

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ІНДУКЦІЙНИМИ РЕОСТАТАМИ В КОЛІ РОТОРА

Вступ. На підприємствах металургійної й хімічної галузей досить розповсюджуваними є механізми, у яких використовуються асинхронні двигуни (АД) з фазним ротором і додатковими активними резисторами. Багаторічний досвід експлуатації даних установок показує, що застосування відкритих пускових резисторів у таких електроприводах (ЕП) призводить до цілого ряду негативних наслідків, серед яких: 1) необхідність використання великої кількості пускової апаратури; 2) наявність ковзних контактів, що виключають застосування подібних установок у приміщеннях з вибухонебезпечним середовищем; 3) істотне збільшення масогабаритних показників всієї системи; 4) необхідність залучення додаткового персоналу з метою обслуговування контактної апаратури та ін. Зазначені недоліки призводять до тривалих простоїв і багаторазових ремонтів устаткування.

У даній ситуації підвищення надійності устаткування, в якому використовуються АД з фазним ротором, є важливим завданням, яке можна вирішити шляхом вмикання індукційних реостатів (ІР) у коло фазного ротора АД [1-3]. Такий підхід дозволяє різко знизити кількість контактної апаратури, а при необхідності взагалі позбутися від неї. Крім того, завдяки нелінійності електромагнітних параметрів ІР дозволяють забезпечити плавний розгін двигуна із заданим пусковим струмом.

Постановка задачі. За конструктивним виконанням ІР [1-3] можна розділити на наступні групи.

1. Індукційні реостати стрижневого типу, в яких вертикальні стрижні виконані з труб, а ярма – з масивних феромагнітних магнітопроводом. Стрижні з обмотками і ярма збираються у вигляді тристрижневого трансформатора.

2. Індукційні реостати у вигляді порожніх масивних феромагнітних дисків, всередині яких повністю екранованими розміщуються концентричні котушки. В цьому випадку ІР розміщуються на валу в місці розташування контактних кілець звичайного двигуна поза його об'єму. Безпосереднє з'єднання котушок з фазами роторної обмотки через порожнистий вал робить двигун безконтактним. З ростом потужності двигуна ІР під'єднується через контактні кільця і виводиться з роботи одним контактором.

3. Індукційні реостати у вигляді зубчастої (шестеренчастої) конструкції. До цієї групи належать ІР, в яких стрижні виготовляються разом із з'єднуючою їх втулкою, а після посадки на них котушок, останні закриваються бічними втулками і загальним зовнішнім циліндром або окремими накладками.

Із перерахованих груп найбільший інтерес визиває ІР другої групи, тому що має найменшу величину розсіяння електромагнітного поля. Якщо розділити екрановану котушку додатковою феромагнітною вставкою, то можна змінюючи напрям струму в напівкотушках збільшити величину зміни електромагнітних параметрів. Використання аналітичних методів для таких конструкцій дає можливість отримати лише приблизні розміри феромагнітних елементів та електромеханічні характеристики АД з ІР. Тому задачею роботи є уточнення геометричних розмірів феромагнітних елементів та отримання електромеханічних характеристик за допомогою експериментальних досліджень.

Результати роботи. Для дослідження статичних режимів роботи електропривода на базі АД з ІР створена експериментальна установка, принципова схема якої показана на рис.1.

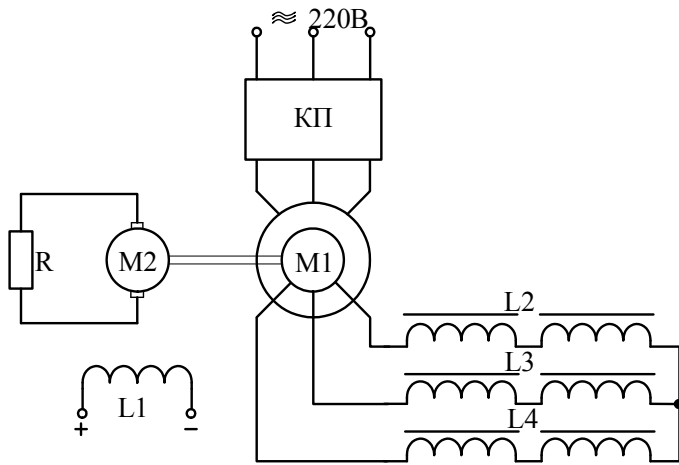


Рисунок 1—Схема експериментальної установки

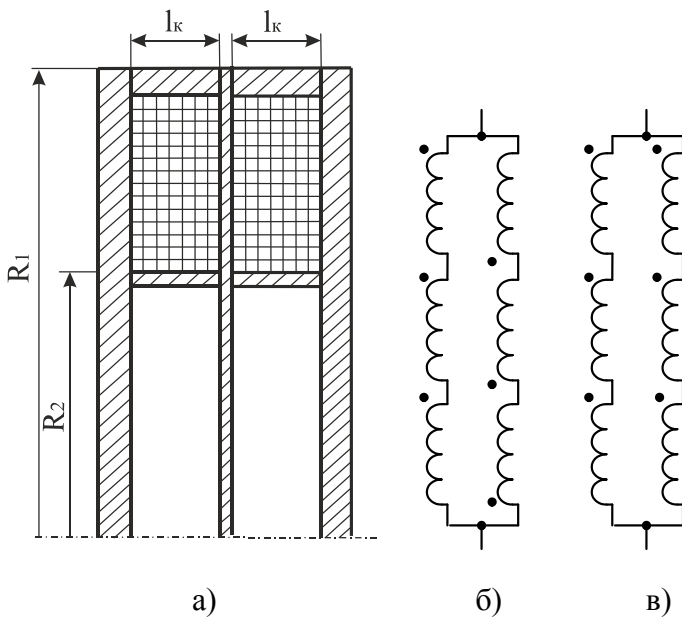


Рисунок 2 – Конструкція ІР (а) та схеми вмикання напівфаз котушок ІР: зустрічно (б) та узгоджено (в)

товщина внутрішнього кільця 5 мм; провід марки ПСД $8,5 \times 1,2 \text{ мм}^2$.

Дослідження проводилися як у напрямку зниження масогабаритних показників, так і в напрямку одержання необхідних характеристик АД. Тому в процесі експерименту всі конструкції ІР неодноразово модифікувалися. При цьому варіювалися наступні параметри:

- 1) товщина внутрішніх пластин - від 2 до 16 мм;
- 2) товщина внутрішніх кілець - від 1 до 10 мм;
- 3) довжина внутрішніх кілець - від 15 до 60 мм.

Вибір зазначених геометричних параметрів конструкції обумовлений необхідніс-

Установка включає: випробовуваний трифазний АД М1; навантажувальну машину постійного струму М2 з обмоткою збудження L1; індукційний реостат L2, L3, L4.

Обмотка збудження навантажувальної машини постійного струму М2 живиться від стороннього джерела постійної напруги. Для дослідження режимів роботи двигуна М1 у його статорному колі встановлено комплект вимірювальних приладів (КП). Контроль швидкості випробовуваного двигуна виконувався за значенням електрорушійної сили тахогенератора. У роторне коло АД М1 увімкнений ІР другої групи, обмотки якого з'єднані „зіркою” (рис.1), а схема вмикання напівфаз котушок могла змінюватися (рис.2).

Дослідження виконані для двигуна МТВ-412-8 при вмиканні обмоток статора у зірку і живленні лінійною напругою $U_1 = 220 \text{ В}$ (від індукційного регулятора, який на рис.1 не показаний).

ІР класичної конструкції другої групи мав наступні параметри: зовнішній і внутрішній діаметри котушки $D = 235 \text{ мм}$, $d = 155 \text{ мм}$; число елементарних витків $W_{\text{ЕК}} = 21$, загальне число витків котушки $W_{\text{К}} = 63$; дві паралельні гілки; товщина зовнішньої стінки 10 мм; довжина котушки $l_{\text{к}} = 30 \text{ мм}$; товщина зовнішнього кільця 10 мм;

ттю підвищення технологічності виготовлення ІР. Для цього використовувалися такі матеріали як прокатний лист і трубна заготовка стандартного профілю.

Обробка експериментальних даних виконувалася за наступними аналітичними залежностями:

$$S_1 = 3 \cdot U \cdot I; \quad P_{EM} = P_1 - \Delta P_M - \Delta P_{CT}; \quad M = P_{EM} / \Omega_C; \\ \Omega_C = \omega_C / p_D; \quad \omega_C = \pi \cdot n_C / 30; \quad s = (n_C - n) / n_C,$$

де S_1 – повна потужність двигуна; U – діюче значення фазної напруги мережі; I – діюче значення струму фази статорної обмотки; P_{EM} – величина електромагнітної потужності; P_1 – споживана потужність; ΔP_M – втрати в міді; ΔP_{CT} – втрати в сталі; M – електромагнітний момент двигуна; Ω_C – механічна кутова синхронна частота обертання поля; ω_C – електрична кутова синхронна частота обертання поля; p_D – кількість пар полюсів двигуна; s – величина ковзання ротора; n_C – синхронна частота обертання поля; n – частота обертання ротора АД.

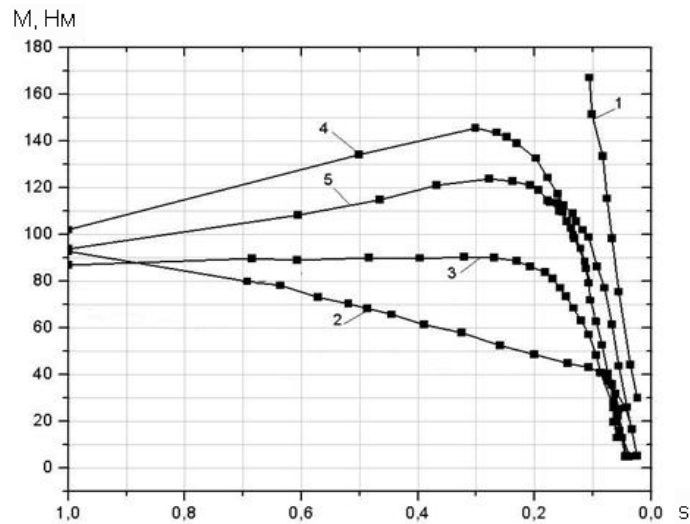
На основі проведених експериментальних досліджень побудовані механічні характеристики АД МТВ-412-8 з ІР різних конструкцій. Представлені на рис.3, 4 графіки залежностей $M = f(s)$ та $I = f(s)$ дозволяють проаналізувати вплив на характеристики АД схем вмикання напівфаз котушок та товщини внутрішньої феромагнітної стінки.

На рис.3, а), б) показані механічні характеристики АД, отримані у результаті дослідження впливу способів вмикання напівфаз котушок ІР. З отриманих результатів видно, що природна механічна характеристика (1 – на рис. 3, а), б) у розглянутому діапазоні моментів має практично лінійний вигляд, проходячи через точку номінального струму $I = 50$ А при ковзанні $s = 0,1$. При цьому величина електромагнітного моменту становить 170 Н·м. Порівнюючи природну механічну характеристику з характеристиками АД при увімкненому у роторне коло ІР (криві 2, 3, 4, 5), бачимо, що наявність ІР призводить до зниження жорсткості механічних характеристик і зниження критичного моменту. Механічна характеристика з ІР (крива 2) при паралельно-узгодженому вмиканні напівкатушок і товщиною стінки між ними 4 мм має більшу жорсткість у районі малих ковзань і різко змінюється при $s = 0,08$. У цьому випадку спостерігається зміна струму. При такому вмиканні обмоток ІР двигун має пусковий струм $I = 48$ А і пусковий момент $M = 93$ Н·м.

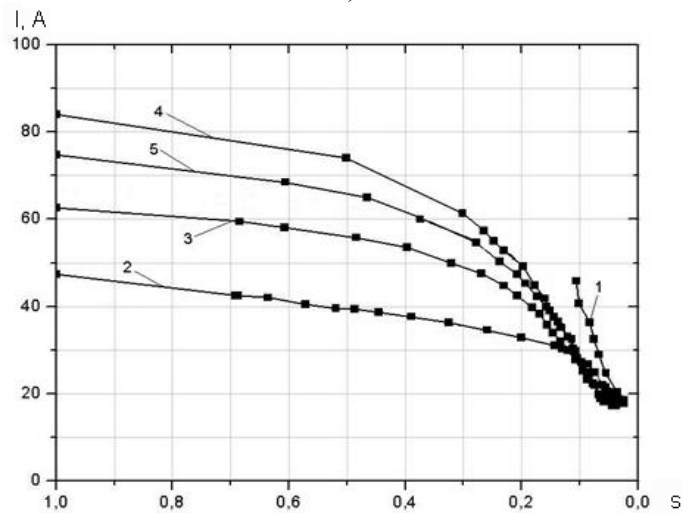
При паралельно-зустрічному вмиканні напівкатушок і товщині середньої стінки 4 мм механічна характеристика (крива 3) різко відрізняється від характеристики при паралельно-узгодженому вмиканні. При цьому збільшується максимальне значення моменту, а величина пускового моменту у порівнянні з паралельно-узгодженим вмиканням котушок зменшується й становить 87 Н·м. Крім того, пусковий струм значно зростає й становить 62 А.

Зменшення товщини середнього листа з 4 до 2 мм при паралельно-зустрічному вмиканні котушок призводить до різкого збільшення максимального моменту. При цьому механічна характеристика (крива 4) має явно виражений максимум (рис.3, а), пусковий момент зростає до 102 Н·м, а пусковий струм – до 84 А, що у порівнянні з кривою 3 на 22% більше. Отримані результати показують, що зменшення товщини стінки між котушками призводить до появи максимуму механічних характеристик, збільшення струму.

Проведені дослідження показують, що найкращі характеристики спостерігаються при паралельно-зустрічному вмиканні котушок з товщиною середнього листа 4 мм (крива 3). У цьому випадку механічна характеристика не має явно вираженого максимуму, а величина струму у порівнянні з паралельно-узгодженим вмиканням зростає усього на 14%.



а)



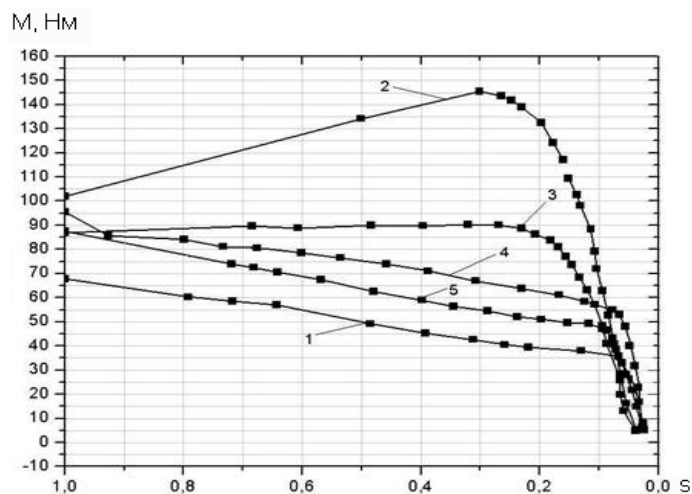
б)

- 1 – природна характеристика АД;
- 2 – між напівфазами котушки стінка товщиною 4 мм, напівфази увімкнені узгоджено;
- 3 – між напівфазами котушки стінка товщиною 4 мм, напівфази увімкнені зустрічно;
- 4 – між напівфазами котушки стінка товщиною 2 мм, напівфази увімкнені зустрічно;
- 5 – між напівфазами котушки стінка товщиною 2 мм, напівфази увімкнені узгоджено

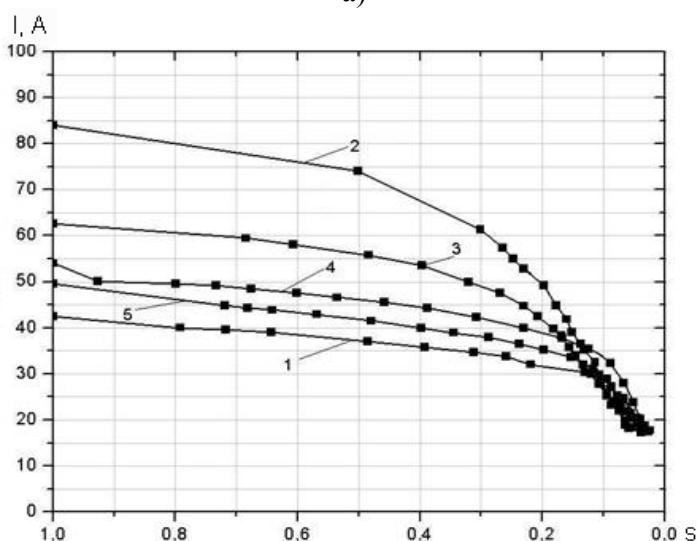
Рисунок 3 – Залежність електромагнітного моменту (а) і струму статора (б) АД від величини ковзання

На рис.4, а), б) показано характеристики АД з IP при паралельно-зустрічних увімк-нених котушках у фазі і різній товщині середнього листа (від 2 мм до 8 мм).

З отриманих результатів видно, що при товщині середнього феромагнітного листа 2 мм у механічній характеристиці спостерігається явно виражений максимум, пусковий момент становить $M = 102 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а пусковий струм $I = 84 \text{ А}$. При цьому коефіцієнт потужності має максимальне значення $\cos \varphi = 0,65$ при ковзанні $s = 0,15$. Збільшення товщини середнього листа з 2 до 4 мм (крива 3) призводить до того, що механічна характеристика не має явно вираженого максимуму й набуває екскаваторного вигляду. Пусковий момент при цьому становить $M = 87 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а пусковий струм знижується до 63 А.



а)



б)

- 1 – у роторі АД ІР класичної конструкції;
 2 – між напівфазами котушки стінка товщиною 2 мм, напівфази увімкнені зустрічно;
 3 – між напівфазами котушки стінка товщиною 4 мм, напівфази увімкнені зустрічно;
 4 – між напівфазами котушки стінка товщиною 6 мм, напівфази увімкнені зустрічно;
 5 – між напівфазами котушки стінка товщиною 8 мм, напівфази увімкнені зустрічно

Рисунок 4 – Залежність електромагнітного моменту (а) і струму статора (б) АД від величини ковзання

Збільшення товщини середньої стінки до 4 мм призводить до зменшення максимуму коефіцієнта потужності, який становить $\cos \varphi = 0,52$. Подальше збільшення товщини середньої стінки до 6-8 мм (криві 4, 5) призводить до зниження пускового моменту, пускового струму й коефіцієнта потужності. При цьому механічна характеристика залишається досить жорсткою без явно вираженого максимуму.

Висновки. Проведені дослідження показують, що феромагнітна вставка (середній лист) впливає на електромеханічні характеристики АД з ІР. Зміною товщини вставки можна регулювати форму механічних характеристик. Найкращі механічні характеристики АД з ІР має при паралельно-зустрічному вмиканні котушок і при товщині вставки 4 мм для даного типу двигуна. В подальших експериментах необхідно дослідити гальмівні режими роботи АД з ІР.

ЛІТЕРАТУРА

1. Власов В.Г. Бесконтактные асинхронные двигатели с индукционными частотозависимыми сопротивлениями в цепи ротора: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01. Ин-т электродинамики НАН Украины. Киев, 1970. 18с.
2. Головань В.И. Разработка и исследование асинхронных двигателей с индукционным сопротивлением в цепи ротора: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01. Ин-т электродинамики НАН Украины. Киев, 1991. 18с.
3. Вербовой А.П., Вербовой П.Ф., С'янов О.М. Проектування асинхронних двигунів. Дніпродзержинськ: ДДГУ, 2013. 528с.

Надійшла до редколегії 03.06.2019.

УДК 621.314

DOI 10.31319/2519-2884.35.2019.46

С'ЯНОВ О.М., д.т.н., професор
КОСУХІНА О.С., к.т.н., доцент
КОСУХІН О.В., аспірант

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

**ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА
З ЧАСТОТНО-ЗАЛЕЖНИМ ІНДУКЦІЙНИМ РЕОСТАТОМ**

Вступ. На сьогоднішній день асинхронні двигуни (АД) займають не менше 80% всіх видів електродвигунів, задіяних в промисловості і побуті. Як відомо, серед такого типу електродвигунів існують АД з короткозамкненим (КР) і фазним ротором (ФР). Переваги АД з ФР в тому, що вони мають кращі пускові властивості, ніж АД з КР [1, 2]. Недоліком АД з ФР є великі масо-габаритні показники, пов'язані з обмеженням пускових струмів.

Для зменшення пускових струмів в АД з ФР широке застосування отримав спосіб ввімкнення в коло обмотки ФР реостата з плавним або ступінчастим контактним перемикачем величини активного опору. Зазвичай, в таких системах електроприводу (ЕП) реостати з'єднані з фазними обмотками через щіткові апарати і контактні кільця, що розташовані на валу АД. При роботі в номінальному режимі АД реостат вимикається, а фаза обмотка ротора закорочується [3,4].

В ході експлуатації таких систем виявилось, що задіяна контактна апаратура має низьку надійність, а великі масо-габаритні показники знижують коефіцієнт корисної дії (ККД) і ускладнюють їх експлуатацію в тяжких умовах пуску. Одним із способів вирішення даної проблеми є ввімкнення в коло ротора індукційного реостату (ІР) [3, 4].

Асинхронний двигун з ІР дозволяє забезпечити плавний пуск, зменшити кількість пускової апаратури та підвищити надійність ЕП. Головним недоліком ІР є необхідність використання великої кількості міді для котушки ІР та проектування ІР з урахуванням електромагнітних параметрів АД.

Постановка задачі. Метою роботи є розробка математичної моделі ІР для оптимізації електромагнітних параметрів при живленні від напруги підвищеної частоти. Завданням дослідження є зменшення кількості міді в ІР та розроблення ЕП з можливістю керування електромагнітними параметрами ІР.

Результати роботи. Основні конструкції ІР зображено на рис.1. Найпростіша конструкція ІР являє собою котушку, яка намотана на сталевому циліндрі, стрижні або