

## 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

осерді іншої форми та 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 цьому випадку ІР можна розробляти не для кожного окремого двигуна, а створити уніфікований ІР, електромагнітні параметри якого обираються зміною частоти струму в котушці. Для розв'язання цієї задачі розроблена математична модель ІР, яка створена на основі рівнянь Максвелла в тривимірній постановці з урахуванням котушки ІР.

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

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

де  $A$  – векторний магнітний потенціал;  $\sigma$  – питома провідність середовища;  $x, y, z$  – координати області;  $J$  – щільність струму;  $\nu$  – магнітний опір матеріалу.

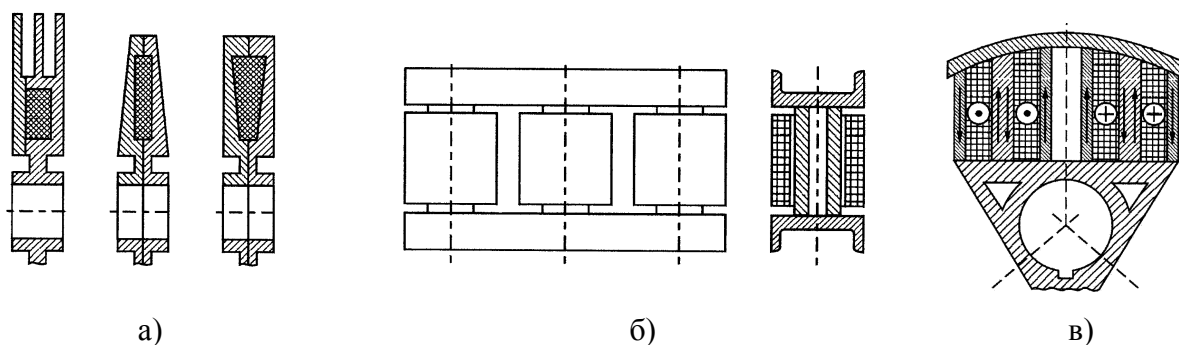


Рисунок 1 – Існуючі варіанти виконання ІР у вигляді: а) порожніх масивних феромагнітних дисків; б) стрижневого типу; в) зубчастої конструкції

Щільність струму в обмотці ІР визначається 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 таким чином:

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

де  $r_{02}$  – активний опір в котушці;  $i_{02}$  – струм в котушці;  $l$  – довжина витка.

Тоді повна тривимірна математична модель ІР в польовій постановці матиме вигляд [4]:

$$-\nabla(\nu \nabla A) = \left\{ \begin{array}{l} 0 - \text{in airspace} \\ -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \text{in IR screen} \\ \frac{N_{Wr} i_{02}}{S_{Wr}} - \text{in IR coil} \end{array} \right\}. \quad (4)$$

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 осердя 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, яка зображена на рис.2а. ІР складається з циліндричної частини, в якій знаходиться мідна котушка, і бокових пластин квадратної форми. Початкова кількість витків обмотки становить  $W=50$ . Масивні елементи конструкції виготовлені зі сталі марки Ст3. Конструкція ІР з масивними пластинами повністю екранована, а її форма радіального перерізу має вигляд прямокутника.

Для розв'язання отриманих рівнянь тут і далі була використана студентська версія програми Ansys. Після триангуляції ІР за допомогою автоматичного генератора сітки кінцевих елементів (АГСКЕ), отримана тривимірна дискретна модель ІР (рис.2, б).

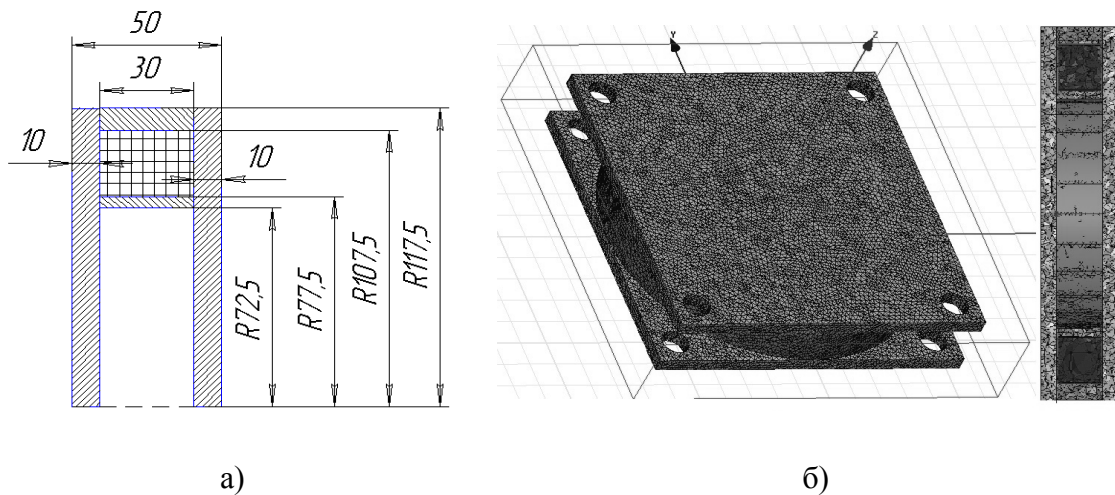


Рисунок 2 – Геометричні розміри класичної конструкції ІР (а); дискретна модель ІР та поперечний переріз ІР з АГСКЕ (б)

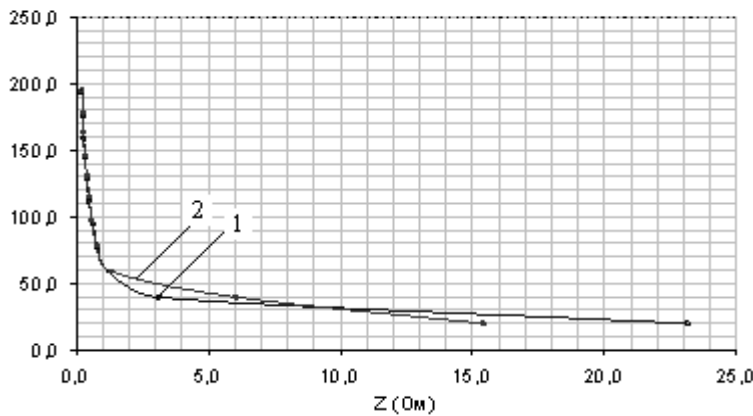
Розрахунок моделі проведено при напрузі живлення від 20 до 200 В і частоті 50, 130, 200, 350 Гц. Розрахунок проводився з кроком в 20В на кожному з частотних діапазонів. У табл.1 наведено результати моделювання. Як видно з табличних даних, опір ІР зростає з підвищенням частоти напруги живлення. Таким 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.3). Внаслідок проведеного моделювання і розрахунків можна зробити висновок, що підвищення частоти напруги живлення в ІР веде до скорочення кількості витків в котушці і зменшення її ваги з 2кг 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 разів.

Таким чином, згідно з математичними моделями ІР, реалізованими в нелінійному програмному середовищі, вдосконалення конструкції ІР в напрямку скорочення масогабаритних показників є технічно можливим і економічно доцільним. Система ЕП в цьому випадку буде включати в себе АД, перетворювач частоти (ПЧ) і ІР. Пере-

Таблиця 1 – Результати моделювання

F=50Hz	W=50	F=130Hz	W=25	F=200Hz	W=50	F=350Hz	W=50
U (B)	Z(ohm)	U (B)	Z(ohm)	U (B)	Z ohm)	U (B)	Z (ohm)
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



1 – з частотою 50 Гц та кількістю витків котушки 50;  
2 – з частотою 130 Гц та кількістю витків котушки 25

Рисунок 3 – Залежність опору IP від напруги живлення

творювач частоти складається з випрямляча, ланки постійного струму та автономного інвертора.

Для сумісного дослідження АД з IP розроблена математична модель, яка включає в себе АД, перетворювач частоти та IP (рис.4).

У даній моделі АД не розглядаються процеси у шихтованих осердях статора й ротора, а диференціальні рівняння рівноваги напруги записані для контурів АВ і де  $i$  – миттєві значення

$$\left\{ \begin{array}{l} [u] = [r][i] + ([L(\gamma, i)] + [D(\gamma, i)]) \frac{d[i]}{dt} + [G(\gamma, i)] \frac{d\gamma}{dt} p[i]; \\ \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{M - M_C}{J}; \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega_2; \\ -\nabla(v\nabla A) = \begin{cases} -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} & \text{in IR screen;} \\ \frac{N_W r^i \omega_2}{S_W r} & \text{in IR coil;} \end{cases} \end{array} \right. \quad (5)$$

струмів у фазах;  $u$  – миттєві значення лінійних напруг;  $r$  – активні опори фаз;  $\gamma$  – кут повороту ротора відносно статора;  $p$  – число пар полюсів;  $\omega_2$  – кутова частота обертання ротора;  $J$  – момент інерції;  $M_c$  – статичний момент на-

вантаження.

Матриця  $[G(\gamma, i)]$  визначається шляхом диференціювання матриці  $[L(\gamma, i)]$  за кутом повороту ротора, а  $[D(\gamma, i)]$  за струмом:

$$[G(\gamma, i)] = \frac{\partial [L(\gamma, i)]}{\partial \gamma};$$

$$[D(\gamma, i)] = \frac{\partial [L(\gamma, i)]}{\partial i}.$$
(6)

Електромагнітний момент визначається за формулою:

$$M = L_{\mu}(i) p [(2i_a + i_b) i_A + 2(i_a + i_b) i_B] \sin(p\gamma) + (i_A i_b - i_B i_a) \sqrt{3} \cos(p\gamma).$$

Схему моделі показано на рис.5. Модель складається з АД, представленого рівняннями кола, перетворювача частоти, який включає в себе некерований випрямляч, ланку постійного струму та інвертор. Індукційний реостат представлено активним опором котушки та індуктивністю розсіяння.

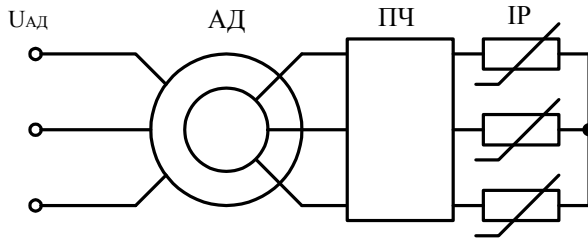


Рисунок 4 – Блок-схема ЕП з ІР та перетворювачем частоти

Електромагнітні параметри екрана котушки ІР розраховуються методом поля в тривимірній постановці на кожному часовому кроці розрахунку перехідного процесу.

Моделювання виконано для кранового АД МТВ-412-8 ( $P_{ном} = 22$  кВт;

$n_{ном} = 720$  об/хв.;  $\cos\phi = 0,69$ ;  $\eta = 83\%$ ;  $I_{1ном} = 58$  А,  $J = 3$  кгм<sup>2</sup>) при вмиканні обмоток зіркою. Частота

напруги живлення в роторі змінювалася від 200 до 2 Гц на часовому інтервалі 0-2 с з кроком 10 Гц. На основі результатів дослідження побудовані графіки перехідних процесів струму ротора, електромагнітного моменту, швидкості обертання, а також графік зміни опору ІР в роторі в залежності від частоти струму живлення (рис.6).

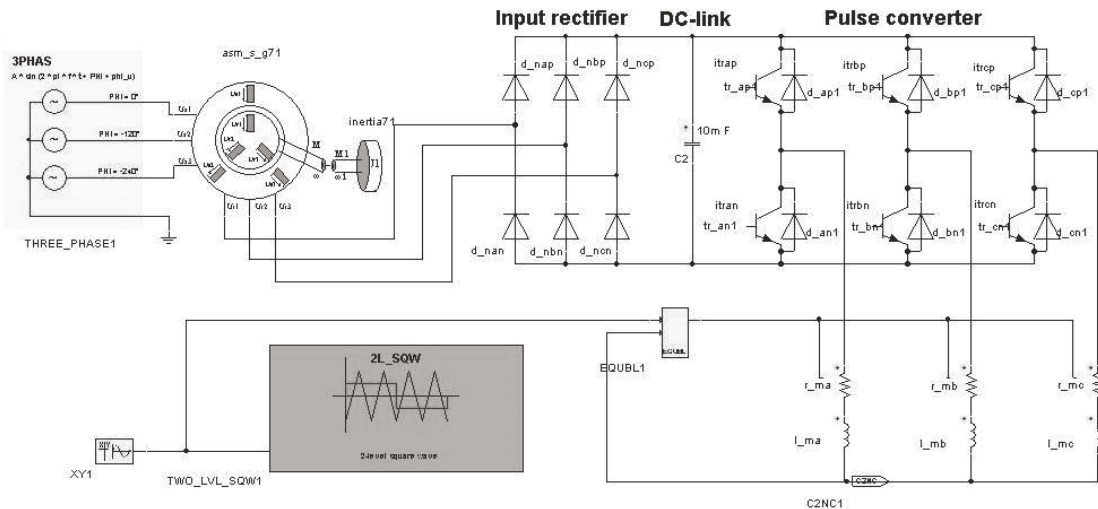


Рисунок 5 – Імітаційна модель АД з ІР

З рис.6 видно, що перетворювач частоти змінює частоту струму (рис.6, а) в колі ротора в залежності від швидкості обертання ротора (рис.6, б), миттєве значення моменту на початку пуску складає 690 Н/м, який плавно зменшується із зменшенням опору реостата, пусковий струм є однократним від номінального (рис.6, в), опори ІР змінюються із заданою залежністю (рис.6, г).

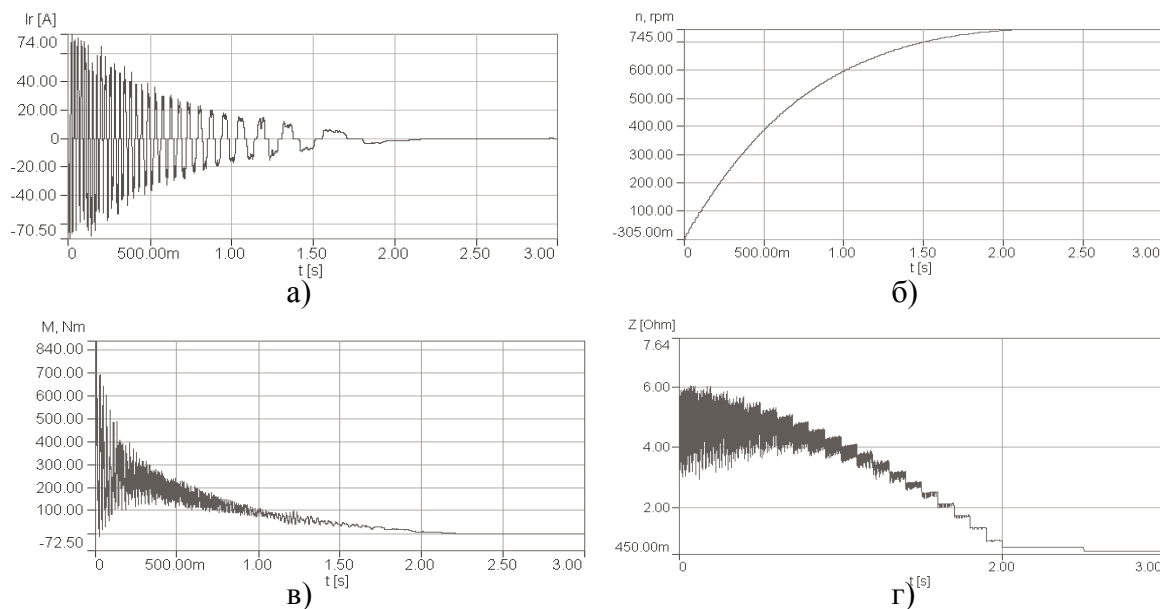


Рисунок 6 – Пуск АД з ІР від мережі

**Висновки.** Дослідження електромагнітних параметрів ІР при живленні від ПЧ показало, що збільшення частоти напруги живлення дозволяє зменшити кількість витків в котушці ІР в два рази. При цьому електромагнітні параметри будуть відповідати параметрам ІР при живленні від обмоток ротора.

З результатів математичного моделювання ЕП встановлено, що зміна частоти струму живлення в роторному колі АД МТВ-412-8 від 2 до 200 Гц призводить до розширення діапазону зміни опору ІР, який становить 0,45-7,6 Ом, і дозволяє обмежити величину пускових струмів АД. В подальших дослідженнях необхідно забезпечити автоматичне керування ІР в залежності від режиму роботи.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Ключев В.И. Теория электропривода. Москва: Энергоатомиздат, 2001. 704с.
2. Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 344с.
3. Вербовой А.П., Вербовой П.Ф., С'янов О.М. Проектування асинхронних двигунів. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. 528с.
4. Качура О.В., Количев С.В., С'янов О.М. Індукційні реостати з покращеними масогабаритними показниками для асинхронних двигунів з фазним ротором. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011. 209с.

Надійшла до редколегії 30.10.2019.