.С. Солод, А.Г. Бенецкий, А.Н. Мамаев // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов Донбасская государственная машиностроительная академия. – 2010. – № 3 (24). – С. 60–63.
5. Илюкович Б.М. Теоретические основы механики деформируемой сплошной среды [Том 2] / Б.М. Илюкович, М.К. Измайлова, Н.Е. Нехаев // Днепропетровск: РИА «Днепр-ВАЛ», 2007. – 306 с. ISBN 978-966-8704-20-8 (II), ISBN 978-966-7616-96-0

пост. 08.11.2017

О.М. С'ЯНОВ, д.т.н., професор

О.С. КОСУХІНА, к.т.н., доцент

Р.М. ПОЛЯКОВ, аспірант

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Дослідження впливу частоти струму на опір індукційного реостату за допомогою розв'язку рівнянь поля в тривимірній постановці

Побудовано математичну модель індукційного реостату (ІР). Згідно з математичними моделями ІР, реалізованими в нелінійному програмному середовищі, вдосконалення конструкції ІР в напрямку скорочення масогабаритних показників є технічно можливим і економічно доцільним. Подальші дослідження в даному напрямку можуть привести до зменшення товщини пластин і діаметру зовнішнього та внутрішнього кільця ІР.

The mathematical model of the induction rheostat (IR) was constructed. According to the mathematical models of IRs realized in the nonlinear software environment, improvement of the design of IR in the direction of reduction of mass-overall measures is technically practicable and economically sound. Further research in this direction can lead to a decrease in the thickness of the plates and the outer and inner diameter of the IR ring.

Постановка проблеми

На долю електроприводу (ЕП) приходиться близько 60 % всієї споживаної електроенергії. Значну частину її споживають ЕП з асинхронними двигунами (АД), що працюють в повторно-короткочасному режимі (ПКР) роботи, в умовах важких пусків, розгону великих махових мас і т.д. Використання АД загальнопромислового вживання для ЕП з інтенсивними динамічними режимами роботи виявилось малоефективним та неекономічним, оскільки при розробці єдиних серій передбачалося, що для цих цілей будуть використовуватися такі модифікації АД з короткозамкнутим ротором (КЗР), як двигуни з підвищеним пусковим моментом та ковзанням. Проте ці модифікації, як і основне виконання двигунів, мають загальні недоліки, зокрема, вони мають великі кратності струмів (6-7In), що споживають активні та реактивні потужності в динамічних режимах роботи.

Використання АД з фазним ротором (ФР) в ЕП з ПКР роботи не дозволяє застосовувати їх в приміщеннях з агресивними, вибухонебезпечними середовищами. Крім того, вони мають високу вартість і випускаються починаючи лише з висоти осі обертання 160 мм і вище. Тому для ЕП з інтенсивними динамічними режимами знайшли широке застосування АД з ФР і індукційними реостатами (ІР). Конструкція АД з ІР досить проста, технологічна і не вимагає зміни обмотувальних даних статора і ротора АД.

Єдиною додатковою деталлю в такому АД є ІР, що включається в ланцюг обмотки ротора і розташову-

ється безпосередньо на валу двигуна в місці розміщення контактних кілець в звичайному АД. Індукційні реостати можуть виготовлятися у вигляді котушки, намотаної на сталевий циліндр, стрижнів або сердечників іншої форми, охопленої феромагнітним екраном (рис.1).

Завдяки наявності масивних феромагнітних елементів електромагнітні параметри ІР змінюються за нелінійними законами залежно від величини напруги, що підводиться, частоти струму, що протікає в обмотці ротора, магнітних властивостей матеріалу сердечників і екранів, геометричних розмірів і т.д.

Із збільшенням потужності зростають геометричні розміри і вага ІР, наприклад, при потужності АД більше 100кВт вага ІР порівнянна з вагою АД.

Використання спеціальних феромагнітних матеріалів або конструктивних рішень (рис. 1, в) не дозволяє зменшити вагу ІР.

Понизити вагу ІР можна за рахунок підвищення частоти струму, що протікає в котушці ІР. Це дозволить понизити кількість витків котушки ІР і товщину стінок екрану. В цьому випадку в роторний ланцюг АД включається перетворювач частоти, який забезпечує перетворення прикладеної напруги в напругу підвищеної частоти. У цьому випадку ІР можна розробляти не для кожного окремого двигуна, а створити універсальний ІР, електромагнітні параметри якого обираються змінюючої частоти струму в котушці. Блок-схема такої системи АД-ІР буде мати вигляд (рис.2).

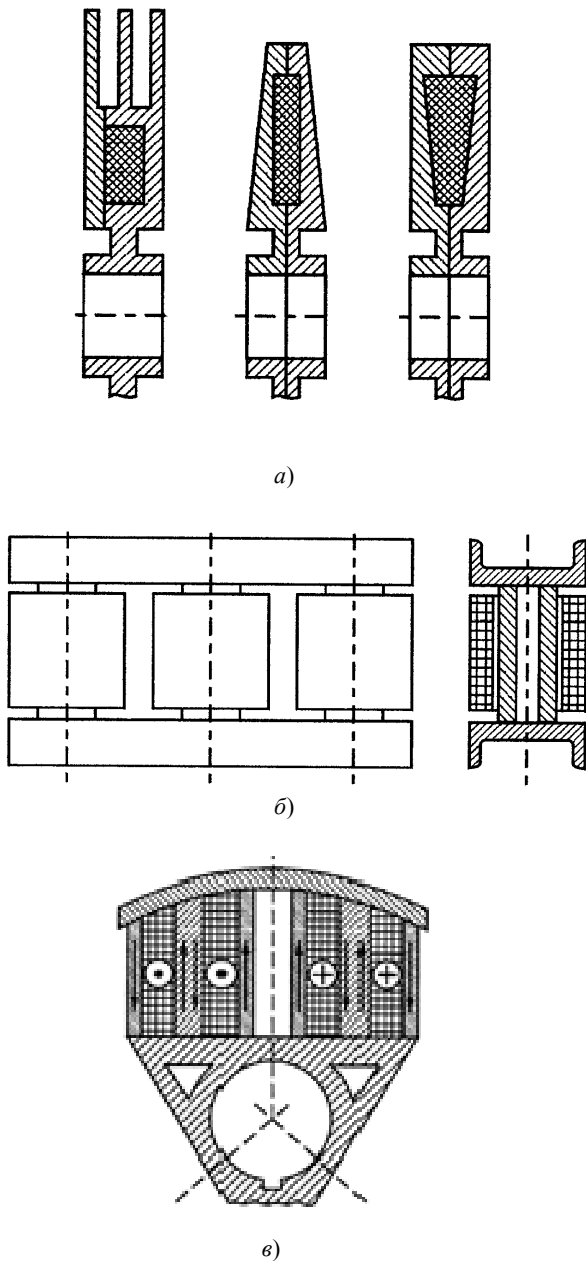


Рис. 1. Конструкції ІР: а) ІР у вигляді порожніх масивних феромагнітних дисків; б) ІР стержневого типу; в) ІР зубчатої конструкції

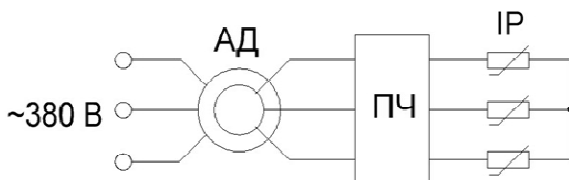


Рис. 2. Блок-схема ЕП з ІР та перетворювачем частоти

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є створення моделі «класичної» конструкції ІР та проведення чисельних досліджень, за результатами яких можна засвідчити або спростувати можливість скорочення мідної котушки шляхом підвищення частоти напруги живлення.

Виклад основного матеріалу

На рис. 1 представлені основні конструкції ІР. Найпростіша конструкція ІР являє собою котушку, яка намотана на сталевому циліндрі, стрижні або сердечнику іншої форми, яка охоплена феромагнітним екраном. Подальше вдосконалення конструкції ІР можливо здійснити через підвищення частоти струму в котушці. Це дасть можливість зменшити витрати міді та уніфікувати ІР.

В даній роботі розглянута спроба скорочення мідної котушки в «класичному» варіанті виконання ІР зі збереженням резистивних характеристик шляхом підвищення частоти напруги живлення.

Рівняння для тривимірної польової задачі, яке описує електромагнітне поле в ІР, в декартовій системі координат має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial A}{\partial z} \right) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = J, \quad (1)$$

де x, y, z — координатні області.

Щільність струму в обмотці ІР визначається за виразом:

$$J = \frac{N_{Wr} i}{S_{Wr}}, \quad (2)$$

де N_{Wr} — число витків фази обмотки ІР; S_{Wr} — площа, яку займає котушка.

Напруга розраховується за виразом:

$$u_{02} = r_{02} i_{02} + \frac{N_{Wr} l}{S_{Wr}} \int \frac{\partial A}{\partial t} dS_{Wr}, \quad (3)$$

де r_{02} — активний опір в котушці; i_{02} — струм в котушці; N_{Wr} — кількість витків котушки ІР.

Тоді повна тривимірна математична модель ІР в польовій постановці матиме вигляд [1—3]:

$$-\nabla(\nabla A) = \begin{cases} 0 - \text{в повітряному просторі} \\ -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \text{в екрані ІР} \\ \frac{N_{Wr} i_{02}}{S_{Wr}} - \text{в котушці ІР} \end{cases}. \quad (4)$$

Для вирішення отриманих рівнянь скористаємось тестовим програмним забезпеченням Maxwell.

Як відомо, в ІР завдяки наявності масивних феромагнітних елементів, електромагнітні параметри змінюються нелінійно, в залежності від величини прикладеної напруги, частоти струму в обмотках ротора, магнітних властивостей сердечника та екрану, геометричних розмірів, тощо.

Приймаємо припущення, що в ІР, який досліджується не враховуються режими охолодження. Віртуальна модель виконана за геометричними розмірами «класичної» конструкції ІР для АД типу МТВ-412-8, які зображено на рис.3.

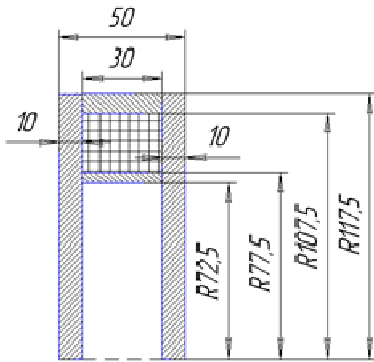


Рис. 3. Геометричні розміри класичної конструкції ІР

ІР складається з циліндричної частини, в якій знаходиться мідна котушка, і бокових пластин квадратної форми. Вихідна кількість витків обмотки становить: $W=50$. Масивні елементи конструкції виготовлені зі сталі марки Ст3. Конструкція ІР, що розглядається, з масивними пластинами повністю екранована, а її форма радіального перерізу має вигляд прямокутника.

Після триангуляції ІР за допомогою автоматичного генератора сітки кінцевих елементів (АГСКЕ), отримана тривимірна дискретна модель ІР (рис. 4 а, б) [2—4].

Розрахунок моделі проведено при напрузі живлення від 20 до 200 В і частоті 50, 130, 200, 350 Гц. В результаті моделювання отримана картина розподілу амплітудного значення магнітної індукції в поперечному перерізі ІР (рис. 5).

Розрахунки показали, що електромагнітне поле, яке створює котушка ІР, проникає в масивні пластини [2, 4]. Розрахунок проводився з кроком в 20 В на кожному з частотних діапазонів. У таблиці 1 наведено ре-

зультати моделювання. Як видно з табличних даних, опір ІР зростає з підвищенням частоти напруги живлення. Таким чином, є всі підстави для скорочення витків котушки ІР. При частоті 130 Гц і кількості витків: $W = 25$ резистивні характеристики реостату залишились на рівні, який має місце при напрузі живлення з частотою 50 Гц і кількості витків: $W = 50$ (рис. 6).

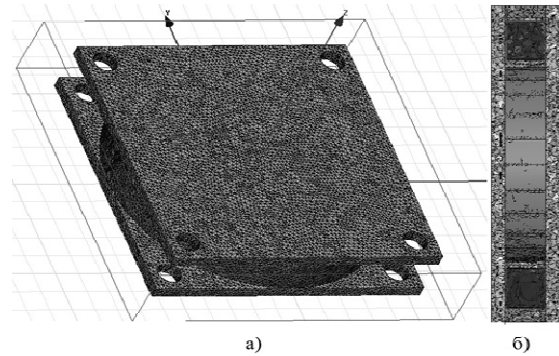


Рис. 4. Дискретна модель ІР — а); поперечний переріз ІР з АГСКЕ — б)

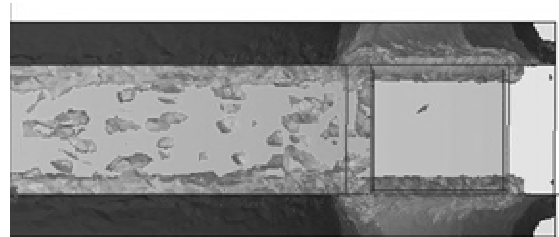


Рис. 5. Розподіл магнітної індукції в поперечному перерізі ІР

Таблиця 1. Результати моделювання

F=50 Гц		F=130 Гц		F=200 Гц		F=350 Гц	
U (В)	Z (Ом)	U (В)	Z (Ом)	U (В)	Z (Ом)	U (В)	Z (Ом)
19,9	17,1	19,9	15,4	19,9	71,1	20,0	110,9
39,5	4,1	39,7	5,0	39,8	88,4	40,0	128,9
59,2	1,2	59,0	1,3	59,8	99,6	60,0	146,2
77,6	0,8	78,3	0,8	79,8	88,6	79,9	159,8
95,0	0,6	97,3	0,6	99,7	76,7	99,9	166,5
111,7	0,5	114,9	0,5	119,7	39,9	119,8	171,1
128,42	0,41	130,97	0,4	139,3	19,9	139,8	162,55
145	0,33	146,17	0,31	158,83	11,83	159,8	149,34
158,8	0,28	163,65	0,27	177,3	7,95	179,8	125,7
176,15	0,24	178,32	0,24	194,5	6,13	199,8	87,63
193,63	0,22	194,87	0,218	213,3	5,05	219,7	56,3

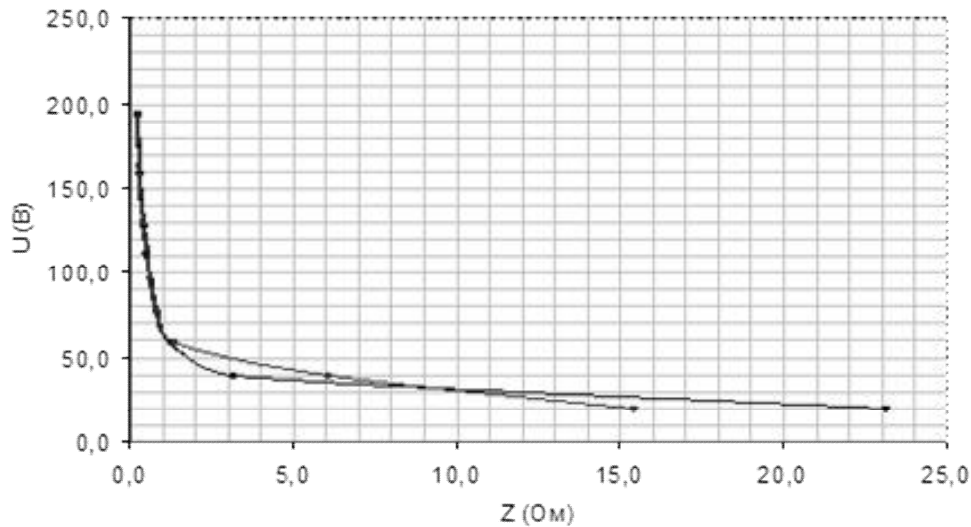


Рис. 6. Залежність опору IP від напруги живлення з частотою 50 і 130 Гц з кількістю витків котушки 50 і 25 відповідно.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Внаслідок проведеного моделювання і розрахунків можна зробити висновок, що підвищення частоти напруги живлення в IP веде до можливості скорочення кількості витків в котушці і зменшення її ваги з 2 кг до 1,2 кг, тобто майже вдвічі. Як видно з результатів моделювання, а саме резистивних показників, подальше підвищення частоти дає змогу скоротити кількість витків котушки в декілька раз. Таким чином, згідно з математичними моделями IP, реалізованими в нелінійному програмному середовищі, вдосконалення конструкції IP в напрямку скорочення масогабаритних показників є технічно можливим і економічно доцільним. Подальші дослідження в даному напрямку можуть привести до зменшення товщини пластин і діаметру зовнішнього та внутрішнього кільця IP.

ЛІТЕРАТУРА

1. С'янов А.М. Математическая модель асинхронного двигателя с индукционными сопротивлениями // Регулируемые асинхронные двигатели. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины. – 1996. – С. 18 – 31.
2. Проектування асинхронних двигунів: монографія/ А.П. Вербовий, П.Ф. Вербовий, О.М. С'янов – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. – 528 с.
3. Індукційні реостати з покращеними масогабаритними показниками для асинхронних двигунів з фазним ротором: монографія/ О.В. Качура, С.В. Количев, О.М. С'янов — Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011. – 209 с.
4. С'янов А.М. Расчет электромагнитных параметров индукционных сопротивлений методом конечных элементов // Техн. электродинамика. – 1995. – № 4. – С. 21 – 25.

пост. 13.11.2017