DOI: 10.31319/2519-2884.40.2022.10
УДК 621.313.323
С.В. Количев, к.т.н., доцент, kolychev.sergey 58 @gmail.com
В.В. Малюк, аспірант, valeriymaluk@gmail.com
О.М. С'янов, д.т.н., професор, alexandr.sianov@gmail.com
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІНДУКЦІЙНОГО РЕОСТАТУ ДВОХКОТУШКОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Розроблено математичну модель індукційного реостата двохкотушкової конструкції. Індукційний реостат представлено в польовій постановці в циліндричних координатах. Проведені дослідження електромагнітних характеристик індукційного реостата двохкотушкової конструкції. Наведені результати чисельного моделювання перехідних процесів та розподіл поля в поперечному перетині. Визначено вплив геометричних параметрів індукційного реостата на повний опір. Представлена схема експериментальної установки та методика проведення досліджень. Виконано порівняння експериментально отриманого повного опору індукційного реостата з розрахованим.

***Ключові слова**: асинхронна машина; індукційний реостат; перехідний процес; повний опір.*

A mathematical model of the induction rheostat of two coil designs has been developed. The induction rheostat is presented in the field setting in cylindrical coordinates. Investigations of electromagnetic characteristics of induction rheostat of two coil designs are carried out. The results of numerical simulation of transients and field distribution in the cross section are presented. The influence of geometric parameters of induction rheostat on impedance is determined. The scheme of experimental installation and methods of research are presented. A comparison of the experimentally obtained impedance of the induction rheostat with the calculated one is performed.

***Keywords**: asynchronous machine; induction rheostat; transition process; impedance.*

Постановка проблеми

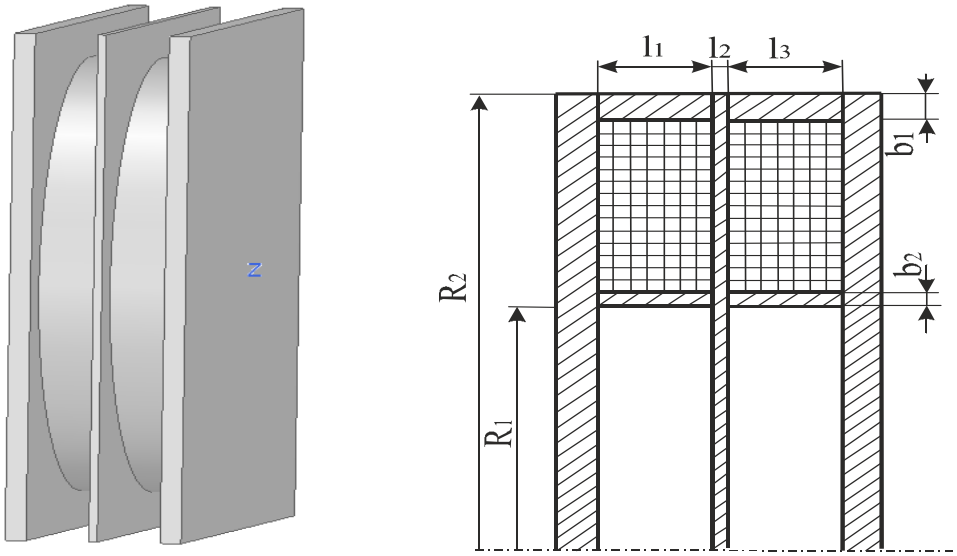
Асинхронні двигуни (АД) з фазним ротором знаходять основне застосування в крановому електроприводі, приводах волочильних і прокатних станів, канатних і правильних машин, рольгангах, дробарках і т.п. Схеми включення АД з фазним ротором дозволяють отримати наступні переваги: великий початковий крутний момент; можливість короткочасних механічних навантажень; незначну зміну швидкості при різких навантаженнях; менший пусковий струм порівняно з двигунами із короткозамкненим ротором. Використання у схемах відкритих пускових опорів призводить до необхідності вживати велику кількість пускової апаратури. При цьому значно зростає вага установки, утруднюється обслуговування. Зазначені недоліки призводять до тривалих простоїв і багаторазових ремонтів устаткування.

У такій ситуації підвищення надійності устаткування, яке є важливим завданням, можна вирішити шляхом вмикання індукційних реостатів (ІР) у коло фазного ротора АД [1, 2, 3]. Дане рішення дозволяє знизити кількість контактної апаратури, або взагалі позбутися від неї, зменшити об'єм кабельної розводки, скоротити затрати для підтримки механізмів в робочому стані. Індукційні реостати нечутливі до загазованості, запиленості, високих та низьких температур навколишнього середовища. Крім того, завдяки нелінійності електромагнітних параметрів ІР дозволяють забезпечити плавний пуск із заданим пусковим струмом. Тому актуальним є подальше дослідження ІР та покращення їх характеристик.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Переважна більшість досліджень присвячена ІР дискової конструкції з однієї котушкою [4]. Конструкція ІР з однією котушкою має такі недоліки як значний опір при малих значеннях частоти струму, невелика крутизна зміни повного опору [3]. Усунення цих недоліків дає ІР з двома котушками [3], загальний вид якого та поперечний перетин показані на рис. 1. В цієї

конструкції котушка розділена металевою пластиною на дві половини, котрі включені в схемі узгоджено. При такому з'єднанні котушок їх магнітні поля направлені зустрічно. При частоті струму 50 Гц глибина проникнення поля незначна і проходить по пластині з обох сторін. При зменшені частоти поля глибина проникнення збільшується, але поле однієї котушки витісняє поле іншої, тому середня пластина ненасичена. Від товщини середньої пластини залежить величення зміни електромагнітних параметрів ІР. При цьому параметри ІР змінюються в більшій мірі чим у ІР з однією котушкою. Так як котушки розподілені по радіусу, то найбільш насічене буде ніжне кільце b_2. Від його насичення залежить аперіодична складова струму, яка призводить до значних коливань електромагнітного пускового моменту асинхронного двигуна.



а б

Рис. 1. Загальний вигляд (а) та поперечний перетин (б) ІР: R_1, R_2 — внутрішній і зовнішній радіус; b_1, b_2 — товщина верхнього і нижнього кільця; l_1, l_3 — товщина першої і другої котушки; l_2 — товщина середнього листа

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження — розробка математичної моделі ІР двохкотушкової конструкції для побудови електромагнітних характеристик та експериментальне підтвердження результатів розрахунків.

Виклад основного матеріалу

Для дослідження електромагнітних характеристик ІР розроблена математична модель в польовій постановці. При розробці математичної моделі прийнято, що відсутні зазори у місцях стиковки елементів конструкції (у цьому випадку феромагнітні елементи конструкції представляють собою феромагнітний екран) та ізоляції котушок, нехтується впливом температурного ефекту на питому провідність, магнітну проникність і не враховується гістерезис. Взаємозв'язок між магнітною індукцією та напруженістю магнітного поля представляється нормальною кривою намагнічування.

Електромагнітні процеси в ІР описуються системою диференційних рівнянь Максвелла [3] та визначаються через векторний магнітний потенціал. Так як конструкція ІР має властивість симетрії, щодо центральної осі обертання, диференціальні рівняння записується в циліндричних координатах відносно векторного магнітного потенціалу А та для феромагнітного екрану ІР має вид:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\nu\frac{\partial A}{\partial r}\right)+\frac{1}{r}\nu\frac{\partial A}{\partial r}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu\frac{\partial A}{\partial z}\right)+\sigma\frac{\partial A}{\partial t}=0\,, \qquad (1)$$

де z — координата області; r — радіус; ν — магнітний опір матеріалу; σ — електропровідність матеріалу.

Вираз (1) доповнюється рівняннями рівноваги напруги для двох котушок ІР:

$$u_{01,02} = r_{01,02} i_{01,02} + \frac{d\Psi_{01,02}}{dt}, \qquad (2)$$

де $u_{01,02}$ — напруга, прикладена до обмоток ІР; $r_{01,02}$ — активний опір обмоток; $i_{01,02}$ — струм, що протікає в обмотках; $\Psi_{01,02}$ — повне потокозчеплення обмоток.

Потокозчеплення котушки через вектор магнітного потенціалу може бути визначено за формулою [3]

$$\frac{d\Psi_{01,02}}{dt} = \frac{N_{Wr} l}{S_{Wr}} \int_{S_{Wr}} \frac{\partial A}{\partial t} dS_{Wr}, \qquad (3)$$

де N_{Wr} — число витків в обмотках ІР; l — довжина витка; S_{Wr} — область, що займає обмотка ІР.

Підставивши (3) у вираз (2), одержимо

$$u_{01,02} = r_{01,02} i_{01,02} + \frac{N_{Wr} l}{S_{Wr}} \int_{S_{Wr}} \frac{\partial A}{\partial t} dS_{Wr}. \qquad (4)$$

На основі рівняння (1) та (4) система диференціальних рівнянь математичної моделі ІР, у польовій постановці буде мати вид:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial r}\left(\nu \frac{\partial A}{\partial r}\right) + \frac{1}{r}\nu \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu \frac{\partial A}{\partial z}\right) = 0 \quad \text{— у повітрі;} \\
&\frac{\partial}{\partial r}\left(\nu \frac{\partial A}{\partial r}\right) + \frac{1}{r}\nu \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu \frac{\partial A}{\partial z}\right) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad \text{— в феромагнітному екрані;} \\
&\frac{\partial}{\partial r}\left(\nu \frac{\partial A}{\partial r}\right) + \frac{1}{r}\nu \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu \frac{\partial A}{\partial z}\right) - \frac{N_{Wr} i_{01}}{S_{Wr}} = 0 \quad \text{— в першій котушці;} \\
&\frac{\partial}{\partial r}\left(\nu \frac{\partial A}{\partial r}\right) + \frac{1}{r}\nu \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu \frac{\partial A}{\partial z}\right) - \frac{N_{Wr} i_{01}}{S_{Wr}} = 0 \quad \text{— в другій котушці;} \\
&\frac{N_{Wr} l}{S_{Wr}} \int_{S_{Wr}} \frac{\partial A}{\partial t} dS_{Wr} + r_{01} i_{01} = u_{01}; \\
&\frac{N_{Wr} l}{S_{Wr}} \int_{S_{Wr}} \frac{\partial A}{\partial t} dS_{Wr} + r_{02} i_{02} = u_{02}.
\end{aligned} \qquad (5)$$

Для вирішення системи диференційних рівнянь (5) використано чисельний метод кінцевих елементів універсальній програмі Ansys, безкоштовна версія для студентів. В програмі Maxwell (пакету Ansys) створена розрахункова область в циліндричних координатах для розрахунку електромагнітного поля, а в програмі Simlorer (пакету Ansys) віртуальна електрична схема для дослідження перехідних процесів в ІР. Віртуальна електрична схема для дослідження перехідних процесів в ІР наведена на рис. 2. На схемі ІР позначено як FEA1, активні резистори

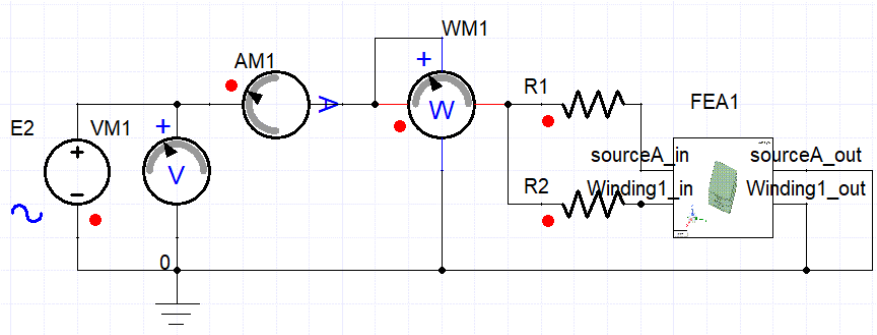


Рис. 2. Віртуальна електрична схема моделі

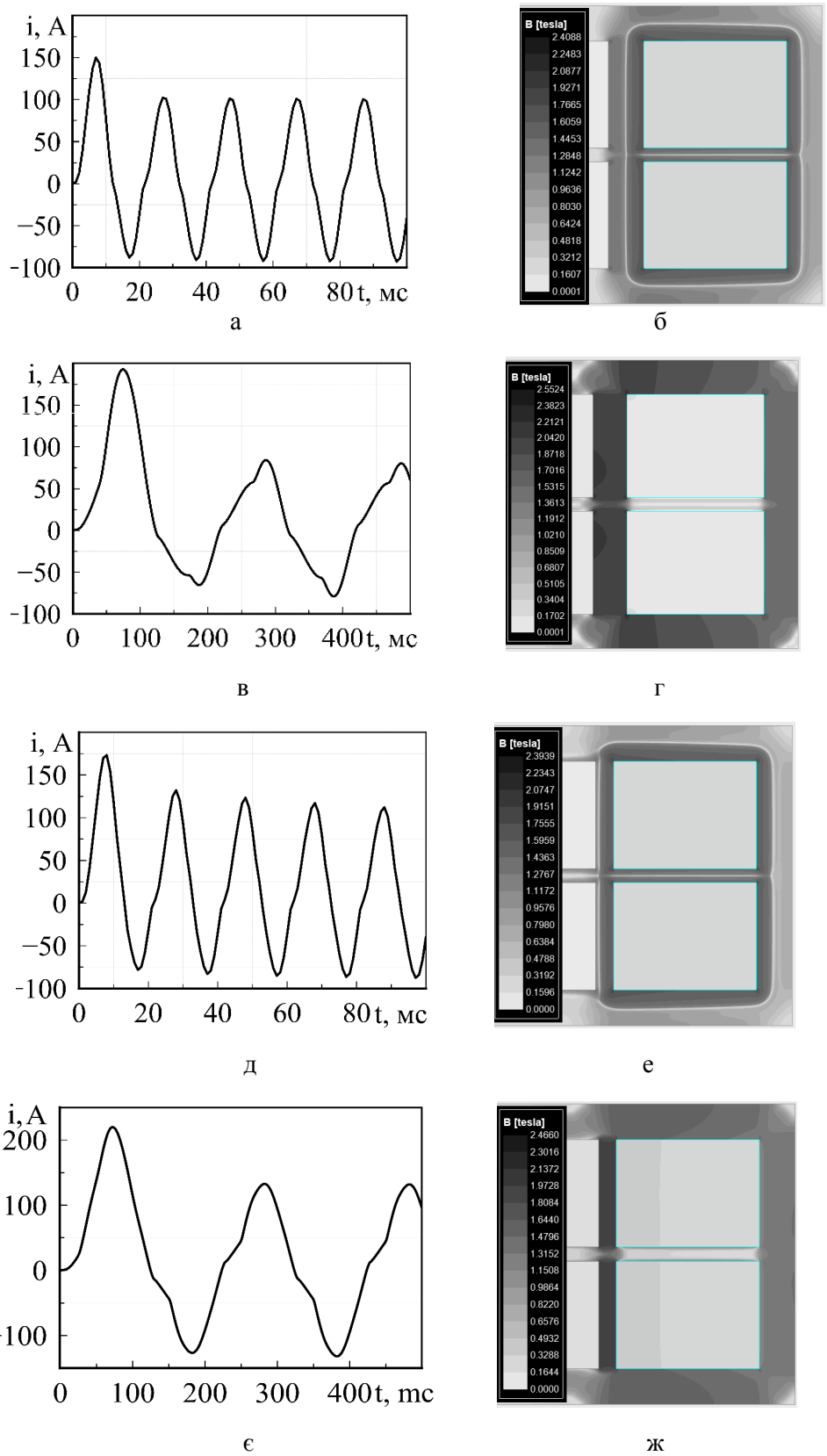


Рис. 3. Результати моделювання перехідних процесів струму при включення ІР (а, в, д, є) та розподіл магнітної індукції в поперечному перерізі (б, г, е, ж)

R1 та R2 мають опір який дорівнює опору обмоток ІР, WM1 — ватметр, АМ1 — амперметр, VM2 — вольтметр та Е2 джерело змінного струму.

На рис. 3, а, б представлені результати моделювання перехідних процесі в ІР та розподіл магнітної індукції в поперечному перерізі для ІР при напрузі U = 78 В та частоті f = 50 Гц, та на рис 3, в, г при напрузі U = 21В та частоті f = 5 Гц, якій мав наступні розміри: R_1 = 73,5 мм; R_2 = 117,5 мм; l_1 = 30 мм; l_2 = 4 мм; l_3 = 30 мм; b_1 = 10 мм; b_2 = 10 мм; число витків в котушках 63. Аналіз результатів розрахунків показало, що у формі струму є значна аперіодична складова, як при частоті 50 Гц так і при 5 Гц. Магнітний потік зосереджується в нижніх кільцях і не розподіляється по боковим стінкам, середня пластина ненасичена. При частоті 50 Гц повний опір складає z = 1,11 Ом, а при 5 Гц z = 0,4 Ом.

Подальше зменшення товщини нижніх кільц до 5 мм показало, що як при напрузі U = 78 В та частоті 50 Гц (рис. 3, д, е) так і при напрузі U = 21 В та частоті 5 Гц (рис. 3, є, ж) середня пластина ненасичена. Навпаки нижні кільця насичені і магнітна індукція при частоті 50 Гц складає 2,39 Тл, а при 5 Гц складає 2,46 Тл. Магнітний потік з нижнього кільця розподіляється по радіусу по боковим стінкам. При частоті 50 Гц повний опір складає z = 1,11 Ом, а при 5 Гц — z = 0,229 Ом.

Порівнюючи повні опори ІР при b_2 = 10мм та b_2 = 5мм при частоті 50Гц видно, що вони рівні, а при частоті 5 Гц видно, що зменшення товщини кільця в два рази дозволило зменшити повний опір в 1,74 рази.

Для проведення експериментальних досліджень ІР створена експериментальна установка, принципова схема якої показана на рис. 4. Вона дозволяє досліджувати характеристики ІР в

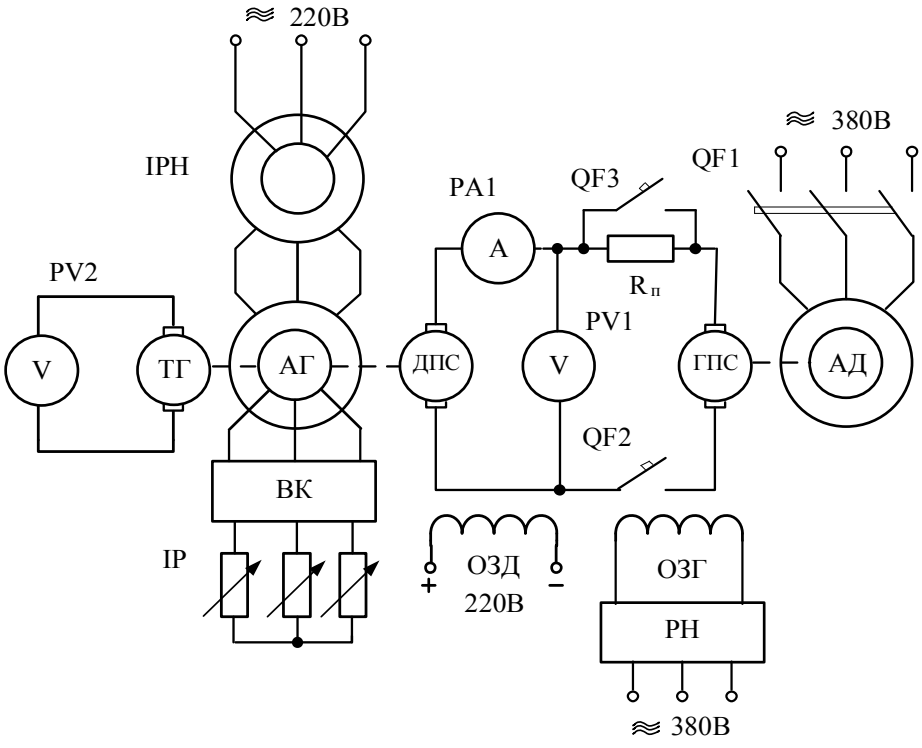


Рис. 4. Принципова схема експериментальної установки для проведення дослідження харак- теристик ІР, де АД — асинхронний двигун; ГПС — генератор постійного струму; ОЗГ — обмотки збудження генератора; РН — регулятор напруги; ДПС — двигун постійного струму; ОЗД — обмотка збудження двигуна; АГ — асинхронний генератор (на базі машини МТВ-412-8); ВК — вимірювальний комплект; ТГ — тахогенератор; ІР — індукційний реостат; ІРН — індукційний регулятор напруги (ИР - 61); $R_п$ — пусковий резистор

залежності від струму, який протікає в обмотках ІР, та частоти. Система Г-Д (АД, ГПС та ДПС) призначена для зміни в широкому діапазоні частоту обертання АГ та частоти прикладеної до ІР напруги. Величина струму змінювалася індукційним регулятором напруги (ІРН). Експериментальний зразок ІР мав наступні розміри: R_1 = 73,5 мм; R_2 = 117,5 мм; l_1 = 30 мм; l_2 = 4 мм; l_3 = 30 мм; b_1 = 10 мм; b_2 змінювалася від 10 до 5 мм; число витків в кожній котушці по 63, провід марки ПСД 8,5×1,2 мм. На рис. 5 показані експериментально отримані залежності (суцільні лінії) повного опору індукційного резистора від частоти при різному значені струму та розрахункові точки (·). Розбіжність між експериментально отриманими залежностями та розрахунковими точками складає 5—10 %.

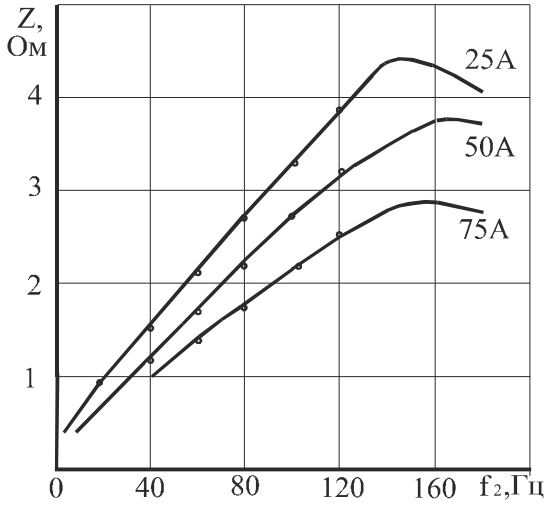


Рис. 5. Залежності повного опору ІР (суцільні лінії) та точки (·) , отримані в результаті розрахунків, при різному значені струму та зміні частоти

Висновки

Створена математична модель у вигляді системи диференціальних рівнянь поля, записаних в циліндричних координатах. Для розв'язання системи диференціальних рівнянь використовується чисельний метод скінчених елементів. Кінцево елементний поділ розрахункової області враховує залежність глибини проникнення електромагнітної хвилі в феромагнітний екран. В математичній моделі враховуються вихрові струми в екрані ІР та поле розсіювання в областях котушок. Порівняння експериментально отриманих залежностей з розрахунковими точками показало, що розбіжність складає 5—10 %. Отримана точність достатня для інженерних розрахунків. Проведенні дослідження впливу на характеристики ІР товщини внутрішнього кільця показали, що зменшення товщини внутрішнього кільця ІР до 5 мм дозволило зменшити в 1,74 рази повний опір при частоті струму 5 Гц, що дає можливість не відключати ІР від АД.

Список використаної літератури

1. Количев С.В., С'янов О.М. Експериментальне дослідження статичних характеристик асинхронної машини в режимі динамічного гальмування з індукційними опорами в обмотці ротора. *Збірник наукових праць ДДТУ*. Кам'янське. 2021. № 1(38). С.68–74.
2. Количев С.В., С'янов О.М. Експериментальне дослідження статичних характеристик синхронної машини в режимі динамічного гальмування з індукційними опорами в обмотці статора. *Збірник наукових праць ДДТУ*. Кам'янське. 2020. № 2(37). С. 22–27.
3. Качура О. В., Количев С. В., С'янов О. М. Індукційні реостати з покращеними масогабаритними показниками для асинхронних двигунів з фазним ротором: монографія. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011. 209 с.

4. Вербовой А.П., Вербовой П.Ф., С'янов О. М. Проектування асинхронних двигунів: монографія. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. 528 с.

MATHEMATICAL MODEL OF INDUCTION RHEOSTAT TWO COIL DESIGN

Kolychev S., Malyuk V., Sianov A.

Abstract

The vast majority of research is devoted to induction rheostats (IR) of disk design with a single coil. IRs of this design have a number of disadvantages: increased resistance at low current frequencies and a significant aperiodic current component in transient conditions. The elimination of these shortcomings gives IR with two coils. In this design, the coil is divided by a ferromagnetic plate into two equal halves, which are included in the circuit in concert. With this connection of the coils, their magnetic fields are directed oppositely. At a current frequency of 50 Hz, the depth of field penetration into the metal is insignificant and the magnetic flux passes through the plate from both sides. With a decrease in the current frequency, the depth of penetration of the flow increases and the field of one coil displaces the field of the other. To study the electromagnetic parameters of IR, their mathematical model in the field formulation has been developed. In this case, the following assumptions are made: there are no gaps at the joints of structural elements (the steel parts of the body are a ferromagnetic screen) and coil insulation, the influence of the temperature effect on the specific conductivity, magnetic permeability is neglected, and the hysteresis of steel is not taken into account. The relationship between magnetic induction and magnetic field strength appears to be a normal magnetization curve. Since the IR construction has the property of symmetry about the central axis of rotation, the equations are written in cylindrical coordinates relative to the vector magnetic potential. A mathematical model is presented in the form of a system of differential equations, for the solution of which the finite element method was used. Dependences of the current IR on time and the distribution of magnetic induction in the cross section of the coils are obtained. A comparative analysis showed that a two-fold decrease in the thickness of the inner ring of the structure made it possible, at a frequency of 5 Hz, to reduce the total resistance of the rheostat by 1,74 times. To conduct experimental studies of IR, a laboratory installation was created, which made it possible to remove the dependences of resistance on the magnitude and frequency of the current in the coils. The experimentally obtained dependences of the impedance IR on frequency at fixed values of currents are compared with the calculated points. It is shown that the discrepancy between them is 510%. The obtained accuracy is sufficient for engineering calculations.

References

[1] Kolychev S. V. & Sianov O. M. (2021) Eksperimentalne doslidgennya statychnyh harakterystyk asynhronnoi mashyny v regymi dynamichnogo galmuvannya z indukciynymy oporamy v obmotci rotora. [Experimental study of static characteristics asynchronous machine in dynamic braking mode with induction resistance in the rotor winding]. *Zbirnyk naukovyh prac DDTU – Collection of scholarly papers of DSTU.* Kamianske. DDTU, № 1(38), P. 68–74 [in Ukrainian].

[2] Kolychev S. V. & Sianov O. M. (2020) Eksperimentalne doslidgennya statychnyh harakterystyk synhronnoi mashyny v regymi dynamichnogo galmuvannya z indukciynymy oporamy v obmotci statora.[Experimental study of the static characteristics of the synchronous machine in the mode of dynamic braking with induction resistance in the winding of the stator]. *Zbirnyk naukovyh prac DDTU – Collection of scholarly papers of DSTU.* Kamianske. № 2(37), 22–27 [in Ukrainian].

[3] Kachura O. V. & Kolychev S. V. & Sianov O. M. (2011) *Indukciyni reostaty z pokraschenymy masogabaritnymy pokaznykamy dlya asynhronnyh dvyguniv z faznym rotorom: monografiya. [Induction rheostats with improved weight and size parameters for asynchronous motors with a phase rotor]*. Dniprodzergynsk: DDTU. 209 p. [in Ukrainian].

[4] Verbovoy A. P. & Verbovoy P. F. & Sianov O. M. (2013) *Proektuvannya asynhronnyh dvyguniv: monografiya. [Design of asynchronous motors]*. Dniprodzergynsk: DDTU. 528 p. [in Ukrainian].