

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
Кафедра суднових електроенергетичних систем

Рекомендовано до захисту

в.о. зав. кафедри СЕЕС

 Обрубов А.В.

« ____ » _____ 2024 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до магістерської роботи

на тему УДОСКОНАЛЕНА МАТЕМАТИЧНА

МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Виконав: здобувач вищої освіти VI курсу,
групи 6365м

спеціальності 141 – Електроенергетика,
(шифр і назва спеціальності)

електротехніка та електромеханіка

спеціалізації Системи генерування
(назва спеціалізації)

електроенергії та електропостачання

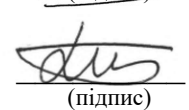
Безсмертний К.А.
(прізвище та ініціали)


(підпис)

Керівник Кімстач О.Ю.
(прізвище та ініціали)


(підпис)

Рецензент Білюк І.С.
(прізвище та ініціали)


(підпис)

Миколаїв 2024 р.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Суднових електроенергетичних систем
(повна назва кафедри)

Ступень вищої освіти магістр

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

Спеціалізація Системи генерування електроенергії та електропостачання
(назва спеціалізації)

ЗАТВЕРДЖУЮ

в.о. зав. кафедри СЕЕС
(скорочена назва кафедри)

 Обрубов А.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« » 202 р.

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Здобувачу вищої освіти Безсмертному Костянтину Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалена математична модель асинхронного двигуна

науковий керівник роботи Кімстач О.Ю., к.т.н, доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом НУК від « » 202 р. №

2. Строк подання студентом роботи « » 202 р.

3. Об'єкт дослідження електричні машини

4. Предмет дослідження математична модель асинхронного двигуна

5. Перелік задач, які потрібно вирішити проаналізувати математичні моделі (ММ) асинхронного двигуна (АД); удосконалити ММ АД за рахунок комплексного врахування магнітних втрат; розрахувати та проаналізувати динамічні характеристики АД.

6. Перелік тем публікацій Удосконалена математична модель асинхронного двигуна

7. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) ММ АД; заступні схеми АД; динамічні характеристики АД.

8. Дата видачі завдання «___»_____202__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапу роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз та порівняння ММ АД.	31.12.2023	<i>виконано</i>
2	Аналіз способів удосконалення ММ АД.	31.04.2024	<i>виконано</i>
3	Формування удосконаленої ММ АД.	01.09.2024	<i>виконано</i>
4	Розрахунок та порівняльний аналіз динамічних характеристик АД.	15.10.2024	<i>виконано</i>
5	Оформлення випускової роботи.	01.12.2024	<i>виконано</i>

Здобувач вищої освіти


(підпис)

Безсмертний К.А.
(прізвище та ініціали)

Науковий керівник


(підпис)

Кімстач О.Ю.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі виконано дослідження математичних моделей (ММ) асинхронних двигунів (АД) у розрізі різнобічного врахування магнітних втрат.

Виконано порівняльний аналіз ММ АД, які побудовані на основі ММ узагальненої електричної машини (УЕМ). Досліджено питання впливу потужності АД на величину похибки від неврахування магнітних втрат у роторі, для цього розраховані два АД.

Виконано порівняння динамічних характеристик при пуску для двох АД, потужності котрих відрізняються на порядок.

Ключові слова: асинхронний двигун, магнітні втрати, математична модель, похибка.

The master's thesis presents research on mathematical models (MM) of induction motors (IM) in terms of complex accounting of core losses.

A comparative analysis of MM of IM, based on MM of a generalized electric machine (GEM), is conducted. The problem of IM power influence on the error magnitude from not accounting for core losses in the rotor is researched; two IMs have been designed for this purpose.

A comparison of the dynamic curves at start-up is performed for two IMs, its powers differ by an order of magnitude.

Keywords: induction motor, core losses, mathematical model, error.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН.....	10
1.1. Узагальнена електрична машина.....	10
1.2. Математична модель узагальненої машини.....	12
Висновки до розділу 1	15
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА.....	16
2.1. Математична модель асинхронного двигуна	16
2.2. Удосконалена математична модель асинхронного двигуна, яка враховує магнітні втрати у роторі.....	17
2.3. Базова система одиниць для асинхронного двигуна.....	19
Висновки до розділу 2	20
РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМ ДОСЛІДЖЕННЯ РІЗНИЦІ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ, ЯКІ РОЗРАХОВАНІ ЗА РІЗНИМИ МАТЕМАТИЧНИМИ МОДЕЛЯМИ	21
3.1. Обґрунтування досліджень	21
3.2. Алгоритм дослідження	22
Висновки до розділу 3.	22
РОЗДІЛ 4. ПРИКЛАДИ ВИЗНАЧЕННЯ РІЗНИЦІ ВІД ВРАХУВАННЯ МАГНІТНИХ ВТРАТ У РОТОРІ ПРИ РОЗРАХУНКУ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА	23
4.1. Вихідні дані для порівняльного аналізу	23
4.2. Результати розрахунку та аналіз динамічних характери- стик	25
Висновки до розділу 4.	29
ВИСНОВКИ.....	30

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	31
ДОДАТОК А. Розрахунок АД з короткозамкненим ротором потужністю 0,18 кВт.....	33
ДОДАТОК Б. Розрахунок АД з короткозамкненим ротором потужністю 3 кВт.....	57
ДОДАТОК В. Розрахунок перехідних процесів для АД 0,18 кВт.....	81
ДОДАТОК Д. Розрахунок перехідних процесів для АД 3 кВт.....	87
ДОДАТОК Е. Копія сертифіката учасника конференції	93

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун

ЕЕ – електроенергія

ЕМ – електрична машина

ЕОМ – електронна обчислювальна машина

ММ – математична модель

МРС – магніторушійна сила

УЕМ – узагальнена електрична машина

ВСТУП

Аналіз динамічних режимів в електричних мережах неможливий без врахування динамічних властивостей основних видів навантажень [4, 10]. Для виконання дослідження динамічних режимів потрібне використання відповідних математичних моделей (ММ). Їх різновиди породжують проблему вибору, яка повинна вирішуватися обґрунтовано на підставі порівняльного аналізу.

Тому доцільно провести дослідження щодо порівняння ММ асинхронних двигунів (АД) без та з урахуванням втрат потужності у магнітопроводі ротора у залежності від величини потужності двигуна.

Основні напрямки досліджень полягають в отриманні пускових динамічних характеристик для АД за допомогою різних ММ та їх кількісному та якісному порівнянні.

Ці питання досліджень являються складовими частинами магістерської роботи.

Слід відмітити, що АД є найбільш поширеним елементом серед навантажень електричних мереж [11]. Тому дослідження та уточнення ММ АД є дуже важливим та актуальним питанням у галузі електроенергетики.

Для досліджень використовуються ММ, які побудовано на основі ММ узагальненої електричної машини (УЕМ) у двох осях [2, 5]. Дані ММ добре апробовані та відрізняються перевіреною адекватністю.

Метою магістерської роботи є визначення ефекту врахування магнітних втрат потужності у магнітопроводі ротора при розрахунку динамічних характеристик АД у залежності від його потужності.

Завдання магістерської роботи:

- виконати аналіз ММ АД;
- визначити алгоритм порівняльного аналізу динамічних характеристик АД, які розраховані за допомогою різних ММ;
- виконати кількісну та якісну оцінку відмінностей динамічних характеристик АД, які розраховані за різними ММ.

Об'єкт дослідження – асинхронні машини.

Предмет дослідження –математичні моделі.

Практичне значення отриманих результатів дозволяє:

- досягти більш точного визначення динамічних параметрів АД;
- збільшити точність налаштування систем релейного захисту та протиава-
рійної автоматики.

Особистий внесок:

- програмна реалізація алгоритмів математичного моделювання;
- виконання порівняльного аналізу отриманих результатів моделювання.

Результати досліджень: розглядалися на засіданнях кафедри Суднових електроенергетичних систем.

За результатами досліджень опубліковано у співавторстві одну статтю у міжнародному журналі [7].

РОЗДІЛ 1. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

1.1. Узагальнена електрична машина

У середині тридцятих років минулого сторіччя Габріель Крон, узагальнивши поняття про роботу електромеханічних перетворювачів різних конструкцій, запропонував загальну для всіх типів індуктивних електричних машин (ЕМ) ММ УЕМ.

Узагальнена електрична машина, по Г. Крону, це *абстрактна, двополюсна, двофазна, симетрична, ідеалізована машина подвійного живлення, що має дві пари ортогональних обмоток на роторі й статорі, що працює в стаціонарному тепловому режимі з одномірним обертальним механічним рухом.*

Широке поширення теорія УЕМ одержала, починаючи з 70-х років минулого сторіччя, завдяки розвитку ЕОМ, що дозволили використовуючи чисельні методи вирішувати системи нелінійних диференціальних рівнянь. Більшість успіхів у теорії та практиці сучасного електромашинобудування пов'язане з розвитком на базі УЕМ математичної теорії ЕМ.

Геометричним образом рівняння УЕМ можна представити за допомогою моделі найпростішої ЕМ в системі координат α і β (рис. 1.1).

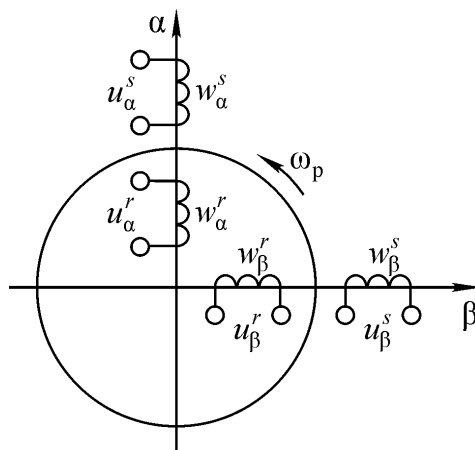


Рис. 1.1. Модель узагальненої електричної машини Г. Крона

Тут w_α^S, w_β^S – кількість витків обмотки статора по осям α і β ; w_α^R, w_β^R – кількість витків обмотки ротора по осям α і β ; $u_\alpha^S, u_\beta^S, u_\alpha^R, u_\beta^R$ – відповідно напруги по осям α і β на статорі й роторі; ω_p – кутова швидкість ротора.

Осі статорної та роторної обмоток збігаються з осями обраної системи координат (у цьому випадку із системою α, β).

Робочі процеси в будь-якій p -полюсної й m -фазної машині можна за допомогою координатних перетворень звести до процесів у дво полюсній двофазній узагальненій машині.

У двофазній машині – чотири обмотки, рівнянь напруги також чотири (мінімальна кількість рівнянь у порівнянні із кількістю рівнянь в одне-, трьох- і m -фазній машинах).

Досліджується ідеалізована машина подвійного живлення із гладким повітряним зазором без пазів на роторі й статорі, з обмотками у вигляді струмових шарів, які мають синусоїдальний розподіл МРС. Вона не насичена, не має нелінійних опорів, тому при живленні обмоток синусоїдальною напругою поле в повітряному зазорі синусоїдальне.

Математичний опис усіх типів ЕМ із круговим полем у повітряному зазорі може бути отриманий з ММ УЕМ (рис. 1.1).

Несинхронна (асинхронна) машина з узагальненої машини виходить, коли до обмоток статора із числом витків $w_{\alpha}^S, w_{\beta}^S$ підводяться синусоїдальні напруги частотою f_1 , зрушені в часі на 90° . В обмотках ротора при цьому протікають струми із частотою $f_2 = f_1 s$, які створюються прикладеними до обмоток ротора напругами або наводяться в них магнітними потоками обмоток статора. В асинхронній машині кутова (механічна) швидкість ротора не рівна синхронної кутової швидкості поля статора ($\omega_p \neq \omega_c$), але магнітні поля ротора й статора нерухливі відносно один одного, тому що сума кутової (механічної) швидкості ротора (ω_p) і кутової швидкості магнітного поля ротора (ω_2) рівна ω_c .

Синхронну машину можна одержати з узагальненої машини, якщо до обмоток статора підвести змінні напруги, а до обмоток ротора – постійну напругу або, навпаки, до статора – постійну, а до обмоток ротора – змінні напруги. При цьому $\omega_p = \omega_c$, тобто поля статора і ротора нерухливі відносно один одного. Якщо постійна

напруга підводиться до обмоток статора, то магнітне поле ротора обертається в напрямку, протилежному напрямку обертання ротора, а поля статора і ротора знову нерухливі щодо нерухливої системи координат. При живленні обмоток постійним струмом досить мати одну обмотку збудження, у якій результуюча сила намагнічування дорівнює геометричній сумі сил намагнічування кожної обмотки.

В машинах постійного струму (МПС) в секціях обмотки якоря протікає багатофазний змінний струм, перетворений колектором – механічним перетворювачем частоти з постійного струму. У МПС поле якоря обертається в напрямку, протилежному напрямку обертання якоря. При $\omega_p = \omega_c$ поле якоря нерухомо щодо обмотки збудження і нерухливої системи координат α, β .

Колектор можна замінити перетворювачем частоти на напівпровідникових елементах. У цьому випадку процеси перетворення енергії у повітряному зазорі принципово не змінюються. При наявності колектору частота жорстко залежить від швидкості ω_p , а за допомогою напівпровідникового перетворювача можна створити гнучкий зворотний зв'язок між f_2 і ω_p .

У колекторних машинах змінного струму в обмотках статора і ротора протікають змінні струми, а перетворювач частоти перетворює змінний струм частоти мережі в змінний струм частоти ковзання. Як і у всіх ЕМ, поля статора і ротора в колекторних машинах змінного струму нерухливі відносно один одного. Ці машини можуть бути однофазними, трифазними або багатофазними; обмотки статора і ротора можуть з'єднуватися послідовно, паралельно або мати магнітний зв'язок.

У трансформатор УЕМ перетворюється при швидкості ротора $\omega_c = \omega_p = 0$. При аналізі електромагнітного перетворення енергії в трансформаторі достатньо розглядати окремо пару обмоток на статорі та роторі по осі α або β , тому що при нерухливому роторі відсутній зв'язок між обмотками, зміщеними в просторі на 90° .

1.2. Математична модель узагальненої машини

ММ УЕМ може бути представлена у різних системах координат, це залежить від швидкості їх обертання. У системі координат u, v , яка обертається з довільною швидкістю ω_k , рівняння УЕМ мають вигляд:

$$\begin{aligned}
u_u^s &= r_u^s i_u^s + \frac{d}{dt} L_u^s i_u^s + \frac{d}{dt} M i_u^r + \omega_K L_v^s i_v^s + \omega_K M i_v^r; \\
u_u^r &= r_u^r i_u^r + \frac{d}{dt} L_u^r i_u^r + \frac{d}{dt} M i_u^s + (\omega_r - \omega_K) L_v^r i_v^r + (\omega_r - \omega_K) M i_v^s; \\
u_v^r &= r_v^r i_v^r + \frac{d}{dt} L_v^r i_v^r + \frac{d}{dt} M i_v^s - (\omega_r - \omega_K) L_u^r i_u^r - (\omega_r - \omega_K) M i_u^s; \\
u_v^s &= r_v^s i_v^s + \frac{d}{dt} L_v^s i_v^s + \frac{d}{dt} M i_v^r - \omega_K L_u^s i_u^s - \omega_K M i_u^r; \\
J \frac{d\omega_r}{dt} &= (M_{\text{ем}} - M_{\text{с}}); \\
M_{\text{ем}} &= \frac{mp}{2} M (i_v^s i_u^r - i_u^s i_v^r).
\end{aligned} \tag{1.1}$$

Нерухлива щодо статора система координат (α, β) виходить, якщо в систему рівнянь (1.1) підставити $\omega_K = 0$:

$$\begin{aligned}
u_\alpha^s &= r_\alpha^s i_\alpha^s + \frac{d}{dt} L_\alpha^s i_\alpha^s + \frac{d}{dt} M i_\alpha^r; \\
u_\alpha^r &= r_\alpha^r i_\alpha^r + \frac{d}{dt} L_\alpha^r i_\alpha^r + \frac{d}{dt} M i_\alpha^s + \omega_r L_\beta^r i_\beta^r + \omega_r M i_\beta^s; \\
u_\beta^r &= r_\beta^r i_\beta^r + \frac{d}{dt} L_\beta^r i_\beta^r + \frac{d}{dt} M i_\beta^s - \omega_r M i_\alpha^s - \omega_r L_\alpha^r i_\alpha^r; \\
u_\beta^s &= r_\beta^s i_\beta^s + \frac{d}{dt} L_\beta^s i_\beta^s + \frac{d}{dt} M i_\beta^r; \\
J \frac{d\omega_r}{dt} &= (M_{\text{ем}} - M_{\text{с}}); \\
M_{\text{ем}} &= \frac{mp}{2} M (i_\beta^s i_\alpha^r - i_\alpha^s i_\beta^r).
\end{aligned} \tag{1.2}$$

Система координат, яка обертається зі швидкістю ротора (d, q) , виходить, якщо в систему (1.1) підставити $\omega_K = \omega_r$:

$$\begin{aligned}
u_d^s &= r_d^s i_d^s + \frac{d}{dt} L_d^s i_d^s + \frac{d}{dt} M i_d^r - \omega_r L_q^s i_q^s - \omega_r M i_q^r; \\
u_d^r &= r_d^r i_d^r + \frac{d}{dt} L_d^r i_d^r + \frac{d}{dt} M i_d^s; \\
u_q^r &= r_q^r i_q^r + \frac{d}{dt} L_q^r i_q^r + \frac{d}{dt} M i_q^s; \\
u_q^s &= r_q^s i_q^s + \frac{d}{dt} L_q^s i_q^s + \frac{d}{dt} M i_q^r + \omega_r L_d^s i_d^s + \omega_r M i_d^r; \\
J \frac{d\omega_r}{dt} &= (M_{\text{ем}} - M_{\text{с}}); \\
M_{\text{ем}} &= \frac{mp}{2} M (i_q^s i_d^r - i_d^s i_q^r).
\end{aligned} \tag{1.3}$$

Систему координат α, β доцільно застосовувати для дослідження асинхронних машин і трансформаторів; систему координат d, q – для опису процесів перетворення енергії в синхронних машинах і машинах постійного струму; а система координат u, v – універсальна система координат.

Взаємне перетворення координат здійснюється за умови незмінності (інваріантності) потужності, дозволяє спростити рівняння та одержати постійні коефіцієнти перед змінними, але не зменшує кількість рівнянь, які описують процес перетворення енергії.

Система рівнянь (1.2) містить 5 незалежних змінних $U_{\alpha}^s; U_{\beta}^s; U_{\alpha}^r; U_{\beta}^r; M_C$ і 5 залежних $i_{\alpha}^s; i_{\beta}^s; i_{\alpha}^r; i_{\beta}^r; \omega_r$. Коефіцієнти перед залежними змінними називаються *параметрами* ЕМ. Ними є активні опори, індуктивності та взаємні індуктивності обмоток (1.2), а також момент інерції J , кількості пар полюсів p і фаз m . Електромеханічне перетворення електричної енергії (ЕЕ) можливо як при постійних параметрах і змінних напругах або струмах, так і при постійних напругах (струмах) і при змінних параметрах (активних або індуктивних опорах). При зміні моменту інерції J відбувається нагромадження механічної енергії в ЕМ або віддача її в мережу. Значення параметрів, необхідні для побудови ММ, можуть бути отримані:

- розрахунковим шляхом по формулам проектування ЕМ;
- за каталожними даними;
- дослідним шляхом при випробуванні реальної машини.

Системи рівнянь електромеханічного перетворення енергії (1.1...1.3) при постійних коефіцієнтах перед змінними – нелінійні (тому що в рівняння електромагнітного моменту входять добутки залежних змінних) і не мають аналітичного розв'язку. Наближені рішення з високою точністю, часто навіть не потрібної для розв'язку інженерних завдань, можна отримати при розрахунку на ЕОМ. Рівняння електромеханічного перетворення енергії не мають розв'язку, якщо один з параметрів, котрий входить у рівняння, дорівнює нулю або нескінченності.

Якщо в контурах, де замикаються струми, відсутній активний опір, тоді пристрій працює як накопичувач енергії. Постійні часу дорівнюють нескінченності,

між струмами статора і ротора немає зрушення по фазі та електромагнітний момент дорівнює нулю.

Якщо в роторі та статорі моделі УЕМ є тільки активні складові змінного струму, тоді момент дорівнює нулю, тому що відсутній зв'язок між обмотками, що обумовлюється реактивними струмами, які створюють магнітне поле.

Незалежні та залежні змінні в рівняннях (1.1...1.3) можуть мінятися місцями, і тоді системи (1.1...1.3) описують струмовий привод (тобто в цьому випадку електрична мережа є не джерелом напруги, а джерелом струму).

Висновки до розділу 1.

Виконано огляд узагальненої електричної машини та її математичної моделі, що визначило її як найбільш універсальний та добре апробований інструмент для моделювання електричних машин, тому вона обирається за основу для подальших досліджень.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

2.1. Математична модель асинхронного двигуна

Асинхронний двигун (АД) є найбільш масовим електродвигуном, завдяки конструктивній простоті широко застосовується у сучасних електромеханічних системах [2, 11]. Для побудови моделей АД в більшості випадків використовується математичний опис динамічних процесів в УЕМ. Такий опис для плоскої ортогональної системи координат u і v , яка обертається з довільною швидкістю ω_k , містить у своєму складі:

- диференціальні рівняння електричної рівноваги напруги в обмотках статора та ротора:

$$\begin{aligned} U_{1u} &= i_{1u}R_1 + \frac{d\Psi_{1u}}{dt} - \omega_k\Psi_{1v} \\ U_{1v} &= i_{1v}R_1 + \frac{d\Psi_{1v}}{dt} + \omega_k\Psi_{1u} \\ U_{2u} &= i_{2u}R_2 + \frac{d\Psi_{2u}}{dt} - (\omega_k - \omega_{ел})\Psi_{2v} \\ U_{2v} &= i_{2v}R_2 + \frac{d\Psi_{2v}}{dt} + (\omega_k - \omega_{ел})\Psi_{2u} \end{aligned}$$

- рівняння для потокозчеплень:

$$\begin{aligned} \Psi_{1u} &= L_1 i_{1u} + M i_{2u} \\ \Psi_{1v} &= L_1 i_{1v} + M i_{2v} \\ \Psi_{2u} &= L_2 i_{2u} + M i_{1u} \\ \Psi_{2v} &= L_2 i_{2v} + M i_{1v} \end{aligned}$$

- рівняння для електромагнітного моменту:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3}{2} p_n M (i_{1v} i_{2u} - i_{1u} i_{2v}) \\ M &= \frac{3}{2} p_n \frac{k_1}{\sigma L_2} (\Psi_{1u} \Psi_{2v} - \Psi_{1v} \Psi_{2u}) \end{aligned}$$

де p_n – кількість полюсів АД, $k_1 = M/L_1$ – безрозмірний коефіцієнт, $\sigma = 1 - M^2/(L_1 \cdot L_2)$ – коефіцієнт розсіювання машини.

- рівняння руху механічної частини електропривода, яке в найпростішому випадку має такий вигляд:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c.$$

Очевидно, що для побудови моделі АД необхідно вибрати значення швидкості обертання системи координат ω_k , з рівнянь електричної рівноваги напруги за допомогою рівняння для потокозчеплень виключити залежні змінні й вибрати необхідне рівняння обчислення електромагнітного моменту.

З рівнянь потокозчеплень визначаються струми відповідних обмоток АД

$$\begin{aligned} i_{1u} &= \frac{1}{L_1 L_2 - M^2} (\Psi_{1u} L_2 - \Psi_{2u} M); \\ i_{1v} &= \frac{1}{L_1 L_2 - M^2} (\Psi_{1v} L_2 - \Psi_{2v} M); \\ i_{2u} &= \frac{1}{L_1 L_2 - M^2} (\Psi_{2u} L_1 - \Psi_{1u} M); \\ i_{2v} &= \frac{1}{L_1 L_2 - M^2} (\Psi_{2v} L_1 - \Psi_{1v} M). \end{aligned}$$

2.2. Удосконалена математична модель асинхронного двигуна, яка враховує магнітні втрати у роторі

Розгляд динамічних режимів АД традиційно виконується на основі ММ узагальненої електричної машини або її уточнених варіантів [9]. Удосконалені моделі є більш кращими, тому що забезпечують максимально можливий адекватний результат.

При відсутності врахування магнітних втрат ММ є менш стійкою, що характеризується довго або повністю незатухаючими коливаннями в сталому режимі, які присутні на результуючих кривих, отриманих у роботі [8].

Уточнена ММ [5], яка враховує постійні та змінні магнітні втрати, є більш кращою у використанні, тому що магнітне коло і, відповідно, втрати потужності в ньому виконують роль своєрідного демпфера АД в процесі перетворення енергії.

Виконати врахування постійних магнітних втрат не представляє особливих

проблем [2, 8, 9], для цього необхідно знати активний опір гілки намагнічування Т-подібної заступної схеми. Його можна визначити при проектуванні АД або за паспортним даними, використовуючи одну з відомих методику.

Для коректної оцінки змінних магнітних втрат необхідно знати геометрію й магнітні навантаження для магнітопроводу ротора, що можливо тільки при проектуванні АД, а при наявності паспортних даних є недоступною інформацією.

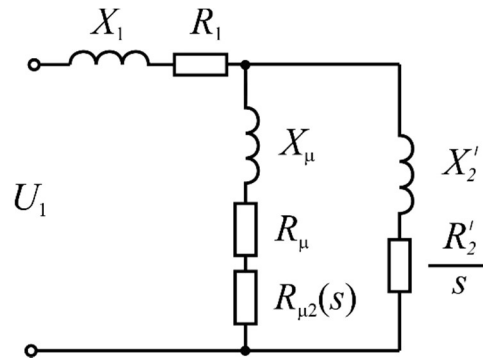


Рис. 2.1. Удосконалена Т-подібна заступна схема АД

Статична ММ АД представляється у вигляді удосконаленої заступної схеми (рис. 2.1), яка відрізняється наявністю змінної складової активного опору гілки намагнічування $R_{\mu 2}(s)$, яка відображає магнітні втрати у магнітопроводі ротора. Тоді рівняння потокозчеплень в осях u і v уточненої ММ АД у відносних одиницях

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{su}}{dt} = U_{su} - r_s \cdot i_{su} + \psi_{sv} - [r_{\mu} + r_{\mu 2}(s)] \cdot (i_{su} + i_{ru}); \\ \frac{d\psi_{sv}}{dt} = U_{sv} - r_s \cdot i_{sv} - \psi_{su} - [r_{\mu} + r_{\mu 2}(s)] \cdot (i_{sv} + i_{rv}); \\ \frac{d\psi_{ru}}{dt} = -r_r \cdot i_{ru} + s \cdot \psi_{rv} - s \cdot [r_{\mu} + r_{\mu 2}(s)] \cdot (i_{su} + i_{ru}); \\ \frac{d\psi_{rv}}{dt} = -r_r \cdot i_{rv} - s \cdot \psi_{ru} - s \cdot [r_{\mu} + r_{\mu 2}(s)] \cdot (i_{sv} + i_{rv}), \end{cases}$$

де $i_{su}, i_{sv}, i_{ru}, i_{rv}, \psi_{su}, \psi_{sv}, \psi_{ru}, \psi_{rv}, U_{su}, U_{sv}$ – струми, потокозчеплення й напруги обмоток статора й ротора у відносних одиницях по осях u і v відповідно; r_s, r_r – активні опори обмоток статора й ротора, s – ковзання; r_{μ} і $r_{\mu 2}(s)$ – активні опори гілки намагнічування у відносних одиницях.

Система уточнених рівнянь потокозчеплень в осях u і v , яка представлена вище, отримана шляхом зворотних перетворень статичної моделі (рис. 2.1), при

цьому швидкість обертання осей дорівнює швидкості обертання поля статора, тобто базовій величині, котра у відносних одиницях дорівнює 1. У цілому для досліджень за основу використовується ММ УЕМ в осях u і v , застосування якої веде до прийняття всіх її припущень, за винятком знехтування магнітними втратами. Відповідно струми $i_{su}, i_{sv}, i_{ru}, i_{rv}$ і потокозчеплення $\psi_{su}, \psi_{sv}, \psi_{ru}, \psi_{rv}$ це проекції просторових комплексів на ортогональні осі u і v .

За основу побудови методики розрахунків змінної складової активного опору гілки намагнічування Т-подібної заступної схеми АД використовується одна з відомих методика проектування АД.

2.3. Базова система одиниць для асинхронного двигуна

Для переведення абсолютних величин у відносні треба скористатися базисними значеннями. За базисні напругу U_6 та струм I_6 приймаються їх номінальні значення. Базисне значення часу, с

$$t_6 = \frac{1}{f_1},$$

де f_1 – частота напруги мережі, Гц.

Базисне значення для частоти обертання, рад/с

$$\omega_6 = \frac{2\pi f_1}{p}.$$

Базисне значення для моменту на валу, Н·м

$$M_6 = \frac{U_6 \cdot I_6}{\omega_6}.$$

Базисне значення для опору, Ом

$$z_6 = \frac{U_6}{I_6}.$$

Базисне значення для моменту інерції, кг·м²

$$J_6 = \frac{2M_6}{\omega_6^2}.$$

Базисні величини використовуються для розрахунку у межах ММ АД, але

для відображення результатів (динамічних характеристик) доцільно використовувати відносні одиниці, тому після заповнення матриць динамічних характеристик в них треба виконати перерахунок моменту та часу.

Висновки до розділу 2.

Виконано огляд ММ АД , серед котрих визначено ММ, яка враховує змінні магнітні втрати потужності у роторі. На підставі аналізу попередніх досліджень встановлено, що така ММ АД є найбільш вдосконаленою.

РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМ ДОСЛІДЖЕННЯ РИЗНИЦІ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ, ЯКІ РОЗРАХОВАНІ ЗА РІЗНИМИ МАТЕМАТИЧНИМИ МОДЕЛЯМИ

3.1. Обґрунтування досліджень

Використання найбільш поширених АД у складі більшості електричних приводів потребує різнобічного вивчення їх властивостей. Особливо це стосується динамічних режимів, які є визначальними для розрахунку міцності механічної частини, визначення термічної та динамічної стійкості електричної частини і розрахунку та вибору пристроїв релейного захисту.

Досягти необхідного рівня точності розрахунку динамічних характеристик АД можливо лише при використанні найбільш вдосконалених ММ. Останнім часом більш затребуваними і адекватними ММ АД є такі, які враховують магнітні втрати у АД [1, 2, 9]. Але слід розрізняти магнітні втрати у статорі та роторі. Зазвичай при розрахунку характеристик у межах робочого діапазону АД магнітними втратами у роторі знехтують, тому що вони незначні за величиною. Якщо розглядати пускові процеси, тоді величина магнітних втрат у роторі може значно впливати на вигляд динамічних характеристик [5].

В роботі [5] наведено результати розрахунку, котрий показує доцільність врахування магнітних втрат потужності у роторі АД при дослідженні динамічних властивостей, але не визначено, як ефект врахування вказаних втрат залежить від потужності АД. Як показує досвід дослідження та використання АД, їх деякі властивості значно залежать від потужності, що дозволяє в окремих випадках йти на спрощення розрахунків без виникнення значних похибок. Тому доцільно визначити залежність ефекту врахування магнітних втрат у роторі від величини потужності АД.

3.2. Алгоритм дослідження

Для дослідження питання, як змінюється ефект врахування у ММ АД втрат потужності у роторі в залежності від потужності двигуна потрібно порівнювати характеристики АД, потужності котрих відрізняються щонайменше у декілька разів, а краще на порядок. З іншого боку порівняння повинно бути у межах ідентичних

конструктивних рішень та фізичних процесів, тому доцільно виконувати дослідження для двох малих двигунів або для двох АД великої потужності.

Порівнюватися повинні перехідні процеси, які відповідають пусковому режиму АД при наявності на валу навантаження.

Візуально можна визначити лише якісну різницю динамічних характеристик. Щоб зробити більш акцентований аналіз потрібно розрахувати та побудувати відповідні залежності різниць динамічних характеристик АД, які розраховані без та з урахуванням магнітних втрат у роторі:

$$\Delta\Pi_i = \frac{|\Pi_i - \Pi'_i|}{\Pi_i} \cdot 100\%,$$

де Π_i та Π'_i – величини електромагнітного моменту, або струму статора або кутової частоти обертання ротора АД, які відповідно розраховані без та з урахуванням магнітних втрат у роторі.

Також для більш комплексної оцінки та порівняння двох випадків доцільно використати середні інтегральні оцінки:

$$\Delta\Pi_{\text{сер}} = \frac{1}{t_{\text{max}}} \cdot \sum_{i=0}^{i_{\text{max}}} \left(\Delta\Pi_i \frac{t_{\text{max}}}{i_{\text{max}}} \right),$$

де t_{max} та i_{max} – відповідно максимальні значення часу перехідного процесу та кількості кроків чисельного інтегрування ММ.

Висновки до розділу 3.

Обґрунтовано підхід до дослідження впливу потужності АД на ефект врахування магнітних втрат у роторі при розрахунку динамічних характеристик.

Запропоновані порівняльні оцінки (відносна та середньо інтегральна) дозволяють об'єктивно отримати кількісні показники вказаного ефекту.

РОЗДІЛ 4. ПРИКЛАДИ ВИЗНАЧЕННЯ РІЗНИЦІ ВІД ВРАХУВАННЯ МАГНІТНИХ ВТРАТ У РОТОРІ ПРИ РОЗРАХУНКУ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

4.1. Вихідні дані для порівняльного аналізу

В якості об'єктів дослідження обираються два трифазні АД потужністю 0,18 та 3 кВт, які відповідно розраховані у дод. А та дод. Б.

Перший АД має наступні параметри:

- номінальна корисна потужність $P_{2н} = 0,18$ кВт;
- напруга $U_1 = 220$ В;
- кількість пар полюсів $p = 1$;
- момент інерції $j = 0,00029$ кг·м²;
- індуктивний опір $X_1 = 19,1$ Ом;
- індуктивний опір $X'_2 = 16,9$ Ом;
- головний індуктивний опір $X_\mu = 736$ Ом;
- активний опір $R_1 = 78,2$ Ом;
- активний опір $R'_2 = 33,5$ Ом;
- номінальне ковзання $s_n = 0,072$.

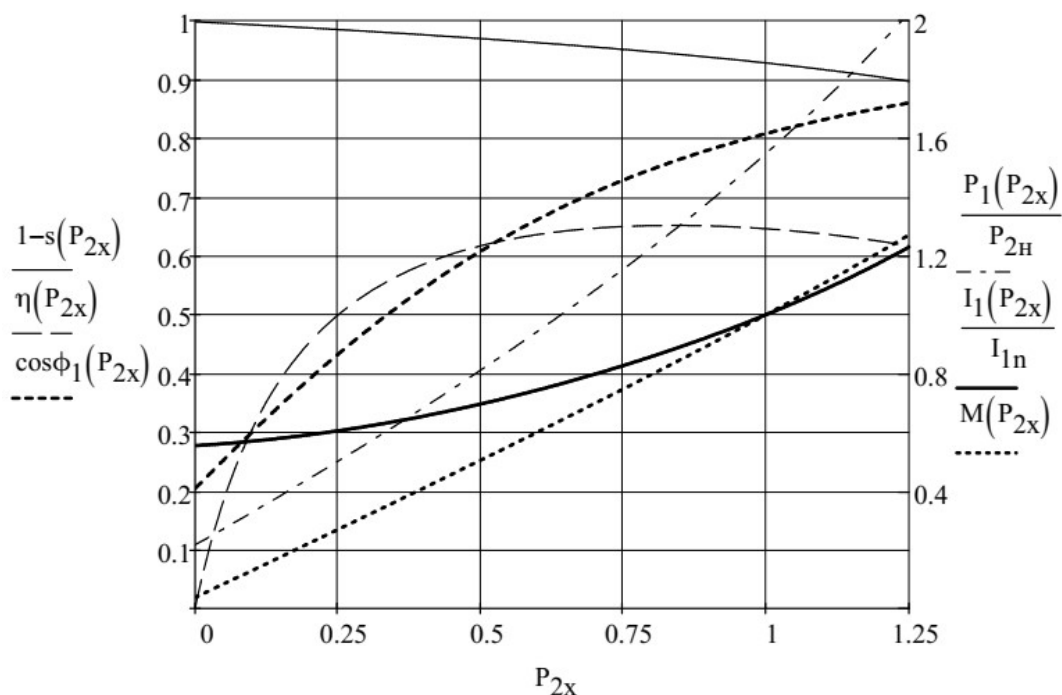


Рис. 4.1. Робочі характеристики АД 0,18 кВт у в.о.

Робочі та електромеханічні характеристики АД потужністю 0,18 кВт наведено на рис. 4.1 та рис. 4.2 відповідно.

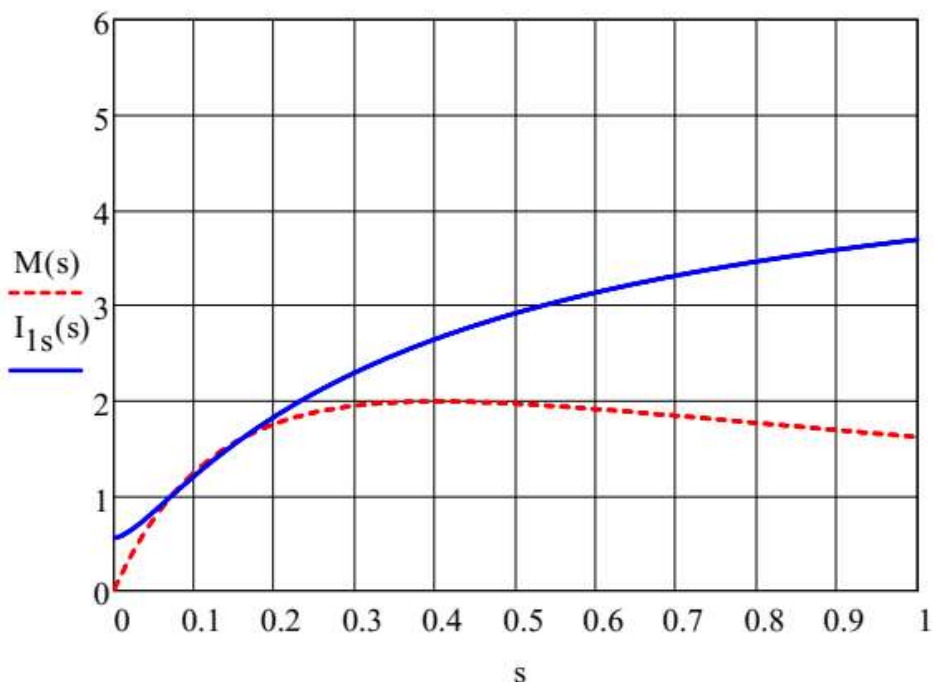


Рис. 4.2. Електромеханічні характеристики АД 0,18 кВт у в.о.

Другий АД має наступні параметри:

- номінальна корисна потужність $P_{2н} = 3$ кВт;
- напруга $U_1 = 220$ В;
- кількість пар полюсів $p = 1$;
- момент інерції $j = 0,0075$ кг·м²;
- індуктивний опір $X_1 = 1,29$ Ом;
- індуктивний опір $X'_2 = 0,706$ Ом;
- головний індуктивний опір $X_\mu = 76,5$ Ом;
- активний опір $R_1 = 2,06$ Ом;
- активний опір $R'_2 = 1,28$ Ом;
- номінальне ковзання $s_n = 0,033$.

Робочі та електромеханічні характеристики АД потужністю 0,18 кВт наведено на рис. 4.3 та рис. 4.4 відповідно.

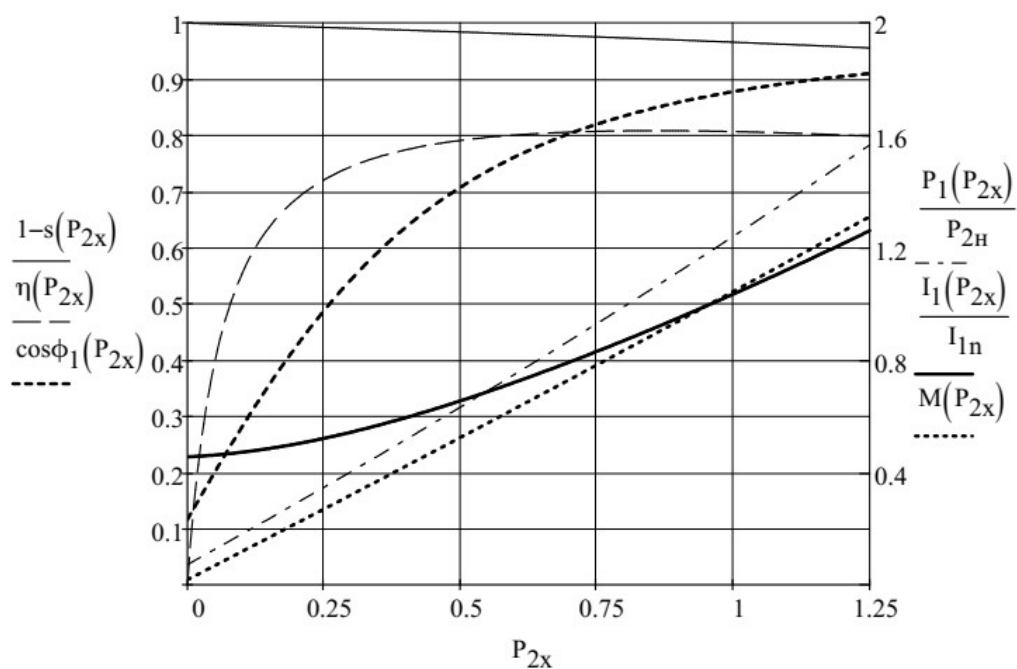


Рис. 4.3. Робочі характеристики АД 3 кВт у в.о.

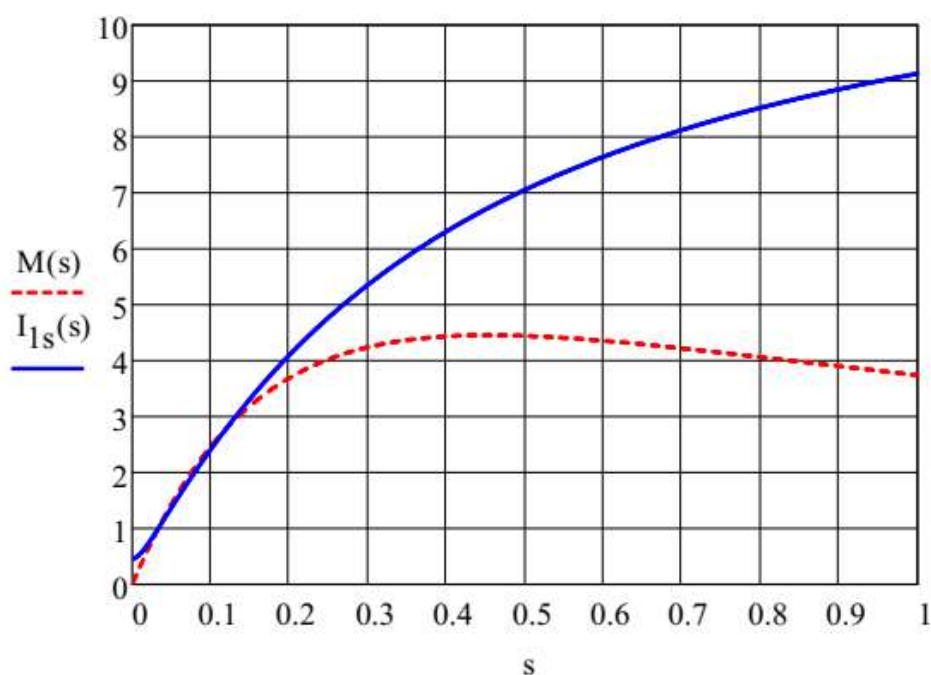


Рис. 4.4. Електромеханічні характеристики АД 3 кВт у в.о.

4.2. Результати розрахунку та аналіз динамічних характеристик

Для побудови графіків перехідних процесів використовуються ММ АД, які враховують магнітні втрати у статорі і магнітні втрати у статорі та роторі одночасно. Розрахунок динамічних характеристик наведено у дод. В та дод. Д.

Динамічні пускові характеристики для АД номінальною потужністю 0,18 кВт наведено на рис. 4.5 та рис. 4.6. Вони розраховані за різних умов, тобто без та з урахуванням магнітних втрат у роторі.

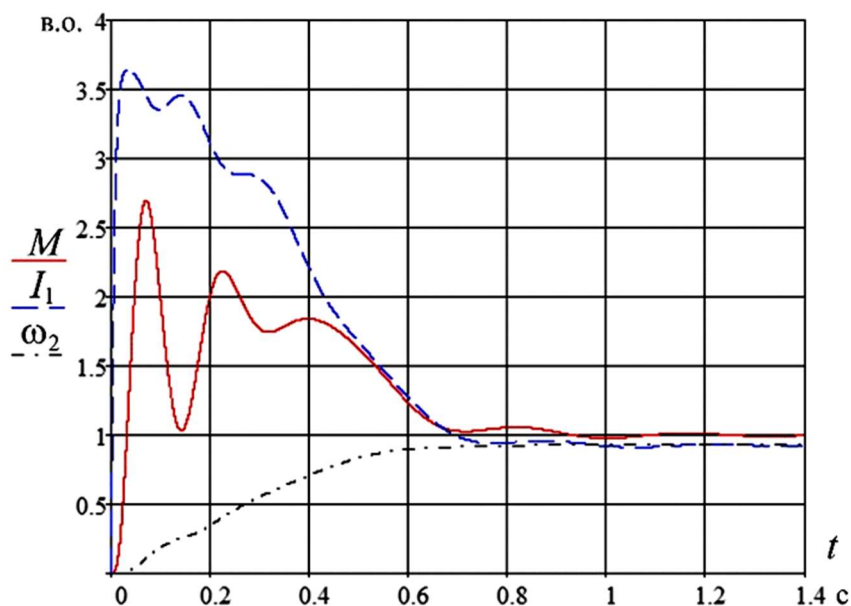


Рис. 4.5. Перехідні пускові процеси АД потужністю 0,18 кВт при врахуванні тільки магнітних втрат у статорі

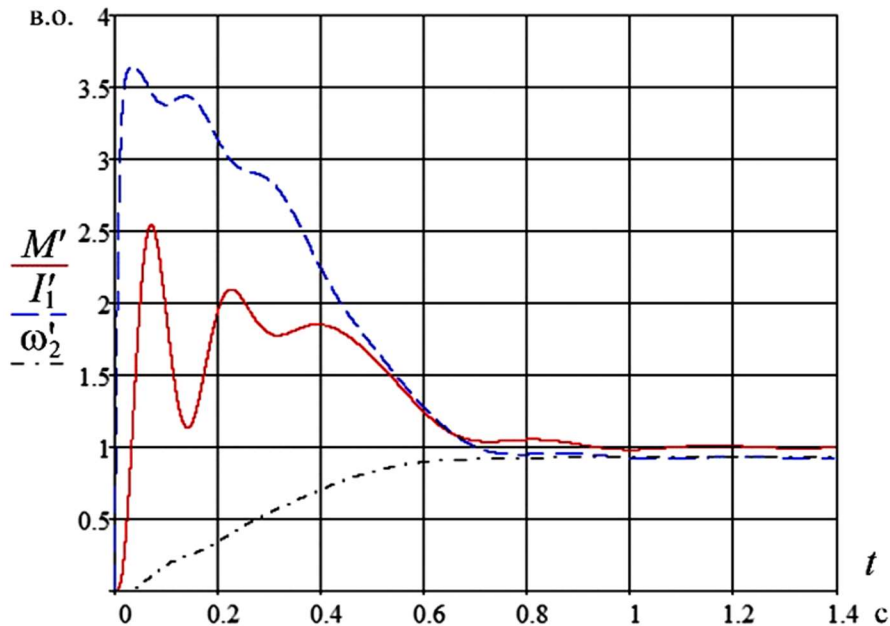


Рис. 4.6. Перехідні пускові процеси АД потужністю 0,18 кВт при врахуванні магнітних втрат у статорі та роторі

Відповідно графікам (рис. 4.5 та рис. 4.6) найбільший вплив врахування магнітних втрат у роторі має на величину моменту лише на початку перехідного про-

цесу, але цей момент часу характеризується найбільшою варіацією фазових величин та найбільшими їх значеннями, які викликають значні механічні впливи на конструктивні елементи АД. Тому навіть обмежене врахування факторів, які впливають на результат моделювання, може бути дуже важливим [7].

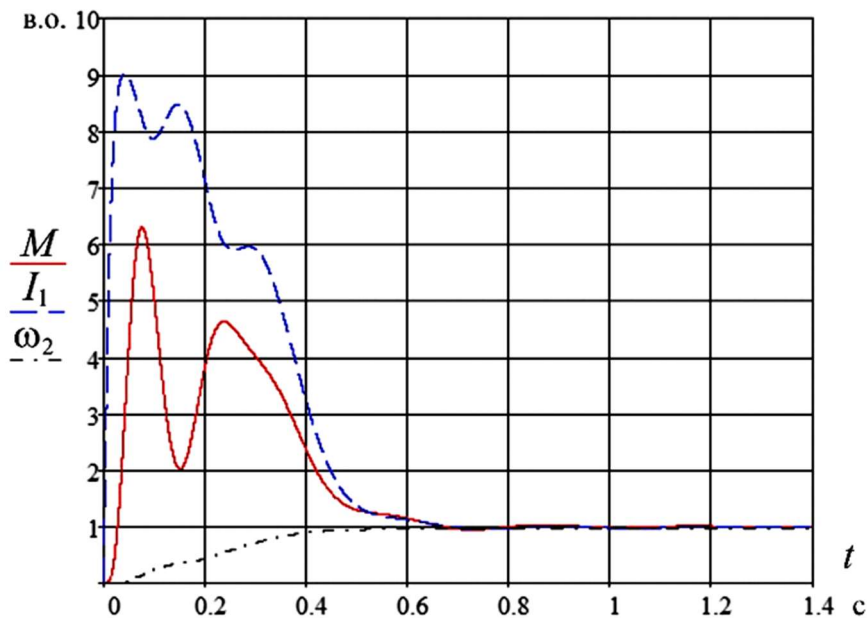


Рис. 4.7. Перехідні пускові процеси АД потужністю 3 кВт при врахуванні тільки магнітних втрат у статорі

Аналогічні динамічні пускові характеристики для АД номінальною потужністю 3 кВт наведено на рис. 4.7 та рис. 4.8.

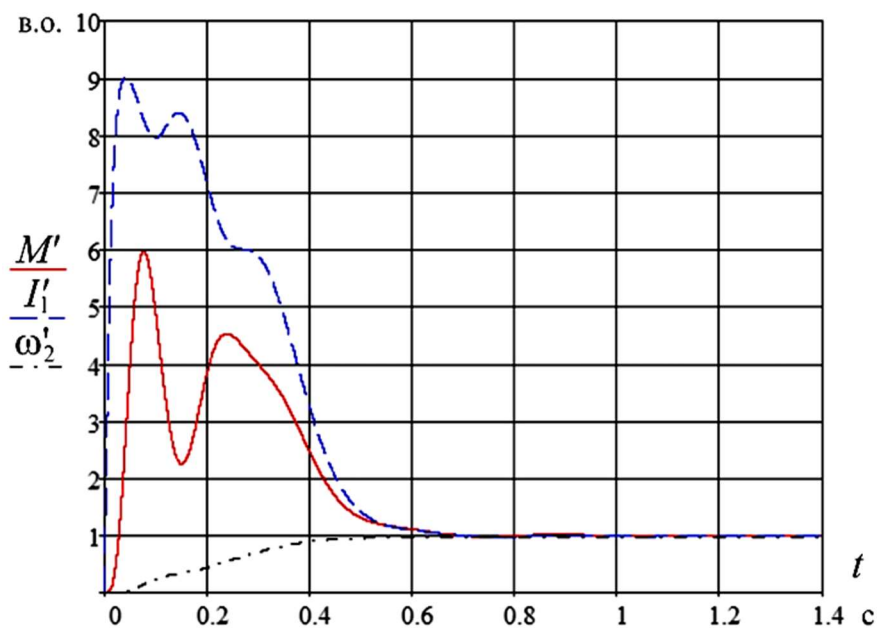


Рис. 4.8. Перехідні пускові процеси АД потужністю 3 кВт при врахуванні магнітних втрат у статорі та роторі

Для них спостерігається аналогічна картина перехідних процесів.

Графіки різниць пускових динамічних характеристик для АД 0,18 кВт наведено на рис. 4.9, а для АД 3 кВт – на рис. 4.10.

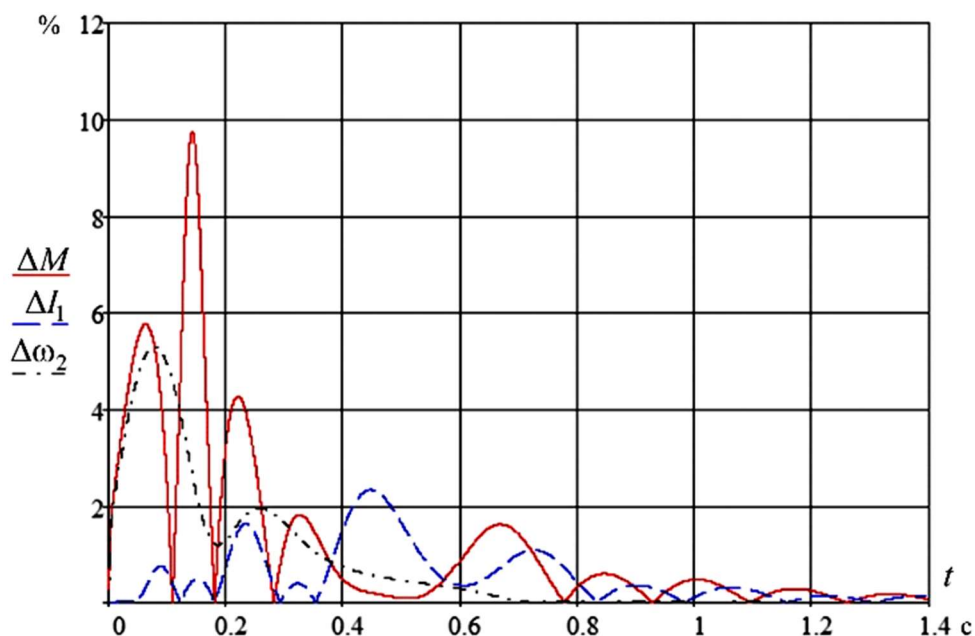


Рис. 4.9. Різниці динамічних характеристик, які виникають внаслідок врахування магнітних втрат у роторі, для АД номінальною потужністю 0,18 кВт

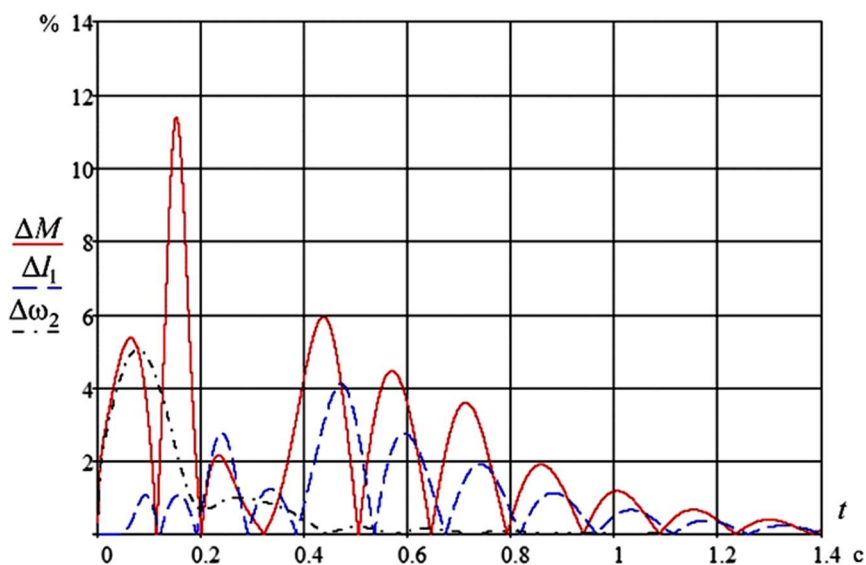


Рис. 4.10. Різниці динамічних характеристик, які виникають внаслідок врахування магнітних втрат у роторі, для АД номінальною потужністю 3 кВт

Вони показують, що для обох АД момент має найбільшу різницю наприкінці першої половини перехідного процесу, швидкість обертання ротора має найбільшу

різницю на початку перехідного процесу, а струм статора – у другій половині перехідного процесу. Такий закономірний розкид для максимальних різниць за часом перехідного процесу пояснюється особливостями фізичних процесів у АД, а також співвідношенням сталих часу електромагнітної та електро механічної частини двигуна [7].

Слід відзначити, що при збільшенні потужності АД різниці збільшуються (таб. 4.1): для електромагнітного моменту майже на 2 %, для струму статора на 0,3 %. А для швидкості обертання навпаки відбувається зменшення на 0,27 %, що пояснюється більшим моментом інерції, котрий має максимальний вплив на характер електро механічного перехідного процесу.

Таблиця 4.1. Різниці динамічних характеристик

Потужність АД, кВт	Різниці					
	Моменту		Струму		Швидкості	
	$\Delta M_{\max}$	$\Delta M_{\text{сер}}$	$\Delta I_{\max}$	$\Delta I_{\text{сер}}$	$\Delta \omega_{\max}$	$\Delta \omega_{\text{сер}}$
0,18	9,75	1,19	0,76	0,535	5,3	0,77
3	11,4	2,01	1,06	0,954	5,03	0,62

Згідно середнім інтегральним оцінкам різниці за електромагнітним моментом та струмом статора відрізняються приблизно у двічі на користь більш потужного АД, а за швидкістю обертання приблизно на чверть – на користь менш потужного АД.

Висновки до розділу 4.

Визначено, що врахування магнітних втрат потужності у роторі в ММ АД призводить до виникнення різниць у динамічних характеристиках, які суттєво залежать від потужності двигуна, тому при моделюванні більш потужних АД доцільно враховувати магнітні втрати потужності у роторі.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі виконано дослідження удосконаленої математичної моделі та перехідних процесів в асинхронних двигунах різної потужності, що надало можливість отримати наступні висновки:

1. На підставі проведеного аналізу визначено, що математична модель узагальненої електричної машини є найбільш універсальним та добре апробованим інструментом для моделювання електричних машин.

2. Виконано огляд та аналіз математичних моделей асинхронних двигунів, серед котрих визначено таку, яка враховує змінні магнітні втрати потужності у роторі, котра визначена як найбільш вдосконаленою.

3. Обґрунтовано підхід до дослідження впливу потужності АД на ефект врахування магнітних втрат у роторі при розрахунку динамічних характеристик на основі застосування порівняльних оцінок у відносному та середньо інтегральному вигляді.

4. Визначено, що врахування магнітних втрат потужності у роторі в ММ АД призводить до виникнення різниць у динамічних характеристиках, які суттєво залежать від потужності двигуна, тому при моделюванні АД середньої та великої потужності доцільно враховувати зазначені втрати.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Khoury G., Ghosn R., Khatounian F., Fadel M., Tientcheu M. Including core losses in induction motors dynamic model // 3rd International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), Zouk Mosbeh, Lebanon, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/REDEC.2016.7577556.
2. Kimstach O. Optimal starting of the induction motor // ELEKTROTEHNIŠKI VESTNIK. 2022. 89(5), pp. 263-268.
3. Kimstach O., Zhezhelo A., Klymenko Yu. Differences of 2-axes and 3-axes model of induction motor // Applied Scientific and Technical Research: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, April 1–3, 2020, Ivano-Frankivsk / Academy of Technical Sciences of Ukraine. Ivano-Frankivsk: Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 2021, pp. 167-169.
4. Аввакумов В.Г., Терешкевич Л.Б. Перехідні процеси в системах електропостачання: елементи теорії, програми, ілюстрації. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 241 с.
5. Кимстач О.Ю. Идентификация параметров уточненной математической модели асинхронного двигателя // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – Том 30 (69) Ч. 1 № 3 2019. – С. 34-39.
6. Кімстач О. Аналітичне моделювання динамічного режиму трансформаторно-асинхронної системи герметичного електропривода // Матеріали конф. “4th INTERNATIONAL MODELLING SCHOOL of AMSE-UAPL” Crimea, Alushta, September 12-17, – 2000. – С. 119 – 122.
7. Кімстач О.Ю., Безсмертний К.А. Ефект врахування магнітних втрат у роторі асинхронного двигуна // Actual scientific research in the modern world // Journal. – Pereiaslav, 2024. – Issue 10(114), pp. 129-134.
8. Кімстач О.Ю., Загурський В.О. Урахування магнітних втрат потужності при моделюванні перехідних процесів у трансформаторах // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон: ХНТУ, 2018. – Вип. 2 (65) – С. 182–189.

9. Кімстач О.Ю., Талпа О.С. Динамічні характеристики асинхронного двигуна з урахуванням властивостей джерела живлення // Актуальные научные исследования в современном мире // Журнал – Переяслав-Хмельницький, 2019. – Вып. 5(49), ч. 1 – С. 6-13.

10. Перехідні процеси в системах електропостачання: Підручник для вузів. Вид. 2-е, доправ. та доп. / Г.Г. Півняк, В.М. Винославський, А.Я. Рибалко, Л.І. Нессен / За ред. академіка НАН України Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000. – 597 с.

11. Шестеренко В.Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Підручник / В.Є. Шестеренко. – Вінниця: Нова Книга, 2004. – 656 с.

ДОДАТОК А. Розрахунок АД з короткозамкненим ротором потужністю 0,18 кВт

Вихідні дані:

Номинальна потужність $P_{2H} = 0.18 \text{ кВт} .$

Частота мережі $f_1 = 50 \text{ Гц} .$

Фазна напруга мережі $U_1 = 220 \text{ В} .$

Ступень захисту IP44.

Число пар полюсів $p = 1 .$

Кількість фаз $m_1 = 3 .$

Вибір головних розмірів

Висота осі обертання

$$h = 56 \text{ мм} .$$

Кількість зубців статора

$$z_1 = 24 .$$

Кількість зубців ротора

$$z_2 = 19 .$$

Кількість пазів на полюс і фазу статора

$$q_1 = \frac{z_1}{2 \cdot p \cdot m_1} = \frac{24}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 4 .$$

Обирається одношарова концентрична обмотка у розвалу з кількістю паралельних гілок

$$a_1 = 1 .$$

та середнім кроком обмотки

$$y_1 = 10 .$$

Попереднє значення обмотувального коефіцієнта

$$k'_{ob1} = 0.93 .$$

Індукція у зубцях статора

$$B_{z1} = 1.85 \text{ Тл} .$$

Індукція у спинці статора

$$B_{c1} = 1.5 \text{ Тл} .$$

Виходячи із значення висоти осі обертання обирається марка стали 2013, для неї

використовується ізолювання листів окисдуванням, а коефіцієнт заповнення

$$k_c = 0.97 .$$

Індукція у спілці ротора

$$B_{c2} = 1.4 \text{ Тл} .$$

Індукція у зубцях ротора

$$B_{z2} = 1.83 \text{ Тл} .$$

Синхронна частота обертання полю статора

$$n_1 = f_1 \cdot \frac{60}{p} = 50 \cdot \frac{60}{1} = 3 \times 10^3 \frac{\text{об}}{\text{хв}} .$$

Розрахунковий момент на валу

$$M' = \frac{2 \cdot 10^3 P_{2H} \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 0.18}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1.15 \text{ Нм} .$$

За розрахунковим моментом M' обираються розміри вала та шпонки:

$$d_1 = 11 \text{ мм};$$

$$d_2 = 12 \text{ мм};$$

$$d_3 = 17 \text{ мм};$$

$$l_1 = 23 \text{ мм};$$

$$b = 4 \text{ мм};$$

$$a = 4 \text{ мм};$$

$$t = 2.5 \text{ мм}.$$

Внутрішній діаметр магнітопроводу ротора

$$D_{2B} = d_3 = 17 \text{ мм}.$$

Попереднє значення ККД

$$\eta' = 0.653 .$$

Попереднє значення коефіцієнта потужності

$$\cos \varphi'_1 = 0.762 .$$

Коефіцієнт ЕРС

$$k_{e1} = 0.97 .$$

Розрахункова потужність

$$P_i = \frac{k_{e1} \cdot P_{2H}}{\eta' \cdot \cos \varphi'_1} = \frac{0.97 \cdot 0.18}{0.653 \cdot 0.762} = 0.351 \text{ кВА} .$$

Попереднє відносне значення струму намагнічування

$$I_{\mu B} = 0.523 .$$

Коефіцієнт перетворення струму

$$k_{i12} = \sqrt{1 - 2I_{\mu B} \cdot \sqrt{1 - \cos \varphi'_1}^2 + I_{\mu B}^2} = \sqrt{1 - 2 \cdot 0.523 \cdot \sqrt{1 - 0.762^2} + 0.523^2} = 0.772 \quad .$$

Максимально припустимий зовнішній діаметр магнітопроводу статора

$$D_{H1\max} = 96 \quad \text{мм.}$$

Товщина корпусу

$$\Delta_k = 4 \quad \text{мм.}$$

Попередні значення:

- лінійного навантаження

$$A'_1 = 122 \quad \frac{\text{А}}{\text{см}} \quad .$$

- індукції у повітряному зазорі

$$B'_\delta = 0.585 \quad \text{Тл} \quad .$$

Максимально припустиме значення щільності струму в стрижнях обмотки ротору

$$\Delta_{2\max} = 2.7 \quad \frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \quad .$$

Мінімальна умовна ширина нижньої частини паза ротора

$$a_{2\min} = 2 \quad \text{мм.}$$

Коефіцієнт заповнення пазового простору ротора

$$k_{z2} = 0.78 \quad .$$

Розрахункові коефіцієнти:

$$F = \frac{-1}{\left[\frac{B'_\delta}{k_c} \cdot \left(\frac{1}{p \cdot B_{c2}} - \frac{1}{B_{z2}} \right) \right]} = \frac{-1}{\frac{0.585}{0.97} \cdot \left(\frac{1}{1.4} - \frac{1}{1.83} \right)} = -9.88 \quad .$$

$$A_a = \left(\frac{1}{p^2 \cdot B_{c2}^2} + \frac{2 \cdot k_c}{B'_\delta \cdot B_{z2}} - \frac{2}{p \cdot B_{z2} \cdot B_{c2}} \right) = \frac{1}{1^2 \cdot 1.4^2} + \frac{2 \cdot 0.97}{0.585 \cdot 1.83} - \frac{2}{1.83 \cdot 1.4} = 1.54 \quad \frac{1}{\text{Тл}^2}$$

$$A = 1 - \frac{B'_\delta^2}{k_c^2} \cdot A_a = 1 - \frac{0.585^2}{0.97^2} \cdot 1.54 = 0.44 \quad .$$

$$A_{1\min 1} = \frac{5\Delta_{2\max} \cdot k_{z2}}{2 \cdot k_{i12} \cdot k'_{ob1}} = \frac{5 \cdot 2.7 \cdot 0.78}{2 \cdot 0.772 \cdot 0.93} = 7.33 \quad \frac{\text{A}}{\text{мм} \cdot \text{см}} .$$

$$A_{1\min 2} = \frac{D_{2B} \cdot a_{2\min} \cdot z_2}{F \cdot (D_{2B} \cdot \pi - a_{2\min} \cdot z_2)} = \frac{17 \cdot 2 \cdot 19}{-9.88 \cdot (17 \cdot \pi - 2 \cdot 19)} = -4.24 \quad \text{мм} .$$

$$A_{1\min 3} = A \cdot F \cdot \left(D_{2B} - a_{2\min} \cdot \frac{z_2}{\pi} \right) = 0.44 \cdot -9.88 \cdot \left(17 - 2 \cdot \frac{19}{\pi} \right) = -21.3 \quad \text{мм} .$$

$$A_{1\min 4} = \frac{D_{2B}}{F} + A_{1\min 3} - A_{1\min 2} = \frac{17}{-9.88} + -21.3 - -4.24 = -18.8 \quad \text{мм} .$$

Мінімально припустиме лінійне навантаження

$$A_{1\min} = A_{1\min 1} \cdot A_{1\min 4} = 7.33 \cdot -18.8 = -138 \quad \frac{\text{A}}{\text{см}} < A'_1 = 122 \quad \frac{\text{A}}{\text{см}} .$$

Повітряний зазор між статором і ротором

$$\delta = 0.3 \quad \text{мм} .$$

Розрахункові коефіцієнти:

$$B_b = \frac{2 \cdot D_{2B} \cdot B'_{\delta}}{k_c} \cdot \left(\frac{1}{B_{z2}} - \frac{1}{p \cdot B_{c2}} \right) = \frac{2 \cdot 17 \cdot 0.585}{0.97} \cdot \left(\frac{1}{1.83} - \frac{1}{1.4} \right) = -3.44 \quad \text{мм} .$$

$$B = B_b - \frac{A'_1}{A_{1\min 1}} = -3.44 - \frac{122}{7.33} = -20.1 \quad \text{мм} .$$

$$C = D_{2B}^2 = 17^2 = 289 \quad \text{мм}^2 .$$

Розрахунковий внутрішній діаметр магнітопроводу статора

$$D'_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4A \cdot C}}{2A} = \frac{-(-20.1) + \sqrt{(-20.1)^2 + 4 \cdot 0.44 \cdot 289}}{2 \cdot 0.44} = 57.2 \quad \text{мм} .$$

Діаметр магнітопроводу статора

$$D_1 = D'_1 + 2\delta = 57.2 + 2 \cdot 0.3 = 57.8 \quad \text{мм} .$$

Довжина активної частини

$$l'_{\delta} = \frac{6 \cdot \sqrt{2} \cdot 10^{11} \cdot P_i}{\pi^2 \cdot D_1^2 \cdot n_1 \cdot A'_1 \cdot B'_{\delta} \cdot k'_{ob1}} = \frac{6 \cdot \sqrt{2} \cdot 10^{11} \cdot 0.351}{\pi^2 \cdot 57.8^2 \cdot 3 \times 10^3 \cdot 122 \cdot 0.585 \cdot 0.93} = 45.36 \quad \text{мм} .$$

$$\text{Приймається } l_{\delta} = 0.5 \cdot \text{round} \left(\frac{l'_{\delta}}{0.5} \right) = 0.5 \cdot \text{round} \left(\frac{45.36}{0.5} \right) = 45.5 \quad \text{мм} .$$

Відношення довжини і діаметру статора

$$\lambda = \frac{l_{\delta}}{D_1} = \frac{45.5}{57.8} = 0.79 .$$

Максимальне припустиме відношення довжини і діаметру статора

$$\lambda_{\max} = 1.4 .$$

Відношення довжини і діаметру статора менше максимально припустимого

значення і достатньо близько наближено до нього

$$\lambda = 0.79 < \lambda_{\max} = 1.4 .$$

Діаметр магнітопроводу ротора

$$D_2 = D_1 - 2\delta = 57.8 - 2 \cdot 0.3 = 57.2 \text{ мм} .$$

Активна частина статора

Припуски на штампування по висоті $h_{\text{пр}}$ і ширині $b_{\text{пр}}$ паза приймаються 0,1 мм

Зубцеве ділення статора

$$t_1 = \frac{\pi D_1}{z_1} = \frac{\pi \cdot 57.8}{24} = 7.57 \text{ мм} .$$

Ширина зубця статора

$$b_{z1} = \frac{B'_\delta \cdot t_1}{B_{z1} \cdot k_c} = \frac{0.585 \cdot 7.57}{1.85 \cdot 0.97} = 2.47 \text{ мм} .$$

Полосне ділення статора

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 57.8}{2} = 90.8 \text{ мм} .$$

Розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} = \frac{2}{\pi} = 0.637 .$$

Висота спинки статора

$$h_{c1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot B'_\delta}{B_{c1} \cdot k_c} = \frac{0.5 \cdot 0.637 \cdot 90.8 \cdot 0.585}{1.5 \cdot 0.97} = 11.6 \text{ мм} .$$

Струм статора

$$I_1 = \frac{P_{2H} \cdot 1000}{\eta' \cdot \cos \varphi'_1 \cdot U_1 \cdot m_1} = \frac{0.18 \cdot 1 \times 10^3}{0.653 \cdot 0.762 \cdot 220 \cdot 3} = 0.548 \text{ А} .$$

Кількість ефективних провідників обмотки статора в пазу

$$u_1 = \text{round} \left(\frac{A'_1 \cdot a_1 \cdot t_1}{10 I_1} \right) = \text{round} \left(\frac{122 \cdot 7.57}{10 \cdot 0.548} \right) = 169 .$$

Кількість витків обмотки статора

$$w_1 = u_1 \cdot p \cdot \frac{q_1}{a_1} = 169 \cdot \frac{4}{1} = 676 .$$

Клас нагрівостійкості ізоляції обмотки статора F.

Щільність струму у обмотці статора

$$\Delta'_1 = 8.28 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}.$$

Площина поперечного перерізу ефективного дроту обмотки статора

$$q'_{\text{ef}1} = \frac{I_1}{a_1 \cdot \Delta'_1} = \frac{0.548}{8.28} = 0.066 \text{ мм}^2.$$

Кількість елементарних провідників

$$N_{e1} = 1.$$

Для обмоток статора обирається дріт марки ПЭТ - 155. Перетин дроту обмотки статора

$$q'_{e1} = \frac{q'_{\text{ef}1}}{N_{e1}} = \frac{0.066}{1} = 0.066 \text{ мм}^2.$$

Приймається

$$q_{e1} = 0.0707 \text{ мм}^2;$$

$$d_{iz} = 0.335 \text{ мм};$$

$$d = 0.3 \text{ мм}.$$

Загальна площа дротів обмотки статора у пазу

$$S_{o1} = q_{e1} \cdot u_1 \cdot N_{e1} = 0.071 \cdot 169 = 11.9 \text{ мм}^2.$$

Висота шліца паза статора

$$h_{h1} = 0.8 \text{ мм}.$$

Менша ширина паза статора

$$b_2 = \frac{t_1 + \frac{2\pi \cdot h_{h1}}{z_1} - b_{z1}}{1 - \frac{\pi}{z_1}} = \frac{7.57 + \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 0.8}{24} - 2.47 \right)}{1 - \frac{\pi}{24}} = 6.11 \text{ мм}.$$

Перший розрахунковий коефіцієнт висоти паза статора

$$A_z = \frac{2\pi}{z_1} = \frac{2 \cdot \pi}{24} = 0.262.$$

Складова другого розрахункового коефіцієнта висоти паза статора

$$B_{zc} = \frac{2\pi}{z_1} \cdot \left(h_{h1} + \frac{b_2}{2} \right) = \frac{2 \cdot \pi}{24} \cdot \left(0.8 + \frac{6.11}{2} \right) = 1.01 \text{ мм}.$$

Другий розрахунковий коефіцієнт висоти паза статора

$$B_z = t_1 - b_{z1} + b_2 - B_{zc} = 7.57 - 2.47 + 6.11 - 1.01 = 10.2 \text{ мм}.$$

Попереднє значення коефіцієнту заповнення пазового вікна статора

$$k'_{zo1} = 0.5.$$

Складова третього розрахункового коефіцієнту висоти паза статора

$$C_{zc} = \left(h_{h1} + \frac{b_2}{2} \right) \cdot (t_1 - b_{z1} + b_2) = \left(0.8 + \frac{6.11}{2} \right) \cdot (7.57 - 2.47 + 6.11) = 43.2 \text{ мм}^2.$$

Третій розрахунковий коефіцієнт висоти паза статора

$$C_z = C_{zc} + \frac{2S_{o1}}{k'_{zo1}} - \frac{\pi \cdot b_2^2}{4} = 43.2 + \frac{2 \cdot 11.9}{0.5} - \frac{\pi \cdot 6.11^2}{4} = 61.5 \text{ мм}^2.$$

Висота зубця статора

$$h_{z1} = \frac{-B_z + \sqrt{B_z^2 + 4A_z \cdot C_z}}{2A_z} = \frac{-10.2 + \sqrt{10.2^2 + 4 \cdot 0.262 \cdot 61.5}}{2 \cdot 0.262} = 5.31 \text{ мм}.$$

Зовнішній діаметр статора

$$D_{H1} = D_1 + 2(h_{c1} + h_{z1}) = 57.8 + 2 \cdot (11.6 + 5.31) = 91.6 \text{ мм}.$$

Більша ширина паза статора

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2h_{z1})}{z_1} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot (57.8 + 2 \cdot 5.31)}{24} - 2.47 = 6.49 \text{ мм}.$$

Пазові сторони однієї котушкової групи, розташовані в сусідніх пазах, займають q_1 пазів і утворюють фазну зону, обумовлену кутом

$$\alpha = \frac{2p \cdot \pi \cdot q_1}{z_1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 4}{24} = 1.05.$$

Відносний крок обмотки

$$\beta = \frac{2p \cdot y_1}{z_1} = \frac{2 \cdot 10}{24} = 0.833.$$

Коефіцієнт укорочення

$$k_{y1} = \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(0.833 \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0.97.$$

Коефіцієнт розподілу обмотки статора

$$k_{p1} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2q_1}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{1.05}{2}\right)}{4 \cdot \sin\left(\frac{1.05}{2 \cdot 4}\right)} = 0.96.$$

Обмотковий коефіцієнт обмотки статора

$$k_{ob1} = k_{p1} \cdot k_{y1} = 0.96 \cdot 0.97 = 0.931 \quad .$$

Висота

$$h_{1tr} = h_{z1} - h_{h1} - \frac{b_2}{2} = 5.31 - 0.8 - \frac{6.11}{2} = 1.46 \quad \text{мм} .$$

Площина поперечного перетину трапецеїдального напівзакритого паза, яка зайнята обмоткою і пазовою ізоляцією

$$S_{po} = h_{1tr} \cdot \frac{b_1 + b_2}{2} + \frac{\pi \cdot b_2^2}{8} = 1.46 \cdot \frac{6.49 + 6.11}{2} + \frac{\pi \cdot 6.11^2}{8} = 23.9 \quad \text{мм}^2 .$$

Довжина стінки паза статора

$$h_p = \sqrt{\frac{(b_1 - b_2)^2}{4} + h_{1tr}^2} = \sqrt{\frac{(6.49 - 6.11)^2}{4} + 1.46^2} = 1.47 \quad \text{мм} .$$

Товщини пазової ізоляції

$$\Delta_{i1} = 0.2 \quad \text{мм} .$$

Товщини клинової ізоляції

$$\Delta_{i2} = 0.3 \quad \text{мм} .$$

Площина пазової ізоляції

$$S_{pik} = \Delta_{i1} \cdot \left(2h_p + b_1 + b_2 \cdot \frac{\pi}{2} \right) = 0.2 \cdot \left(2 \cdot 1.47 + 6.49 + 6.11 \cdot \frac{\pi}{2} \right) = 3.81 \quad \text{мм}^2 .$$

Площина клину

$$S_{pikc} = \Delta_{i2} \cdot \frac{b_2 \cdot \pi}{2} = 0.3 \cdot \frac{6.11 \cdot \pi}{2} = 2.88 \quad \text{мм}^2 .$$

Площина поперечного перетину трапецеїдального напівзакритого паза, яка зайнята обмоткою

$$S'_{po} = S_{po} - S_{pik} - S_{pikc} = 23.9 - 3.81 - 2.88 = 17.2 \quad \text{мм}^2 .$$

Ширина шліцу паза статора

$$b_{h1} = 2\Delta_{i1} + d_{iz} + 2 = 2 \cdot 0.2 + 0.335 + 2 = 2.73 \quad \text{мм} .$$

Коефіцієнт заповнення паза

$$k_z = \frac{S_{o1}}{S'_{po}} = \frac{11.9}{17.2} = 0.69 \quad .$$

Коефіцієнт заповнення пазового вікна пазовою та клиновою ізоляцією

$$k_{i1} = \frac{S_{o1}}{S_{pik} + S_{pikc}} = \frac{11.9}{3.81 + 2.88} = 1.78 \quad .$$

Уточнене значення коефіцієнту заповнення пазового вікна

$$k_{zo1} = \frac{k_z \cdot k_{i1}}{k_z + k_{i1}} = \frac{0.69 \cdot 1.78}{0.69 + 1.78} = 0.497 \quad .$$

Щільність струму в обмотці статора

$$\Delta_1 = \frac{I_1}{a_1 \cdot N_{e1} \cdot q_{e1}} = \frac{0.548}{1 \cdot 0.071} = 7.75 \quad \frac{A}{\text{мм}^2} \quad .$$

Уточнене лінійне навантаження статора

$$A_1 = \frac{10 u_1 \cdot z_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1} = \frac{10 \cdot 169 \cdot 24 \cdot 0.548}{\pi \cdot 57.8} = 122 \quad \frac{A}{\text{см}} \quad .$$

Магнітний потік

$$\Phi = B'_\delta \cdot D_1 \cdot l_\delta \cdot \frac{10^{-6}}{p} = 0.585 \cdot 57.8 \cdot 45.5 \cdot \frac{10^{-6}}{1} = 1.54 \times 10^{-3} \quad \text{Вб} \quad .$$

Уточнені значення індукції у повітряному зазорі

$$B_\delta = \frac{\Phi \cdot 10^6}{\alpha_i \cdot \tau \cdot l_\delta} = \frac{1.54 \times 10^{-3} \cdot 10^6}{0.637 \cdot 90.8 \cdot 45.5} = 0.585 \quad \text{Вб} \quad .$$

Коефіцієнт теплового навантаження

$$k_t = 1700 \cdot k_{pt} = 1.7 \times 10^3 \cdot 1 = 1.7 \times 10^3 \quad A^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2) \quad .$$

Коефіцієнт

$$a_t = 4.4 \cdot 10^{-4} \quad \text{мм}^{-1} \quad .$$

Максимальне припустиме теплове навантаження

$$\Delta A_{\max} = k_t \cdot (1 + a_t \cdot D_{H1 \max}) = 1.7 \times 10^3 \cdot (1 + 4.4 \cdot 10^{-4} \cdot 96) = 1.771 \times 10^3 \quad A^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2) \quad .$$

Нормальний тепловий режим роботи АД забезпечується:

$$\Delta_1 \cdot A_1 = 7.75 \cdot 122 = 945.5 \quad A^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2) < \Delta A_{\max} = 1.771 \times 10^3 \quad A^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2) \quad .$$

Середній зубцевий розподіл статора

$$t_{1cp} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{z1})}{z_1} = \frac{\pi \cdot (57.8 + 5.31)}{24} = 8.26 \quad \text{мм} \quad .$$

Ширина секції обмотки статора

$$b_{c1} = y_1 \cdot t_{1cp} = 10 \cdot 8.26 = 82.6 \quad \text{мм} \quad .$$

Довжина лобової частини обмотки статора

$$l_{л1} = (1.16 + 0.14 \cdot p) \cdot b_{c1} + 15 = (1.16 + 0.14) \cdot 82.6 + 15 = 122 \quad \text{мм} \quad .$$

Середня довжина витка обмотки статора

$$l_{cp1} = 2 \cdot (l_\delta + l_{л1}) = 2 \cdot (45.5 + 122) = 335 \quad \text{мм} \quad .$$

Довжина вилета лобової частини обмотки статора

$$l_{B1} = \frac{l_{л1} - b_{с1}}{2} + \frac{b_1 + b_2}{2} = \frac{122 - 82.6}{2} + \frac{6.49 + 6.11}{2} = 26 \text{ мм} .$$

Площина паза статора

$$S_{p1} = S_{po} + b_{h1} \cdot h_{h1} = 23.9 + 2.73 \cdot 0.8 = 26.1 \text{ мм}^2 .$$

Зовнішній діаметр корпусу АД

$$D_K = D_{H1} + 2\Delta_K = 91.6 + 2 \cdot 4 = 99.6 \text{ мм} .$$

Активна частина ротора

Обираються овальні напівзакриті пази.

Зубцеве ділення ротора

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{z_2} = \frac{\pi \cdot 57.2}{19} = 9.46 \text{ мм} .$$

Ширина зубця ротора

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{B_{z2} \cdot k_c} = \frac{0.585 \cdot 9.46}{1.83 \cdot 0.97} = 3.12 \text{ мм} .$$

Висота спинки ротора

$$h_{c2} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot B_\delta}{B_{c2} \cdot k_c} = \frac{0.5 \cdot 0.637 \cdot 90.8 \cdot 0.585}{1.4 \cdot 0.97} = 12.5 \text{ мм} .$$

Висота паза ротора

$$h_{z2} = \frac{D_2 - D_{2B}}{2} - h_{c2} = \frac{57.2 - 17}{2} - 12.5 = 7.6 \text{ мм} .$$

Висота шліцу паза ротора

$$h_{h2} = 0.5 \text{ мм} .$$

Ширина шліцу паза ротора

$$b_{h2} = 1.1 \text{ мм} .$$

Діаметр паза у верхній частині

$$d'_{p2} = \frac{\pi(D_2 - 2 \cdot h_{h2}) - z_2 \cdot b_{z2}}{z_2 + \pi} = \frac{\pi \cdot (57.2 - 2 \cdot 0.5) - 19 \cdot 3.12}{19 + \pi} = 5.3 \text{ мм} .$$

Діаметр паза у нижній частині

$$d_{p2} = \frac{\pi(D_2 - 2 \cdot h_{z2}) - z_2 \cdot b_{z2}}{z_2 - \pi} = \frac{\pi \cdot (57.2 - 2 \cdot 7.6) - 19 \cdot 3.12}{19 - \pi} = 4.58 \text{ мм} .$$

Відстань між центрами окружностей овального паза

$$h_2 = h_{z2} - h_{h2} - \frac{(d_{p2} + d'_{p2})}{2} = 7.6 - 0.5 - \frac{4.58 + 5.3}{2} = 2.16 \text{ мм} .$$

Висота стрижня

$$h_{ст} = h_{z2} - h_{h2} = 7.6 - 0.5 = 7.1 \text{ мм} .$$

Складові площини паза ротора:

- центральної частини

$$S_{p2t} = h_2 \cdot \frac{d_{p2} + d'_{p2}}{2} = 2.16 \cdot \frac{4.58 + 5.3}{2} = 10.7 \text{ мм}^2 .$$

- напівкругових частин

$$S_{p2r} = \frac{\pi \cdot (d_{p2}^2 + d'_{p2}^2)}{8} = \frac{\pi \cdot (4.58^2 + 5.3^2)}{8} = 19.3 \text{ мм}^2 .$$

- шліцу

$$S_{p2h} = h_{h2} \cdot b_{h2} = 0.5 \cdot 1.1 = 0.55 \text{ мм}^2 .$$

Площина паза ротора

$$S_{p2} = S_{p2t} + S_{p2r} + S_{p2h} = 10.7 + 19.3 + 0.55 = 30.5 \text{ мм}^2 .$$

Уточнене значення коефіцієнту заповнення пазового простору ротору

$$k_{22} = \frac{S_{p2}}{h_{z2} \cdot \left(t_2 - b_{z2} - \frac{\pi \cdot h_{z2}}{z_2} \right)} = \frac{30.5}{7.6 \cdot \left(9.46 - 3.12 - \frac{\pi \cdot 7.6}{19} \right)} = 0.789 .$$

Перетин короткозамкнутого кільця обмотки ротора

$$q_{кл} = 0.2 \cdot z_2 \cdot \frac{S_{p2}}{p} = 0.2 \cdot 19 \cdot \frac{30.5}{1} = 116 \text{ мм}^2 .$$

Висота короткозамкнутого кільця обмотки ротора

$$h_k = 1.2 \cdot h_{z2} = 1.2 \cdot 7.6 = 9.12 \text{ мм} .$$

Довжина короткозамкнутого кільця обмотки ротора

$$l_k = \frac{q_{кл}}{h_k} = \frac{116}{9.12} = 12.7 \text{ мм} .$$

Середній діаметр кільця обмотки ротора

$$D_{2c} = D_2 - h_k = 57.2 - 9.12 = 48.1 \text{ мм} .$$

Кількість вентиляційних лопаток

$$N_l = 8 .$$

Опори обмотки статора

Питомий опір міді

$$\rho_M = 24.4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{мм}.$$

Активний опір обмотки статора

$$R_1 = \rho_M \cdot \frac{w_1 \cdot l_{cp1}}{N_{e1} \cdot q_{e1} \cdot a_1} = 24.4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{676 \cdot 335}{0.071} = 78.2 \text{ Ом}.$$

Активний опір фази у відносних одиницях

$$R_{1x} = \frac{R_1 \cdot I_1}{U_1} = \frac{78.2 \cdot 0.548}{220} = 0.195.$$

Коефіцієнти, що враховують укорочення кроку обмотки

$$k_\beta = 0.91;$$

$$k'_\beta = 0.88.$$

Висота

$$h_1 = h_{z1} - h_{h1} - 0.5 \cdot b_2 = 5.31 - 0.8 - 0.5 \cdot 6.11 = 1.46 \text{ мм}.$$

Складова коефіцієнта магнітної провідності пазового розсіювання

$$\lambda_{п1ск} = k'_\beta \left(\frac{h_{h1}}{b_{h1}} + 1.5 \cdot \frac{b_2}{b_2 + 2 \cdot b_{h1}} \right) = 0.88 \cdot \left(\frac{0.8}{2.73} + 1.5 \cdot \frac{6.11}{6.11 + 2 \cdot 2.73} \right) = 0.955.$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1}{3b_2} \cdot k_\beta + \lambda_{п1ск} = \frac{1.46}{3 \cdot 6.11} \cdot 0.91 + 0.955 = 1.03.$$

Коефіцієнт зубчасті статора

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{h1}}{t_1 - b_{h1} + 5 \cdot \frac{t_1}{b_{h1}} \cdot \delta} = 1 + \frac{2.73}{7.57 - 2.73 + 5 \cdot \frac{7.57}{2.73} \cdot 0.3} = 1.3.$$

Коефіцієнт зубчасті ротора

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{h2}}{t_2 - b_{h2} + 5 \cdot \frac{t_2}{b_{h2}} \cdot \delta} = 1 + \frac{1.1}{9.46 - 1.1 + 5 \cdot \frac{9.46}{1.1} \cdot 0.3} = 1.05.$$

Загальний коефіцієнт зубчасті

$$K_\delta = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} = 1.3 \cdot 1.05 = 1.36.$$

Коефіцієнт, що враховує реакцію демпфірування струмів, наведених в обмотці ротора вищими гармоніками поля статора

$$k_{pt1} = 0.769 \text{ .}$$

Коефіцієнт, що враховує вплив відкритих пазів статора на провідність диференціального розсіювання

$$k_{h1} = 1 - \frac{0.033 \cdot b_{h1}^2}{t_1 \cdot \delta} = 1 - \frac{0.033 \cdot 2.73^2}{7.57 \cdot 0.3} = 0.892 \text{ .}$$

Коефіцієнт диференціального розсіювання

$$k_{d1} = 8.9 \times 10^{-3} \text{ .}$$

Складово коефіцієнту магнітної провідності диференціального розсіювання

$$\Lambda_{d1} = \frac{0.9 k_{pt1} \cdot k_{h1} \cdot k_{d1}}{K_{\delta}} = \frac{0.9 \cdot 0.769 \cdot 0.892 \cdot 8.9 \times 10^{-3}}{1.36} = 4.04 \times 10^{-3} \text{ .}$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання

$$\lambda_{d1} = \frac{t_1 \cdot \Lambda_{d1} \cdot (q_1 \cdot k_{ob1})^2}{\delta} = \frac{7.57 \cdot 4.04 \times 10^{-3} \cdot (4 \cdot 0.931)^2}{0.3} = 1.41 \text{ .}$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання лобових частин обмотки статора

$$\lambda_{л1} = 0.34 \cdot \frac{q_1}{l_{\delta}} \cdot (l_{л1} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0.34 \cdot \frac{4}{45.5} \cdot (122 - 0.64 \cdot 0.833 \cdot 90.8) = 2.2 \text{ .}$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання обмотки статора

$$\lambda_1 = \lambda_{л1} + \lambda_{л1} + \lambda_{d1} = 1.03 + 2.2 + 1.41 = 4.64 \text{ .}$$

Індуктивний опір обмотки статора

$$X_1 = \frac{1.58 \cdot f_1 \cdot l_{\delta} \cdot w_1^2 \cdot \lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} = \frac{1.58 \cdot 50 \cdot 45.5 \cdot 676^2 \cdot 4.64}{4 \cdot 10^8} = 19.1 \text{ Ом .}$$

Індуктивний опір розсіювання однієї фази обмотки статора у відносних одиницях

$$X_{1x} = \frac{X_1 \cdot I_1}{U_1} = \frac{19.1 \cdot 0.548}{220} = 0.048 \text{ .}$$

Опори обмотки ротора

Питомий опір алюмінію

$$\rho_a = 48.8 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{мм} \text{ .}$$

Активний опір стріжня обмотки ротора

$$R_{2c} = \rho_a \cdot \frac{l_{\delta}}{S_{p2}} = 48.8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{45.5}{30.5} = 7.28 \times 10^{-5} \text{ Ом} \text{ .}$$

Площина стрижня ротора

$$q_c = S_{p2} = 30.5 \text{ мм}^2.$$

Коефіцієнт приведення опорів к.з. кільця до обмотки ротора

$$k_{pr} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{p}{z_2} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{19} = 0.331.$$

Активний опір к.з. кільця обмотки ротора

$$R_k = \frac{D_{2c} \cdot \rho_a \cdot 2 \cdot \pi}{z_2 \cdot q_{кл} \cdot k_{pr}^2} = \frac{48.1 \cdot 48.8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi}{19 \cdot 116 \cdot 0.331^2} = 6.11 \times 10^{-5} \text{ Ом}.$$

Коефіцієнт зведення опорів обмотки ротора до статора

$$k_{21} = \frac{4 \cdot m_1}{z_2} \cdot (w_1 \cdot k_{ob1})^2 = \frac{4 \cdot 3}{19} \cdot (676 \cdot 0.931)^2 = 2.502 \times 10^5.$$

Зведений активний опір обмотки ротора

$$R_{21} = k_{21} \cdot (R_{2c} + R_k) = 2.502 \times 10^5 \cdot (7.28 \times 10^{-5} + 6.11 \times 10^{-5}) = 33.5 \text{ Ом}.$$

Активний опір обмотки ротора, зведений до обмотки статора у відносних одиницях

$$R_{21x} = \frac{R_{21} \cdot I_1}{U_1} = \frac{33.5 \cdot 0.548}{220} = 0.083 \text{ Ом}.$$

Складові коефіцієнту магнітної провідності пазового розсіювання ротора

$$C_{\lambda 1} = \frac{h_2 + 0.4 d_{p2}}{3 d'_{p2}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot d'_{p2}^2}{8 S_{p2}} \right)^2 = \frac{2.16 + 0.4 \cdot 4.58}{3 \cdot 5.3} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 5.3^2}{8 \cdot 30.5} \right)^2 = 0.102.$$

$$C_{\lambda} = C_{\lambda 1} + 0.66 - \frac{b_{h2}}{2 \cdot d_{p2}} = 0.102 + 0.66 - \frac{1.1}{2 \cdot 4.58} = 0.642.$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання ротора

$$\lambda_{п2} = C_{\lambda} + \frac{h_{h2}}{b_{h2}} = 0.642 + \frac{0.5}{1.1} = 1.1.$$

Коефіцієнт диференціального розсіювання ротора

$$k_{д2} = 8.765 \times 10^{-3}.$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання

$$\lambda_{д2} = \frac{0.9 t_2 \cdot k_{д2}}{\delta \cdot K_{\delta}} \cdot \left(\frac{z_2}{6p} \right)^2 = \frac{0.9 \cdot 9.46 \cdot 8.765 \times 10^{-3}}{0.3 \cdot 1.36} \cdot \left(\frac{19}{6} \right)^2 = 1.83.$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання короткозамкнених кілець клітки

ротора ротора

$$\lambda_{л2} = \frac{2.3 \cdot D_{2c}}{z_2 \cdot l_{\delta} \cdot k_{pr}^2} \cdot \log \left(\frac{2.35 \cdot D_{2c}}{h_k + l_k} \right) = \frac{2.3 \cdot 48.1}{19 \cdot 45.5 \cdot 0.331^2} \cdot \log \left(\frac{2.35 \cdot 48.1}{9.12 + 12.7} \right) = 0.834 \quad .$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання обмотки ротора

$$\lambda_2 = \lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2} = 1.1 + 0.834 + 1.83 = 3.76 \quad .$$

Зведений індуктивний опір обмотки ротора

$$X_{21} = 7.9 \cdot f_1 \cdot l_{\delta} \cdot k_{21} \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} = 7.9 \cdot 50 \cdot 45.5 \cdot 2.502 \times 10^5 \cdot 3.76 \cdot 10^{-9} = 16.9 \quad \text{Ом} \quad .$$

Індуктивний опір обмотки ротора у відносних одиницях

$$X_{21x} = \frac{X_{21} \cdot I_1}{U_1} = \frac{16.9 \cdot 0.548}{220} = 0.042 \quad .$$

Розрахунок магнітного кола

МРС повітряного зазору

$$F_{\delta} = 0.8 \cdot \delta \cdot K_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot 10^3 = 0.8 \cdot 0.3 \cdot 1.36 \cdot 0.585 \cdot 10^3 = 191 \quad \text{А} \quad .$$

Магнітна індукція в зубцях статора

$$B_{z1} = t_1 \cdot \frac{B_{\delta}}{k_c \cdot b_{z1}} = 7.57 \cdot \frac{0.585}{0.97 \cdot 2.47} = 1.85 \quad \text{Тл} \quad .$$

Зубцевий розподіл статора на висоті 1/3 зубця

$$t_{13} = \left(D_1 + \frac{2}{3} \cdot h_{z1} \right) \cdot \frac{\pi}{z_1} = \left(57.8 + \frac{2}{3} \cdot 5.31 \right) \cdot \frac{\pi}{24} = 8.03 \quad \text{мм} \quad .$$

Коефіцієнт

$$k_{p1} = \frac{t_{13}}{k_c \cdot b_{z1}} = \frac{8.03}{0.97 \cdot 2.47} = 3.35 \quad .$$

Напруженість у зубцях статора

$$H_{z1} = 25 \quad \frac{\text{А}}{\text{см}} \quad .$$

МРС зубців статора

$$F_{z1} = 0.1 \cdot H_{z1} \cdot h_{z1} = 0.1 \cdot 25 \cdot 5.31 = 13.3 \quad \text{А} \quad .$$

Магнітна індукція в зубці ротора

$$B_{z2} = t_2 \cdot \frac{B_{\delta}}{k_c \cdot b_{z2}} = 9.46 \cdot \frac{0.585}{0.97 \cdot 3.12} = 1.83 \quad \text{Тл} \quad .$$

Зубцевий розподіл ротора на висоті 1/3 зубця

$$t_{23} = \left(D_2 - \frac{4}{3} \cdot h_{z2} \right) \cdot \frac{\pi}{z_2} = \left(57.2 - \frac{4}{3} \cdot 7.6 \right) \cdot \frac{\pi}{19} = 7.78 \quad \text{мм.}$$

Коефіцієнт

$$k_{p2} = \frac{t_{23}}{k_c \cdot b_{z2}} = \frac{7.78}{0.97 \cdot 3.12} = 2.57.$$

Напруженість у зубцях ротора

$$H_{z2} = 24 \quad \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

МРС зубців ротора

$$F_{z2} = 0.1 \cdot H_{z2} \cdot (h_{z2} - 0.1 d_{p2}) = 0.1 \cdot 24 \cdot (7.6 - 0.1 \cdot 4.58) = 17.1 \quad \text{А.}$$

Магнітна індукція в спинці статора

$$B_{c1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot B_\delta}{h_{c1} \cdot k_c} = \frac{0.5 \cdot 0.637 \cdot 90.8 \cdot 0.585}{11.6 \cdot 0.97} = 1.5 \quad \text{Тл.}$$

Напруженість у спинці статора

$$H_{c1} = 6.2 \quad \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

Середня довжина силової лінії у спинці статора

$$L_{c1} = \frac{\pi \cdot (D_{H1} - h_{c1})}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (91.6 - 11.6)}{4} = 62.8 \quad \text{мм.}$$

МРС у спинці статора

$$F_{c1} = 0.1 \cdot H_{c1} \cdot L_{c1} = 0.1 \cdot 6.2 \cdot 62.8 = 38.9 \quad \text{А.}$$

Напруженість у спинці ротора

$$H_{c2} = 3 \quad \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

Середня довжина силової лінії у спинці ротора

$$L_{c2} = \frac{\pi \cdot (D_{2B} + h_{c2})}{4 \cdot p} + h_{c2} = \frac{\pi \cdot (17 + 12.5)}{4} + 12.5 = 35.7 \quad \text{мм.}$$

МРС у спинці ротора

$$F_{c2} = 0.1 \cdot H_{c2} \cdot L_{c2} = 0.1 \cdot 3 \cdot 35.7 = 10.7 \quad \text{А.}$$

Загальна МРС

$$F_\Sigma = 2F_\delta + F_{c1} + 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_{c2} = 2 \cdot 191 + 38.9 + 2 \cdot 13.3 + 2 \cdot 17.1 + 10.7 = 492 \quad \text{А.}$$

Коефіцієнт намагнічування

$$k_\mu = \frac{F_\Sigma}{2F_\delta} = \frac{492}{2 \cdot 191} = 1.29.$$

Струм намагнічування

$$I_{\mu} = \frac{F_{\Sigma} \cdot p}{0.9 m_1 \cdot w_1 \cdot k_{ob1}} = \frac{492}{0.9 \cdot 3 \cdot 676 \cdot 0.931} = 0.29 \text{ А.}$$

Відносний струм намагнічування

$$I_{\mu\%} = \frac{100 I_{\mu}}{I_1} = \frac{100 \cdot 0.29}{0.548} = 52.9 \text{ \% .}$$

Головний індуктивний опір

$$X_{\mu} = \frac{k_{e1} \cdot U_1}{I_{\mu}} = \frac{0.97 \cdot 220}{0.29} = 736 \text{ Ом .}$$

Кофіцієнт намагнічування

$$\sigma_{\mu} = \frac{X_1}{X_{\mu}} = \frac{19.1}{736} = 0.026 \text{ .}$$

Режим холостого ходу

Технологічний коефіцієнт, що враховує збільшення втрат через дефекти в сталі, що виникають при штампуванні листів, їх складанні і наступній обробці $K_{\text{мт}} = 1,7$.

Питомі магнітні втрати, тобто втрати в 1 кг сталі 2013 при частоті 50 Гц у магнітному полі з індукцією 1,0 Тл $P_{1,0/50} = 2,5 \text{ Вт/кг}$.

Об'єм спілки статора

$$V_{c1} = l_{\delta} \cdot \pi \cdot h_{c1} \cdot (D_{H1} - h_{c1}) = 45.5 \cdot \pi \cdot 11.6 \cdot (91.6 - 11.6) = 1.327 \times 10^5 \text{ мм}^3.$$

Маса спілки статора

$$m_{c1} = 7.8 \cdot k_c \cdot 10^{-6} \cdot V_{c1} = 7.8 \cdot 0.97 \cdot 10^{-6} \cdot 1.327 \times 10^5 = 1 \text{ кг .}$$

Об'єм спілки ротора

$$V_{c2} = l_{\delta} \cdot \pi \cdot h_{c2} \cdot (D_{2B} + h_{c2}) = 45.5 \cdot \pi \cdot 12.5 \cdot (17 + 12.5) = 5.271 \times 10^4 \text{ мм}^3.$$

Маса спілки ротора

$$m_{c2} = 7.8 \cdot k_c \cdot 10^{-6} \cdot V_{c2} = 7.8 \cdot 0.97 \cdot 10^{-6} \cdot 5.271 \times 10^4 = 0.399 \text{ кг .}$$

Загальна площа зубців статора

$$S_{z1} = h_{z1} \cdot \pi \cdot (D_1 + h_{z1}) - S_{p1} \cdot z_1 = 5.31 \cdot \pi \cdot (57.8 + 5.31) - 26.1 \cdot 24 = 426 \text{ мм}^2.$$

Маса зубців статора

$$m_{z1} = 7.8 \cdot k_c \cdot 10^{-6} \cdot S_{z1} \cdot l_{\delta} = 7.8 \cdot 0.97 \cdot 10^{-6} \cdot 426 \cdot 45.5 = 0.147 \text{ кг.}$$

Загальна площа зубців ротора

$$S_{z2} = h_{z2} \cdot \pi \cdot (D_2 - h_{z2}) - S_{p2} \cdot z_2 = 7.6 \cdot \pi \cdot (57.2 - 7.6) - 30.5 \cdot 19 = 605 \text{ мм}^2.$$

Маса зубців ротора

$$m_{z2} = 7.8 \cdot k_c \cdot 10^{-6} \cdot S_{z2} \cdot l_\delta = 7.8 \cdot 0.97 \cdot 10^{-6} \cdot 605 \cdot 45.5 = 0.208 \text{ кг}.$$

Втрати потужності у зубцях статора

$$P_{z1} = 1.7 \cdot 2.5 \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1} = 1.7 \cdot 2.5 \cdot 1.85^2 \cdot 0.147 = 2.14 \text{ Вт}.$$

Втрати потужності у спинці статора

$$P_{c1} = 1.7 \cdot 2.5 \cdot B_{c1}^2 \cdot m_{c1} = 1.7 \cdot 2.5 \cdot 1.5^2 \cdot 1 = 9.562 \text{ Вт}.$$

Втрати потужності у зубцях ротора

$$P_{z2} = 1.7 \cdot 2.5 \cdot B_{z2}^2 \cdot m_{z2} = 1.7 \cdot 2.5 \cdot 1.83^2 \cdot 0.208 = 2.96 \text{ Вт}.$$

Втрати потужності у спинці ротора

$$P_{c2} = 1.7 \cdot 2.5 \cdot B_{c2}^2 \cdot m_{c2} = 1.7 \cdot 2.5 \cdot 1.4^2 \cdot 0.399 = 3.324 \text{ Вт}.$$

Загальні втрати потужності у сталі

$$P_{ст} = P_{z1} + P_{c1} = 2.14 + 9.562 = 11.7 \text{ Вт}.$$

Загальні втрати потужності у сталі

$$P_{ст2} = P_{z2} + P_{c2} = 2.96 + 3.324 = 6.28 \text{ Вт}.$$

Активний опір гілки намагнічування

$$R_\mu = \frac{P_{ст}}{m_1 \cdot I_\mu^2} = \frac{11.7}{3 \cdot 0.29^2} = 46.4 \text{ Ом}.$$

Активний змінний опір гілки намагнічування

$$R_{\mu 2} = \frac{P_{ст2}}{m_1 \cdot I_\mu^2} = \frac{6.28}{3 \cdot 0.29^2} = 24.9 \text{ Ом}.$$

Момент інерції ротора

Момент інерції ротора

$$J = 0.6 \cdot D_2^4 \cdot l_\delta \cdot 10^{-12} = 0.6 \cdot 57.2^4 \cdot 45.5 \cdot 10^{-12} = 2.92 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Заступні схеми

Коефіцієнт зведення Т-подібної заступної схеми до Г-подібної

$$c_1 = \left| 1 + \frac{Z_1}{Z_\mu} \right| = \left| 1 + \frac{78.2 + 19.1 \cdot i}{46.4 + 736 \cdot i} \right| = 1.04.$$

Розрахунок параметрів номінального режиму

Коефіцієнт

$$k_T = \begin{cases} (1 - D_{H1} 10^{-3}) \cdot 1.3 & \text{if } p = 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_T = (1 - 91.6 \cdot 10^{-3}) \cdot 1.3 = 1.18$$

Основні механічні втрати

$$P_{\text{mex}} = k_T \cdot \left(\frac{n_1}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{H1}}{100} \right)^4 = 1.18 \cdot \left(\frac{3 \times 10^3}{1 \times 10^3} \right)^2 \cdot \left(\frac{91.6}{100} \right)^4 = 7.48 \quad \text{Вт}$$

Додаткові втрати

$$P_{\text{dob}} = 5 \cdot \frac{P_{2H}}{\eta'} = 5 \cdot \frac{0.18}{0.653} = 1.38 \quad \text{Вт}$$

Повна механічна потужність

$$p'_2 = P_{2H} \cdot 1000 + P_{\text{mex}} + P_{\text{dob}} = 0.18 \cdot 1 \times 10^3 + 7.48 + 1.38 = 189 \quad \text{Вт}$$

Коефіцієнти рівняння ковзання:

$$A_{s1} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot R_{21}}{p'_2} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 33.5}{189} = 2.574 \times 10^4 \quad \text{Ом}^2$$

$$A_{s2} = (X_1 + c_1 \cdot X_{21})^2 + R_1^2 = (19.1 + 1.04 \cdot 16.9)^2 + 78.2^2 = 7.46 \times 10^3 \quad \text{Ом}^2$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 2.574 \times 10^4 + 7.46 \times 10^3 = 3.32 \times 10^4 \quad \text{Ом}^2$$

$$B_s = 2c_1 \cdot R_1 \cdot R_{21} - A_{s1} = 2 \cdot 1.04 \cdot 78.2 \cdot 33.5 - 2.574 \times 10^4 = -2.029 \times 10^4 \quad \text{Ом}^2$$

$$C_s = (c_1 \cdot R_{21})^2 = (1.04 \cdot 33.5)^2 = 1.213 \times 10^3 \quad \text{Ом}^2$$

$$D_{sn} = B_s^2 - 4A_s \cdot C_s = (-2.029 \times 10^4)^2 - 4 \cdot 3.32 \times 10^4 \cdot 1.213 \times 10^3 = 2.505 \times 10^8 \quad \text{Ом}^4$$

Номінальне ковзання

$$s'_n = \frac{-B_s - \sqrt{D_{sn}}}{0.0186A_s} = \frac{-(-2.029 \times 10^4) - \sqrt{2.505 \times 10^8}}{0.019 \cdot 3.32 \times 10^4} = 7.22 \quad \%$$

Активний опір робочої гілки

$$R_{21s} = \frac{c_1^2 \cdot R_{21}}{s_n} + c_1 \cdot R_1 = \frac{1.04^2 \cdot 33.5}{0.072} + 1.04 \cdot 78.2 = 583.2 \quad \text{Ом}$$

Індуктивний опір робочої гілки

$$X_{21s} = c_1^2 \cdot X_{21} + c_1 \cdot X_1 = 1.04^2 \cdot 16.9 + 1.04 \cdot 19.1 = 38.14 \quad \text{Ом}$$

Еквівалентний опір гілки намагнічування

$$Z_{p\mu} = Z_1 + Z_{\mu} = 78.2 + 19.1 \cdot i + 46.4 + 736 \cdot i = 124.6 + 755.1i \quad \text{Ом.}$$

Еквівалентний опір заступної схеми

$$Z_{ek} = \left(\frac{1}{Z_{21s}} + \frac{1}{Z_{p\mu}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{583.2 + 38.14i} + \frac{1}{124.6 + 755.1 \cdot i} \right)^{-1} = 339.9 + 248i \quad \text{Ом} .$$

Номинальний зведений струм ротора

$$I_{21n} = c_1 \cdot \frac{U_1}{|Z_{21s}|} = 1.04 \cdot \frac{220}{|583.2 + 38.14i|} = 0.391 \quad \text{А} .$$

Номинальний струм статора

$$I_{1n} = \frac{U_1}{|Z_{ek}|} = \frac{220}{|339.9 + 248 \cdot i|} = 0.523 \quad \text{А} .$$

Струм в стрижні короткозамкненого ротора

$$I_{ст} = \frac{I_{21n} \cdot 2 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{об1}}{z_2} = \frac{0.391 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 676 \cdot 0.931}{19} = 77.71 \quad \text{А} .$$

Номинальний коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi_{1n} = \cos(\arg(Z_{ek})) = \cos(\arg(339.9 + 248 \cdot i)) = 0.808 \quad .$$

Номинальна потужність споживання

$$P_{1n} = 10^{-3} \cdot m_1 \cdot U_1 \cdot I_{1n} \cdot \cos \varphi_{1n} = 10^{-3} \cdot 3 \cdot 220 \cdot 0.523 \cdot 0.808 = 0.279 \quad \text{кВт} .$$

Втрати потужності:

- у обмотці статора

$$P_{e1} = m_1 \cdot I_{1n}^2 \cdot R_1 = 3 \cdot 0.523^2 \cdot 78.2 = 64.2 \quad \text{Вт} .$$

- у обмотці ротора

$$P_{e2} = m_1 \cdot I_{21n}^2 \cdot R_{21} = 3 \cdot 0.391^2 \cdot 33.5 = 15.4 \quad \text{Вт} .$$

- загальні електричні

$$P_{ze} = P_{e1} + P_{e2} = 64.2 + 15.4 = 79.6 \quad \text{Вт} .$$

- загальні

$$P_s = (P_{ze} + P_{ст} + P_{мех} + P_{доб}) \cdot 10^{-3} = (79.6 + 11.7 + 7.48 + 1.38) \cdot 10^{-3} = 0.1 \quad \text{кВт} .$$

Корисна потужність

$$P_2 = P_{1n} - P_s = 0.279 - 0.1 = 0.18 \quad \text{кВт} .$$

ККД

$$\eta = 1 - \frac{P_s}{P_{1n}} = 1 - \frac{0.1}{0.279} = 0.642 \quad .$$

Номинальна частота обертання ротора

$$n_{2n} = n_1 \cdot (1 - s_n) = 3 \times 10^3 \cdot (1 - 0.072) = 2.783 \times 10^3 \quad \frac{\text{об}}{\text{хв}}.$$

Коефіцієнт номінального електромагнітного моменту

$$k_{Mn} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot p \cdot c_1^2 \cdot R_{21}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1.04^2 \cdot 33.5}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1.675 \times 10^4 \quad \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{Ом}^2.$$

Номинальний електромагнітний момент

$$M_n = \frac{k_{Mn}}{s_n \cdot (|Z_{21s}|)^2} = \frac{1.675 \times 10^4}{0.072 \cdot (|583.2 + 38.14i|)^2} = 0.679 \quad \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Розрахунок робочих характеристик АД

Для розрахунку робочих характеристик АД задається ряд відносних значень корисної потужності $P_{2*} = P_2 / P_{2n}$ від 0 до 1,25. Для кожного із цих значень розраховуються необхідні параметри і заносяться у таблицю. Потім будуються робочі характеристики АД у відносних одиницях (рис. А.1).

Додаткові втрати потужності

$$P_{\text{dob}}(P_{2x}) = 0.005 \cdot \frac{P_2(P_{2x})}{\eta}.$$

Потужність на валу

$$p'_2(P_{2x}) = P_2(P_{2x}) + P_{\text{mex}} + P_{\text{dob}}(P_{2x}).$$

Розрахункові коефіцієнти

$$A_s(P_{2x}) = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot R_{21}}{p'_2(P_{2x})} + R_1^2 + (X_1 + c_1 \cdot X_{21})^2.$$

$$B_s(P_{2x}) = 2c_1 \cdot R_1 \cdot R_{21} - \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot R_{21}}{p'_2(P_{2x})}.$$

Ковзання

$$s(P_{2x}) = \frac{-B_s(P_{2x}) - \sqrt{B_s(P_{2x})^2 - 4A_s(P_{2x}) \cdot C_s}}{1.86 A_s(P_{2x})}.$$

Повний опір робочої гілки

$$Z_{21s}(P_{2x}) = \frac{c_1^2 \cdot R_{21}}{s(P_{2x})} + c_1 \cdot R_1 + i \cdot (c_1^2 \cdot X_{21} + c_1 \cdot X_1) .$$

Еквівалентний опір

$$Z_{ek}(P_{2x}) = \left(\frac{1}{Z_{21s}(P_{2x})} + \frac{1}{Z_1 + Z_\mu} \right)^{-1} .$$

Струм стагора

$$I_1(P_{2x}) = \frac{U_1}{|Z_{ek}(P_{2x})|} .$$

Коефіцієнт потужності

$$\cos\phi_1(P_{2x}) = \cos(\arg(Z_{ek}(P_{2x}))) .$$

Потужність споживання

$$P_1(P_{2x}) = 10^{-3} \cdot m_1 \cdot U_1 \cdot I_1(P_{2x}) \cdot \cos\phi_1(P_{2x}) .$$

ККД

$$\eta(P_{2x}) = \frac{P_2(P_{2x})}{P_1(P_{2x}) \cdot 1000} .$$

Швидкість обертання ротора

$$n_2(P_{2x}) = (1 - s(P_{2x})) .$$

Електромагнітний момент

$$M(P_{2x}) = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot p \cdot R_{21}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s(P_{2x}) \cdot \left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R_{21}}{s(P_{2x})} \right)^2 + (X_1 + c_1 \cdot X_{21})^2 \right] \cdot M_n} .$$

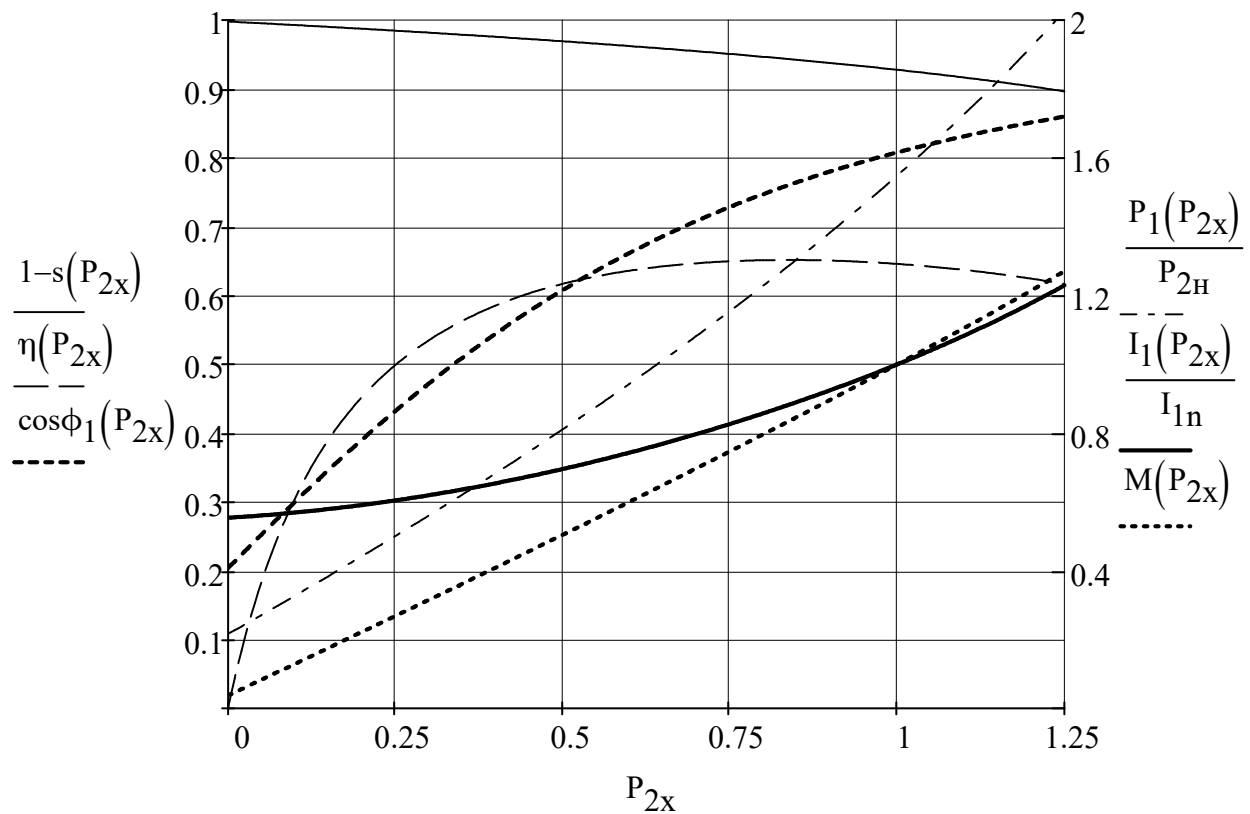


Рис.А.1. Робочі характеристики

Електромеханічні характеристики

Задаючись рядом значень ковзання s від 0 до 1, виконується розрахунок у наступному порядку:

- електромагнітний момент

$$M(s) = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot p \cdot R_{21}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s \cdot \left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R_{21}}{s} \right)^2 + (X_1 + c_1 \cdot X_{21})^2 \right]} \cdot M_n$$

- повний опір робочої гілки заступної Г-подібної схеми

$$Z_{21s}(s) = \frac{c_1^2 \cdot R_{21}}{s} + c_1 \cdot R_1 + i \cdot (c_1^2 \cdot X_{21} + c_1 \cdot X_1)$$

- еквівалентний опір заступної Г-подібної схеми

$$Z_{ek}(s) = \left(\frac{1}{Z_{21s}(s)} + \frac{1}{Z_1 + Z_\mu} \right)^{-1}$$

- струм статора

$$I_{1s}(s) = \frac{U_1}{I_{1n} \cdot |Z_{ek}(s)|} \cdot$$

Наділі будуються залежності струму статора і електромагнітного моменту від ковзання (рис. А.2).

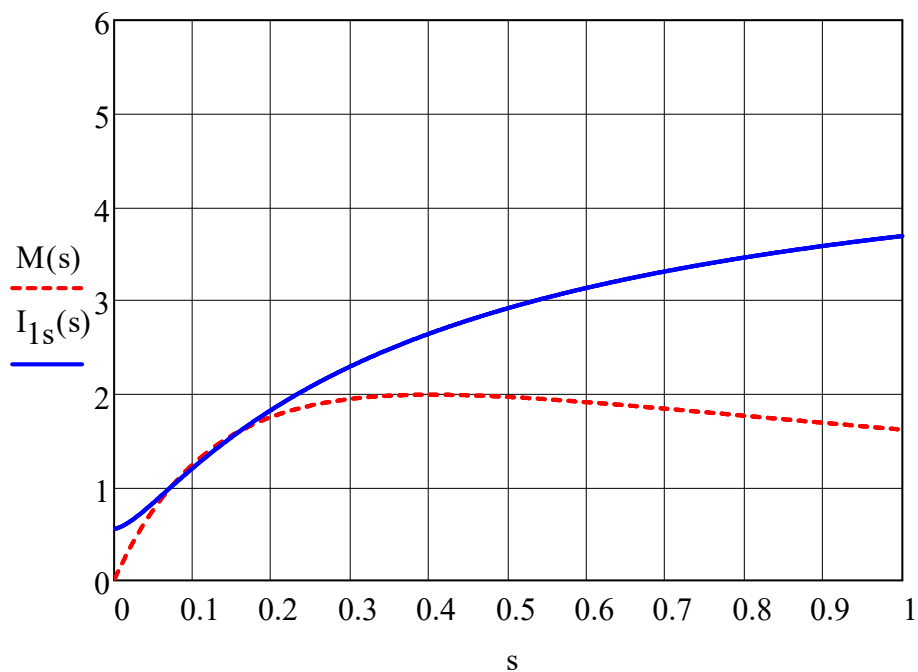


Рис.А.2. Електромеханічні характеристики

ДОДАТОК Б. Розрахунок АД з короткозамкненим ротором потужністю 3 кВт

Вихідні дані:

Номінальна потужність	$P_{2H} = 3 \text{ кВт} .$
Частота мережі	$f_1 = 50 \text{ Гц} .$
Фазна напруга мережі	$U_1 = 220 \text{ В} .$
Ступень захисту	IP44.
Число пар полюсів	$p = 1 .$
Кількість фаз	$m_1 = 3 .$

Вибір головних розмірів

Висота осі обертання

$$h = 90 \text{ мм} .$$

Кількість зубців статора

$$z_1 = 36 .$$

Кількість зубців ротора

$$z_2 = 44 .$$

Кількість пазів на полюс і фазу статора

$$q_1 = \frac{z_1}{2 \cdot p \cdot m_1} = \frac{36}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 6 .$$

Обирається одношарова концентрична обмотка у розвалу з кількістю паралельних гілок

$$a_1 = 1 .$$

та середнім кроком обмотки

$$y_1 = 15 .$$

Попереднє значення обмотувального коефіцієнта

$$k'_{ob1} = 0.93 .$$

Індукція у зубцях статора

$$B_{z1} = 1.85 \text{ Тл} .$$

Індукція у спинці статора

$$B_{c1} = 1.62 \text{ Тл} .$$

Виходячи із значення висоти осі обертання обирається марка стали 2013, для неї

використовується ізолювання листів оксидуванням, а коефіцієнт заповнення

$$k_c = 0.97 .$$

Індукція у спінці ротора

$$B_{c2} = 1.42 \quad \text{Тл} .$$

Індукція у зубцях ротора

$$B_{z2} = 1.83 \quad \text{Тл} .$$

Синхронна частота обертання полю статора

$$n_1 = f_1 \cdot \frac{60}{p} = 50 \cdot \frac{60}{1} = 3 \times 10^3 \quad \frac{\text{об}}{\text{хв}} .$$

Розрахунковий момент на валу

$$M' = \frac{2 \cdot 10^3 P_{2H} \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 3}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 19.1 \quad \text{Нм} .$$

За розрахунковим моментом M' обираються розміри вала та шпонки:

$$d_1 = 28 \quad \text{мм};$$

$$d_2 = 30 \quad \text{мм};$$

$$d_3 = 37 \quad \text{мм};$$

$$l_1 = 60 \quad \text{мм};$$

$$b = 8 \quad \text{мм};$$

$$a = 7 \quad \text{мм};$$

$$t = 4 \quad \text{мм}.$$

Внутрішній діаметр магнітопроводу ротора

$$D_{2B} = d_3 = 37 \quad \text{мм}.$$

Попереднє значення ККД

$$\eta' = 0.848 .$$

Попереднє значення коефіцієнта потужності

$$\cos \varphi'_1 = 0.852 .$$

Коефіцієнт ЕРС

$$k_{e1} = 0.97 .$$

Розрахункова потужність

$$P_i = \frac{k_{e1} \cdot P_{2H}}{\eta' \cdot \cos \varphi'_1} = \frac{0.97 \cdot 3}{0.848 \cdot 0.852} = 4.02 \quad \text{кВА} .$$

Попереднє відносне значення струму намагнічування

$$I_{\mu B} = 0.443 .$$

Коефіцієнт перетворення струму

$$k_{i12} = \sqrt{1 - 2I_{\mu B} \cdot \sqrt{1 - \cos \varphi'_1}^2 + I_{\mu B}^2} = \sqrt{1 - 2 \cdot 0.443 \cdot \sqrt{1 - 0.852^2} + 0.443^2} = 0.856 \quad .$$

Максимально припустимий зовнішній діаметр магнітопроводу статора

$$D_{H1\max} = 157 \quad \text{мм.}$$

Товщина корпусу

$$\Delta_k = 6.5 \quad \text{мм.}$$

Попередні значення:

- лінійного навантаження

$$A'_1 = 154 \quad \frac{\text{А}}{\text{см}} \quad .$$

- індукції у повітряному зазорі

$$B'_\delta = 0.614 \quad \text{Тл} \quad .$$

Максимально припустиме значення щільності струму в стрижнях обмотки ротору

$$\Delta_{2\max} = 2.9 \quad \frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \quad .$$

Мінімальна умовна ширина нижньої частини паза ротора

$$a_{2\min} = 2 \quad \text{мм.}$$

Коефіцієнт заповнення пазового простору ротора

$$k_{z2} = 0.85 \quad .$$

Розрахункові коефіцієнти:

$$F = \frac{-1}{\left[\frac{B'_\delta}{k_c} \cdot \left(\frac{1}{p \cdot B_{c2}} - \frac{1}{B_{z2}} \right) \right]} = \frac{-1}{\frac{0.614}{0.97} \cdot \left(\frac{1}{1.42} - \frac{1}{1.83} \right)} = -10 \quad .$$

$$A_a = \left(\frac{1}{p^2 \cdot B_{c2}^2} + \frac{2 \cdot k_c}{B'_\delta \cdot B_{z2}} - \frac{2}{p \cdot B_{z2} \cdot B_{c2}} \right) = \frac{1}{1^2 \cdot 1.42^2} + \frac{2 \cdot 0.97}{0.614 \cdot 1.83} - \frac{2}{1.83 \cdot 1.42} = 1.45$$

$$A = 1 - \frac{B'_\delta^2}{k_c^2} \cdot A_a = 1 - \frac{0.614^2}{0.97^2} \cdot 1.45 = 0.419 \quad .$$

$$A_{1\min 1} = \frac{5\Delta_{2\max} \cdot k_{z2}}{2 \cdot k_{i12} \cdot k'_{ob1}} = \frac{5 \cdot 2.9 \cdot 0.85}{2 \cdot 0.856 \cdot 0.93} = 7.74 \quad \frac{\text{A}}{\text{мм} \cdot \text{см}}.$$

$$A_{1\min 2} = \frac{D_{2B} \cdot a_{2\min} \cdot z_2}{F \cdot (D_{2B} \cdot \pi - a_{2\min} \cdot z_2)} = \frac{37 \cdot 2.44}{-10 \cdot (37 \cdot \pi - 2.44)} = -11.5 \quad \text{мм}.$$

$$A_{1\min 3} = A \cdot F \cdot \left(D_{2B} - a_{2\min} \cdot \frac{z_2}{\pi} \right) = 0.419 \cdot -10 \cdot \left(37 - 2 \cdot \frac{44}{\pi} \right) = -37.7 \quad \text{мм}.$$

$$A_{1\min 4} = \frac{D_{2B}}{F} + A_{1\min 3} - A_{1\min 2} = \frac{37}{-10} + -37.7 - -11.5 = -29.9 \quad \text{мм}.$$

Мінімально припустиме лінійне навантаження

$$A_{1\min} = A_{1\min 1} \cdot A_{1\min 4} = 7.74 \cdot -29.9 = -231 \quad \frac{\text{A}}{\text{см}} < A'_1 = 154 \quad \frac{\text{A}}{\text{см}}.$$

Повітряний зазор між статором і ротором

$$\delta = 0.4 \quad \text{мм}.$$

Розрахункові коефіцієнти:

$$B_b = \frac{2 \cdot D_{2B} \cdot B' \delta}{k_c} \cdot \left(\frac{1}{B_{z2}} - \frac{1}{p \cdot B_{c2}} \right) = \frac{2 \cdot 37 \cdot 0.614}{0.97} \cdot \left(\frac{1}{1.83} - \frac{1}{1.42} \right) = -7.39 \quad \text{мм}.$$

$$B = B_b - \frac{A'_1}{A_{1\min 1}} = -7.39 - \frac{154}{7.74} = -27.3 \quad \text{мм}.$$

$$C = D_{2B}^2 = 37^2 = 1.369 \times 10^3 \quad \text{мм}^2.$$

Розрахунковий внутрішній діаметр магнітопроводу статора

$$D'_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4A \cdot C}}{2A} = \frac{-(-27.3) + \sqrt{(-27.3)^2 + 4 \cdot 0.419 \cdot 1.369 \times 10^3}}{2 \cdot 0.419} = 98.4 \quad \text{мм}.$$

Діаметр магнітопроводу статора

$$D_1 = D'_1 + 2\delta = 98.4 + 2 \cdot 0.4 = 99.2 \quad \text{мм}.$$

Довжина активної частини

$$l'_\delta = \frac{6 \cdot \sqrt{2} \cdot 10^{11} \cdot P_i}{\pi^2 \cdot D_1^2 \cdot n_1 \cdot A'_1 \cdot B' \delta \cdot k'_{ob1}} = \frac{6 \cdot \sqrt{2} \cdot 10^{11} \cdot 4.02}{\pi^2 \cdot 99.2^2 \cdot 3 \times 10^3 \cdot 154 \cdot 0.614 \cdot 0.93} = 133.1 \quad \text{мм}.$$

$$\text{Приймається } l_\delta = 0.5 \cdot \text{round} \left(\frac{l'_\delta}{0.5} \right) = 0.5 \cdot \text{round} \left(\frac{133.1}{0.5} \right) = 133 \quad \text{мм}.$$

Відношення довжини і діаметру статора

$$\lambda = \frac{l_\delta}{D_1} = \frac{133}{99.2} = 1.3.$$

Максимальне припустиме відношення довжини і діаметру статора

$$\lambda_{\max} = 1.4 .$$

Відношення довжини і діаметру статора менше максимально припустимого

значення і достатньо близько наближено до нього

$$\lambda = 1.3 < \lambda_{\max} = 1.4 .$$

Діаметр магнітопроводу ротора

$$D_2 = D_1 - 2\delta = 99.2 - 2 \cdot 0.4 = 98.4 \text{ мм} .$$

Активна частина статора

Припуски на штампування по висоті $h_{\text{пр}}$ і ширині $b_{\text{пр}}$ паза приймаються 0,1 мм

Зубцеве ділення статора

$$t_1 = \frac{\pi D_1}{z_1} = \frac{\pi \cdot 99.2}{36} = 8.66 \text{ мм} .$$

Ширина зубця статора

$$b_{z1} = \frac{B'_\delta \cdot t_1}{B_{z1} \cdot k_c} = \frac{0.614 \cdot 8.66}{1.85 \cdot 0.97} = 2.96 \text{ мм} .$$

Полосне ділення статора

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 99.2}{2} = 156 \text{ мм} .$$

Розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} = \frac{2}{\pi} = 0.637 .$$

Висота спинки статора

$$h_{c1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot B'_\delta}{B_{c1} \cdot k_c} = \frac{0.5 \cdot 0.637 \cdot 156 \cdot 0.614}{1.62 \cdot 0.97} = 19.4 \text{ мм} .$$

Струм статора

$$I_1 = \frac{P_{2H} \cdot 1000}{\eta' \cdot \cos \varphi'_1 \cdot U_1 \cdot m_1} = \frac{3.1 \times 10^3}{0.848 \cdot 0.852 \cdot 220 \cdot 3} = 6.29 \text{ А} .$$

Кількість ефективних провідників обмотки статора в пазу

$$u_1 = \text{round} \left(\frac{A'_1 \cdot a_1 \cdot t_1}{10 I_1} \right) = \text{round} \left(\frac{154 \cdot 8.66}{10 \cdot 6.29} \right) = 21 .$$

Кількість витків обмотки статора

$$w_1 = u_1 \cdot p \cdot \frac{q_1}{a_1} = 21 \cdot \frac{6}{1} = 126 .$$

Клас нагрівостійкості ізоляції обмотки статора F.

Щільність струму у обмотці статора

$$\Delta'_1 = 6.76 \frac{A}{\text{мм}^2}.$$

Площина поперечного перерізу ефективного дроту обмотки статора

$$q'_{\text{эф}1} = \frac{I_1}{a_1 \cdot \Delta'_1} = \frac{6.29}{6.76} = 0.93 \text{ мм}^2.$$

Кількість елементарних провідників

$$N_{e1} = 1.$$

Для обмоток статора обирається дріт марки ПЭТ - 155. Перетин дроту обмотки статора

$$q'_{e1} = \frac{q'_{\text{эф}1}}{N_{e1}} = \frac{0.93}{1} = 0.93 \text{ мм}^2.$$

Приймається

$$q_{e1} = 0.985 \text{ мм}^2;$$

$$d_{iz} = 1.2 \text{ мм};$$

$$d = 1.12 \text{ мм}.$$

Загальна площа дротів обмотки статора у пазу

$$S_{o1} = q_{e1} \cdot u_1 \cdot N_{e1} = 0.985 \cdot 21 = 20.7 \text{ мм}^2.$$

Висота шліца паза статора

$$h_{h1} = 1 \text{ мм}.$$

Менша ширина паза статора

$$b_2 = \frac{t_1 + \frac{2\pi \cdot h_{h1}}{z_1} - b_{z1}}{1 - \frac{\pi}{z_1}} = \frac{8.66 + \left(\frac{2 \cdot \pi}{36} - 2.96\right)}{1 - \frac{\pi}{36}} = 6.44 \text{ мм}.$$

Перший розрахунковий коефіцієнт висоти паза статора

$$A_z = \frac{2\pi}{z_1} = \frac{2 \cdot \pi}{36} = 0.175.$$

Складова другого розрахункового коефіцієнта висоти паза статора

$$B_{zc} = \frac{2\pi}{z_1} \cdot \left(h_{h1} + \frac{b_2}{2}\right) = \frac{2 \cdot \pi}{36} \cdot \left(1 + \frac{6.44}{2}\right) = 0.737 \text{ мм}.$$

Другий розрахунковий коефіцієнт висоти паза статора

$$B_z = t_1 - b_{z1} + b_2 - B_{zc} = 8.66 - 2.96 + 6.44 - 0.737 = 11.4 \text{ мм}.$$

Попереднє значення коефіцієнту заповнення пазового вікна статора

$$k'_{zo1} = 0.53.$$

Складова третього розрахункового коефіцієнту висоти паза статора

$$C_{zc} = \left(h_{h1} + \frac{b_2}{2} \right) \cdot (t_1 - b_{z1} + b_2) = \left(1 + \frac{6.44}{2} \right) \cdot (8.66 - 2.96 + 6.44) = 51.2 \text{ мм}^2.$$

Третій розрахунковий коефіцієнт висоти паза статора

$$C_z = C_{zc} + \frac{2S_{o1}}{k'_{zo1}} - \frac{\pi \cdot b_2^2}{4} = 51.2 + \frac{2 \cdot 20.7}{0.53} - \frac{\pi \cdot 6.44^2}{4} = 96.7 \text{ мм}^2.$$

Висота зубця статора

$$h_{z1} = \frac{-B_z + \sqrt{B_z^2 + 4A_z \cdot C_z}}{2A_z} = \frac{-11.4 + \sqrt{11.4^2 + 4 \cdot 0.175 \cdot 96.7}}{2 \cdot 0.175} = 7.6 \text{ мм}.$$

Зовнішній діаметр статора

$$D_{H1} = D_1 + 2(h_{c1} + h_{z1}) = 99.2 + 2 \cdot (19.4 + 7.6) = 153 \text{ мм}.$$

Більша ширина паза статора

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2h_{z1})}{z_1} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot (99.2 + 2 \cdot 7.6)}{36} - 2.96 = 7.02 \text{ мм}.$$

Пазові сторони однієї котушкової групи, розташовані в сусідніх пазах, займають q_1 пазів і утворюють фазну зону, обумовлену кутом

$$\alpha = \frac{2p \cdot \pi \cdot q_1}{z_1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 6}{36} = 1.05.$$

Відносний крок обмотки

$$\beta = \frac{2p \cdot y_1}{z_1} = \frac{2 \cdot 15}{36} = 0.833.$$

Коефіцієнт укорочення

$$k_{y1} = \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(0.833 \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0.97.$$

Коефіцієнт розподілу обмотки статора

$$k_{p1} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2q_1}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{1.05}{2}\right)}{6 \cdot \sin\left(\frac{1.05}{2 \cdot 6}\right)} = 0.96.$$

Обмотковий коефіцієнт обмотки статора

$$k_{ob1} = k_{p1} \cdot k_{y1} = 0.96 \cdot 0.97 = 0.931 \quad .$$

Висота

$$h_{1tr} = h_{z1} - h_{h1} - \frac{b_2}{2} = 7.6 - 1 - \frac{6.44}{2} = 3.38 \quad \text{мм} .$$

Площина поперечного перетину трапецеїдального напівзакритого паза, яка зайнята обмоткою і пазовою ізоляцією

$$S_{po} = h_{1tr} \cdot \frac{b_1 + b_2}{2} + \frac{\pi \cdot b_2^2}{8} = 3.38 \cdot \frac{7.02 + 6.44}{2} + \frac{\pi \cdot 6.44^2}{8} = 39 \quad \text{мм}^2 .$$

Довжина стінки паза статора

$$h_p = \sqrt{\frac{(b_1 - b_2)^2}{4} + h_{1tr}^2} = \sqrt{\frac{(7.02 - 6.44)^2}{4} + 3.38^2} = 3.39 \quad \text{мм} .$$

Товщини пазової ізоляції

$$\Delta_{i1} = 0.25 \quad \text{мм} .$$

Товщини клинової ізоляції

$$\Delta_{i2} = 0.35 \quad \text{мм} .$$

Площина пазової ізоляції

$$S_{pik} = \Delta_{i1} \cdot \left(2h_p + b_1 + b_2 \cdot \frac{\pi}{2} \right) = 0.25 \cdot \left(2 \cdot 3.39 + 7.02 + 6.44 \cdot \frac{\pi}{2} \right) = 5.98 \quad \text{мм}^2 .$$

Площина клину

$$S_{pikc} = \Delta_{i2} \cdot \frac{b_2 \cdot \pi}{2} = 0.35 \cdot \frac{6.44 \cdot \pi}{2} = 3.54 \quad \text{мм}^2 .$$

Площина поперечного перетину трапецеїдального напівзакритого паза, яка зайнята обмоткою

$$S'_{po} = S_{po} - S_{pik} - S_{pikc} = 39 - 5.98 - 3.54 = 29.5 \quad \text{мм}^2 .$$

Ширина шліцу паза статора

$$b_{h1} = 2\Delta_{i1} + d_{iz} + 2 = 2 \cdot 0.25 + 1.2 + 2 = 3.7 \quad \text{мм} .$$

Коефіцієнт заповнення паза

$$k_z = \frac{S_{o1}}{S'_{po}} = \frac{20.7}{29.5} = 0.7 \quad .$$

Коефіцієнт заповнення пазового вікна пазовою та клиновою ізоляцією

$$k_{i1} = \frac{S_{o1}}{S_{pik} + S_{pikc}} = \frac{20.7}{5.98 + 3.54} = 2.17 \quad .$$

Уточнене значення коефіцієнту заповнення пазового вікна

$$k_{zo1} = \frac{k_z \cdot k_{i1}}{k_z + k_{i1}} = \frac{0.7 \cdot 2.17}{0.7 + 2.17} = 0.529 \quad .$$

Щільність струму в обмотці статора

$$\Delta_1 = \frac{I_1}{a_1 \cdot N_{e1} \cdot q_{e1}} = \frac{6.29}{1 \cdot 0.985} = 6.39 \quad \frac{A}{\text{мм}^2} \quad .$$

Уточнене лінійне навантаження статора

$$A_1 = \frac{10 u_1 \cdot z_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1} = \frac{10 \cdot 21 \cdot 36 \cdot 6.29}{\pi \cdot 99.2} = 153 \quad \frac{A}{\text{см}} \quad .$$

Магнітний потік

$$\Phi = B'_\delta \cdot D_1 \cdot l_\delta \cdot \frac{10^{-6}}{p} = 0.614 \cdot 99.2 \cdot 133 \cdot \frac{10^{-6}}{1} = 8.1 \times 10^{-3} \quad \text{Вб} \quad .$$

Уточнені значення індукції у повітряному зазорі

$$B_\delta = \frac{\Phi \cdot 10^6}{\alpha_i \cdot \tau \cdot l_\delta} = \frac{8.1 \times 10^{-3} \cdot 10^6}{0.637 \cdot 156 \cdot 133} = 0.613 \quad \text{Вб} \quad .$$

Коефіцієнт теплового навантаження

$$k_t = 1700 \cdot k_{pt} = 1.7 \times 10^3 \cdot 1 = 1.7 \times 10^3 \quad A^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2) \quad .$$

Коефіцієнт

$$a_t = 4.4 \cdot 10^{-4} \quad \text{мм}^{-1} \quad .$$

Максимальне припустиме теплове навантаження

$$\Delta A_{\max} = k_t \cdot (1 + a_t \cdot D_{H1\max}) = 1.7 \times 10^3 \cdot (1 + 4.4 \cdot 10^{-4} \cdot 157) = 1.817 \times 10^3 \quad A^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2) \quad .$$

Нормальний тепловий режим роботи АД забезпечується:

$$\Delta_1 \cdot A_1 = 6.39 \cdot 153 = 977.67 \quad A^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2) < \Delta A_{\max} = 1.817 \times 10^3 \quad A^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2) \quad .$$

Середній зубцевий розподіл статора

$$t_{1cp} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{z1})}{z_1} = \frac{\pi \cdot (99.2 + 7.6)}{36} = 9.32 \quad \text{мм} \quad .$$

Ширина секції обмотки статора

$$b_{c1} = y_1 \cdot t_{1cp} = 15 \cdot 9.32 = 140 \quad \text{мм} \quad .$$

Довжина лобової частини обмотки статора

$$l_{л1} = (1.16 + 0.14 \cdot p) \cdot b_{c1} + 15 = (1.16 + 0.14) \cdot 140 + 15 = 197 \quad \text{мм} \quad .$$

Середня довжина витка обмотки статора

$$l_{cp1} = 2 \cdot (l_\delta + l_{л1}) = 2 \cdot (133 + 197) = 660 \quad \text{мм} \quad .$$

Довжина вилета лобової частини обмотки статора

$$l_{B1} = \frac{l_{л1} - b_{с1}}{2} + \frac{b_1 + b_2}{2} = \frac{197 - 140}{2} + \frac{7.02 + 6.44}{2} = 35.2 \quad \text{мм}.$$

Площина паза статора

$$S_{p1} = S_{po} + b_{h1} \cdot h_{h1} = 39 + 3.7 = 42.7 \quad \text{мм}^2.$$

Зовнішній діаметр корпусу АД

$$D_K = D_{H1} + 2\Delta_K = 153 + 2 \cdot 6.5 = 166 \quad \text{мм}.$$

Активна частина ротора

Обираються овальні напівзакриті пази.

Зубцеве ділення ротора

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{z_2} = \frac{\pi \cdot 98.4}{44} = 7.03 \quad \text{мм}.$$

Ширина зубця ротора

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{B_{z2} \cdot k_c} = \frac{0.613 \cdot 7.03}{1.83 \cdot 0.97} = 2.43 \quad \text{мм}.$$

Висота спинки ротора

$$h_{с2} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot B_\delta}{B_{с2} \cdot k_c} = \frac{0.5 \cdot 0.637 \cdot 156 \cdot 0.613}{1.42 \cdot 0.97} = 22.1 \quad \text{мм}.$$

Висота паза ротора

$$h_{z2} = \frac{D_2 - D_{2B}}{2} - h_{с2} = \frac{98.4 - 37}{2} - 22.1 = 8.6 \quad \text{мм}.$$

Висота шліцу паза ротора

$$h_{h2} = 0.5 \quad \text{мм}.$$

Ширина шліцу паза ротора

$$b_{h2} = 1.1 \quad \text{мм}.$$

Діаметр паза у верхній частині

$$d'_{p2} = \frac{\pi(D_2 - 2 \cdot h_{h2}) - z_2 \cdot b_{z2}}{z_2 + \pi} = \frac{\pi \cdot (98.4 - 2 \cdot 0.5) - 44 \cdot 2.43}{44 + \pi} = 4.22 \quad \text{мм}.$$

Діаметр паза у нижній частині

$$d_{p2} = \frac{\pi(D_2 - 2 \cdot h_{z2}) - z_2 \cdot b_{z2}}{z_2 - \pi} = \frac{\pi \cdot (98.4 - 2 \cdot 8.6) - 44 \cdot 2.43}{44 - \pi} = 3.63 \quad \text{мм}.$$

Відстань між центрами окружностей овального паза

$$h_2 = h_{z2} - h_{h2} - \frac{(d_{p2} + d'_{p2})}{2} = 8.6 - 0.5 - \frac{3.63 + 4.22}{2} = 4.18 \quad \text{мм} .$$

Висота стрижня

$$h_{ст} = h_{z2} - h_{h2} = 8.6 - 0.5 = 8.1 \quad \text{мм} .$$

Складові площини паза ротора:

- центральної частини

$$S_{p2t} = h_2 \cdot \frac{d_{p2} + d'_{p2}}{2} = 4.18 \cdot \frac{3.63 + 4.22}{2} = 16.4 \quad \text{мм}^2 .$$

- напівкругових частин

$$S_{p2r} = \frac{\pi \cdot (d_{p2}^2 + d'_{p2}^2)}{8} = \frac{\pi \cdot (3.63^2 + 4.22^2)}{8} = 12.2 \quad \text{мм}^2 .$$

- шліцу

$$S_{p2h} = h_{h2} \cdot b_{h2} = 0.5 \cdot 1.1 = 0.55 \quad \text{мм}^2 .$$

Площина паза ротора

$$S_{p2} = S_{p2t} + S_{p2r} + S_{p2h} = 16.4 + 12.2 + 0.55 = 29.1 \quad \text{мм}^2 .$$

Уточнене значення коефіцієнту заповнення пазового простору ротору

$$k_{22} = \frac{S_{p2}}{h_{z2} \cdot \left(t_2 - b_{z2} - \frac{\pi \cdot h_{z2}}{z_2} \right)} = \frac{29.1}{8.6 \cdot \left(7.03 - 2.43 - \frac{\pi \cdot 8.6}{44} \right)} = 0.849 .$$

Перетин короткозамкнутого кільця обмотки ротора

$$q_{кл} = 0.2 \cdot z_2 \cdot \frac{S_{p2}}{p} = 0.2 \cdot 44 \cdot \frac{29.1}{1} = 256 \quad \text{мм}^2 .$$

Висота короткозамкнутого кільця обмотки ротора

$$h_k = 1.2 \cdot h_{z2} = 1.2 \cdot 8.6 = 10.3 \quad \text{мм} .$$

Довжина короткозамкнутого кільця обмотки ротора

$$l_k = \frac{q_{кл}}{h_k} = \frac{256}{10.3} = 24.9 \quad \text{мм} .$$

Середній діаметр кільця обмотки ротора

$$D_{2c} = D_2 - h_k = 98.4 - 10.3 = 88.1 \quad \text{мм} .$$

Кількість вентиляційних лопаток

$$N_l = 8 .$$

Опори обмотки статора

Питомий опір міді

$$\rho_M = 24.4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{мм}.$$

Активний опір обмотки статора

$$R_1 = \rho_M \cdot \frac{w_1 \cdot l_{cp1}}{N_{e1} \cdot q_{e1} \cdot a_1} = 24.4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{126 \cdot 660}{0.985} = 2.06 \text{ Ом}.$$

Активний опір фази у відносних одиницях

$$R_{1x} = \frac{R_1 \cdot I_1}{U_1} = \frac{2.06 \cdot 6.29}{220} = 0.059.$$

Коефіцієнти, що враховують укорочення кроку обмотки

$$k_\beta = 0.91;$$

$$k'_\beta = 0.88.$$

Висота

$$h_1 = h_{z1} - h_{h1} - 0.5 \cdot b_2 = 7.6 - 1 - 0.5 \cdot 6.44 = 3.38 \text{ мм}.$$

Складова коефіцієнта магнітної провідності пазового розсіювання

$$\lambda_{п1ск} = k'_\beta \left(\frac{h_{h1}}{b_{h1}} + 1.5 \cdot \frac{b_2}{b_2 + 2 \cdot b_{h1}} \right) = 0.88 \cdot \left(\frac{1}{3.7} + 1.5 \cdot \frac{6.44}{6.44 + 2 \cdot 3.7} \right) = 0.852.$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1}{3b_2} \cdot k_\beta + \lambda_{п1ск} = \frac{3.38}{3 \cdot 6.44} \cdot 0.91 + 0.852 = 1.01.$$

Коефіцієнт зубчасті статора

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{h1}}{t_1 - b_{h1} + 5 \cdot \frac{t_1}{b_{h1}} \cdot \delta} = 1 + \frac{3.7}{8.66 - 3.7 + 5 \cdot \frac{8.66}{3.7} \cdot 0.4} = 1.38.$$

Коефіцієнт зубчасті ротора

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{h2}}{t_2 - b_{h2} + 5 \cdot \frac{t_2}{b_{h2}} \cdot \delta} = 1 + \frac{1.1}{7.03 - 1.1 + 5 \cdot \frac{7.03}{1.1} \cdot 0.4} = 1.06.$$

Загальний коефіцієнт зубчасті

$$K_\delta = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} = 1.38 \cdot 1.06 = 1.46.$$

Коефіцієнт, що враховує реакцію демпфірування струмів, наведених в обмотці ротора вищими гармоніками поля статора

$$k_{pt1} = 0.58 \quad .$$

Коефіцієнт, що враховує вплив відкритих пазів статора на провідність диференціального розсіювання

$$k_{h1} = 1 - \frac{0.033 \cdot b_{h1}^2}{t_1 \cdot \delta} = 1 - \frac{0.033 \cdot 3.7^2}{8.66 \cdot 0.4} = 0.87 \quad .$$

Коефіцієнт диференціального розсіювання

$$k_{d1} = 8.9 \times 10^{-3} \quad .$$

Складові коефіцієнту магнітної провідності диференціального розсіювання

$$\Lambda_{d1} = \frac{0.9 k_{pt1} \cdot k_{h1} \cdot k_{d1}}{K_{\delta}} = \frac{0.9 \cdot 0.58 \cdot 0.87 \cdot 8.9 \times 10^{-3}}{1.46} = 2.77 \times 10^{-3} \quad .$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання

$$\lambda_{d1} = \frac{t_1 \cdot \Lambda_{d1} \cdot (q_1 \cdot k_{ob1})^2}{\delta} = \frac{8.66 \cdot 2.77 \times 10^{-3} \cdot (6 \cdot 0.931)^2}{0.4} = 1.87 \quad .$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання лобових частин обмотки статора

$$\lambda_{л1} = 0.34 \cdot \frac{q_1}{l_{\delta}} \cdot (l_{л1} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0.34 \cdot \frac{6}{133} \cdot (197 - 0.64 \cdot 0.833 \cdot 156) = 1.75 \quad .$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання обмотки статора

$$\lambda_1 = \lambda_{л1} + \lambda_{л1} + \lambda_{d1} = 1.01 + 1.75 + 1.87 = 4.63 \quad .$$

Індуктивний опір обмотки статора

$$X_1 = \frac{1.58 \cdot f_1 \cdot l_{\delta} \cdot w_1^2 \cdot \lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} = \frac{1.58 \cdot 50 \cdot 133 \cdot 126^2 \cdot 4.63}{6 \cdot 10^8} = 1.29 \quad \text{Ом} \quad .$$

Індуктивний опір розсіювання однієї фази обмотки статора у відносних одиницях

$$X_{1x} = \frac{X_1 \cdot I_1}{U_1} = \frac{1.29 \cdot 6.29}{220} = 0.037 \quad .$$

Опори обмотки ротора

Питомий опір алюмінію

$$\rho_a = 48.8 \cdot 10^{-6} \quad \text{Ом} \cdot \text{мм} \quad .$$

Активний опір стріжня обмотки ротора

$$R_{2c} = \rho_a \cdot \frac{l_{\delta}}{S_{p2}} = 48.8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{133}{29.1} = 2.23 \times 10^{-4} \quad \text{Ом} \quad .$$

Площина стрижня ротора

$$q_c = S_{p2} = 29.1 \text{ мм}^2.$$

Коефіцієнт приведення опорів к.з. кільця до обмотки ротора

$$k_{pr} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{p}{z_2} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{44} = 0.143.$$

Активний опір к.з. кільця обмотки ротора

$$R_k = \frac{D_{2c} \cdot \rho_a \cdot 2 \cdot \pi}{z_2 \cdot q_{кл} \cdot k_{pr}^2} = \frac{88.1 \cdot 48.8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi}{44 \cdot 256 \cdot 0.143^2} = 1.17 \times 10^{-4} \text{ Ом}.$$

Коефіцієнт зведення опорів обмотки ротора до статора

$$k_{21} = \frac{4 \cdot m_1}{z_2} \cdot (w_1 \cdot k_{ob1})^2 = \frac{4 \cdot 3}{44} \cdot (126 \cdot 0.931)^2 = 3.753 \times 10^3.$$

Зведений активний опір обмотки ротора

$$R_{21} = k_{21} \cdot (R_{2c} + R_k) = 3.753 \times 10^3 \cdot (2.23 \times 10^{-4} + 1.17 \times 10^{-4}) = 1.28 \text{ Ом}.$$

Активний опір обмотки ротора, зведений до обмотки статора у відносних одиницях

$$R_{21x} = \frac{R_{21} \cdot I_1}{U_1} = \frac{1.28 \cdot 6.29}{220} = 0.037 \text{ Ом}.$$

Складові коефіцієнту магнітної провідності пазового розсіювання ротора

$$C_{\lambda 1} = \frac{h_2 + 0.4 d_{p2}}{3 d'_{p2}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot d'_{p2}^2}{8 S_{p2}} \right)^2 = \frac{4.18 + 0.4 \cdot 3.63}{3 \cdot 4.22} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 4.22^2}{8 \cdot 29.1} \right)^2 = 0.257.$$

$$C_{\lambda} = C_{\lambda 1} + 0.66 - \frac{b_{h2}}{2 \cdot d_{p2}} = 0.257 + 0.66 - \frac{1.1}{2 \cdot 3.63} = 0.765.$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання ротора

$$\lambda_{п2} = C_{\lambda} + \frac{h_{h2}}{b_{h2}} = 0.765 + \frac{0.5}{1.1} = 1.22.$$

Коефіцієнт диференціального розсіювання ротора

$$k_{д2} = 1.825 \times 10^{-3}.$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання

$$\lambda_{д2} = \frac{0.9 t_2 \cdot k_{д2}}{\delta \cdot K_{\delta}} \cdot \left(\frac{z_2}{6p} \right)^2 = \frac{0.9 \cdot 7.03 \cdot 1.825 \times 10^{-3}}{0.4 \cdot 1.46} \cdot \left(\frac{44}{6} \right)^2 = 1.06.$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання короткозамкнених кілець клітки

ротора ротора

$$\lambda_{л2} = \frac{2.3 \cdot D_{2c}}{z_2 \cdot l_\delta \cdot k_{pr}^2} \cdot \log \left(\frac{2.35 \cdot D_{2c}}{h_k + l_k} \right) = \frac{2.3 \cdot 88.1}{44 \cdot 133 \cdot 0.143^2} \cdot \log \left(\frac{2.35 \cdot 88.1}{10.3 + 24.9} \right) = 1.3 \quad .$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання обмотки ротора

$$\lambda_2 = \lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2} = 1.22 + 1.3 + 1.06 = 3.58 \quad .$$

Зведений індуктивний опір обмотки ротора

$$X_{21} = 7.9 \cdot f_1 \cdot l_\delta \cdot k_{21} \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} = 7.9 \cdot 50 \cdot 133 \cdot 3.753 \times 10^3 \cdot 3.58 \cdot 10^{-9} = 0.706 \text{ Ом} \quad .$$

Індуктивний опір обмотки ротора у відносних одиницях

$$X_{21x} = \frac{X_{21} \cdot I_1}{U_1} = \frac{0.706 \cdot 6.29}{220} = 0.02 \quad .$$

7. Розрахунок магнітного кола

МРС повітряного зазору

$$F_\delta = 0.8 \cdot \delta \cdot K_\delta \cdot B_\delta \cdot 10^3 = 0.8 \cdot 0.4 \cdot 1.46 \cdot 0.613 \cdot 10^3 = 286 \text{ А} \quad .$$

Магнітна індукція в зубцях статора

$$B_{z1} = t_1 \cdot \frac{B_\delta}{k_c \cdot b_{z1}} = 8.66 \cdot \frac{0.613}{0.97 \cdot 2.96} = 1.85 \text{ Тл} \quad .$$

Зубцевий розподіл статора на висоті 1/3 зубця

$$t_{13} = \left(D_1 + \frac{2}{3} \cdot h_{z1} \right) \cdot \frac{\pi}{z_1} = \left(99.2 + \frac{2}{3} \cdot 7.6 \right) \cdot \frac{\pi}{36} = 9.1 \text{ мм} \quad .$$

Коефіцієнт

$$k_{p1} = \frac{t_{13}}{k_c \cdot b_{z1}} = \frac{9.1}{0.97 \cdot 2.96} = 3.17 \quad .$$

Напруженість у зубцях статора

$$H_{z1} = 25 \frac{\text{А}}{\text{см}} \quad .$$

МРС зубців статора

$$F_{z1} = 0.1 \cdot H_{z1} \cdot h_{z1} = 0.1 \cdot 25 \cdot 7.6 = 19 \text{ А} \quad .$$

Магнітна індукція в зубці ротора

$$B_{z2} = t_2 \cdot \frac{B_\delta}{k_c \cdot b_{z2}} = 7.03 \cdot \frac{0.613}{0.97 \cdot 2.43} = 1.83 \text{ Тл} \quad .$$

Зубцевий розподіл ротора на висоті 1/3 зубця

$$t_{23} = \left(D_2 - \frac{4}{3} \cdot h_{z2} \right) \cdot \frac{\pi}{z_2} = \left(98.4 - \frac{4}{3} \cdot 8.6 \right) \cdot \frac{\pi}{44} = 6.21 \quad \text{мм.}$$

Коефіцієнт

$$k_{p2} = \frac{t_{23}}{k_c \cdot b_{z2}} = \frac{6.21}{0.97 \cdot 2.43} = 2.63 \quad .$$

Напруженість у зубцях ротора

$$H_{z2} = 24 \quad \frac{\text{А}}{\text{см}} \quad .$$

МРС зубців ротора

$$F_{z2} = 0.1 \cdot H_{z2} \cdot (h_{z2} - 0.1 d_{p2}) = 0.1 \cdot 24 \cdot (8.6 - 0.1 \cdot 3.63) = 19.8 \quad \text{А.}$$

Магнітна індукція в спинці статора

$$B_{c1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot B_\delta}{h_{c1} \cdot k_c} = \frac{0.5 \cdot 0.637 \cdot 156 \cdot 0.613}{19.4 \cdot 0.97} = 1.62 \quad \text{Тл.}$$

Напруженість у спинці статора

$$H_{c1} = 20.046 \quad \frac{\text{А}}{\text{см}} \quad .$$

Середня довжина силової лінії у спинці статора

$$L_{c1} = \frac{\pi \cdot (D_{H1} - h_{c1})}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (153 - 19.4)}{4} = 105 \quad \text{мм} \quad .$$

МРС у спинці статора

$$F_{c1} = 0.1 \cdot H_{c1} \cdot L_{c1} = 0.1 \cdot 20.046 \cdot 105 = 210 \quad \text{А.}$$

Напруженість у спинці ротора

$$H_{c2} = 3.468 \quad \frac{\text{А}}{\text{см}} \quad .$$

Середня довжина силової лінії у спинці ротора

$$L_{c2} = \frac{\pi \cdot (D_{2B} + h_{c2})}{4 \cdot p} + h_{c2} = \frac{\pi \cdot (37 + 22.1)}{4} + 22.1 = 68.5 \quad \text{мм} \quad .$$

МРС у спинці ротора

$$F_{c2} = 0.1 \cdot H_{c2} \cdot L_{c2} = 0.1 \cdot 3.468 \cdot 68.5 = 23.8 \quad \text{А.}$$

Загальна МРС

$$F_\Sigma = 2F_\delta + F_{c1} + 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_{c2} = 2 \cdot 286 + 210 + 2 \cdot 19 + 2 \cdot 19.8 + 23.8 = 883 \quad \text{А.}$$

Коефіцієнт намагнічування

$$k_\mu = \frac{F_\Sigma}{2F_\delta} = \frac{883}{2 \cdot 286} = 1.54 \quad .$$

Струм намагнічування

$$I_{\mu} = \frac{F_{\Sigma} \cdot p}{0.9 m_1 \cdot w_1 \cdot k_{ob1}} = \frac{883}{0.9 \cdot 3 \cdot 126 \cdot 0.931} = 2.79 \text{ А.}$$

Відносний струм намагнічування

$$I_{\mu\%} = \frac{100 I_{\mu}}{I_1} = \frac{100 \cdot 2.79}{6.29} = 44.4 \text{ \% .}$$

Головний індуктивний опір

$$X_{\mu} = \frac{k_{e1} \cdot U_1}{I_{\mu}} = \frac{0.97 \cdot 220}{2.79} = 76.5 \text{ Ом .}$$

Кофіцієнт намагнічування

$$\sigma_{\mu} = \frac{X_1}{X_{\mu}} = \frac{1.29}{76.5} = 0.017 \text{ .}$$

Режим холостого ходу

Технологічний коефіцієнт, що враховує збільшення втрат через дефекти в сталі, що виникають при штампуванні листів, їх складанні і наступній обробці $K_{\text{мт}} = 1,7$.

Питомі магнітні втрати, тобто втрати в 1 кг сталі 2013 при частоті 50 Гц у магнітному полі з індукцією 1,0 Тл $P_{1,0/50} = 2,5 \text{ Вт/кг}$.

Об'єм спілки статора

$$V_{c1} = l_{\delta} \cdot \pi \cdot h_{c1} \cdot (D_{H1} - h_{c1}) = 133 \cdot \pi \cdot 19.4 \cdot (153 - 19.4) = 1.08 \times 10^6 \text{ мм}^3.$$

Маса спілки статора

$$m_{c1} = 7.8 \cdot k_c \cdot 10^{-6} \cdot V_{c1} = 7.8 \cdot 0.97 \cdot 10^{-6} \cdot 1.08 \times 10^6 = 8.17 \text{ кг .}$$

Об'єм спілки ротора

$$V_{c2} = l_{\delta} \cdot \pi \cdot h_{c2} \cdot (D_{2B} + h_{c2}) = 133 \cdot \pi \cdot 22.1 \cdot (37 + 22.1) = 5.457 \times 10^5 \text{ мм}^3.$$

Маса спілки ротора

$$m_{c2} = 7.8 \cdot k_c \cdot 10^{-6} \cdot V_{c2} = 7.8 \cdot 0.97 \cdot 10^{-6} \cdot 5.457 \times 10^5 = 4.13 \text{ кг .}$$

Загальна площа зубців статора

$$S_{z1} = h_{z1} \cdot \pi \cdot (D_1 + h_{z1}) - S_{p1} \cdot z_1 = 7.6 \cdot \pi \cdot (99.2 + 7.6) - 42.7 \cdot 36 = 1.012 \times 10^3 \text{ мм}^2.$$

Маса зубців статора

$$m_{z1} = 7.8 \cdot k_c \cdot 10^{-6} \cdot S_{z1} \cdot l_{\delta} = 7.8 \cdot 0.97 \cdot 10^{-6} \cdot 1.012 \times 10^3 \cdot 133 = 1.02 \text{ кг.}$$

Загальна площа зубців ротора

$$S_{z2} = h_{z2} \cdot \pi \cdot (D_2 - h_{z2}) - S_{p2} \cdot z_2 = 8.6 \cdot \pi \cdot (98.4 - 8.6) - 29.1 \cdot 44 = 1.145 \times 10^3 \text{ мм}^2.$$

Маса зубців ротора

$$m_{z2} = 7.8 \cdot k_c \cdot 10^{-6} \cdot S_{z2} \cdot l_\delta = 7.8 \cdot 0.97 \cdot 10^{-6} \cdot 1.145 \times 10^3 \cdot 133 = 1.15 \text{ кг}.$$

Втрати потужності у зубцях статора

$$P_{z1} = 1.7 \cdot 2.5 \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1} = 1.7 \cdot 2.5 \cdot 1.85^2 \cdot 1.02 = 14.8 \text{ Вт}.$$

Втрати потужності у спинці статора

$$P_{c1} = 1.7 \cdot 2.5 \cdot B_{c1}^2 \cdot m_{c1} = 1.7 \cdot 2.5 \cdot 1.62^2 \cdot 8.17 = 91.13 \text{ Вт}.$$

Втрати потужності у зубцях ротора

$$P_{z2} = 1.7 \cdot 2.5 \cdot B_{z2}^2 \cdot m_{z2} = 1.7 \cdot 2.5 \cdot 1.83^2 \cdot 1.15 = 16.4 \text{ Вт}.$$

Втрати потужності у спинці ротора

$$P_{c2} = 1.7 \cdot 2.5 \cdot B_{c2}^2 \cdot m_{c2} = 1.7 \cdot 2.5 \cdot 1.42^2 \cdot 4.13 = 35.39 \text{ Вт}.$$

Загальні втрати потужності у сталі

$$P_{ст} = P_{z1} + P_{c1} = 14.8 + 91.13 = 106 \text{ Вт}.$$

Загальні втрати потужності у сталі

$$P_{ст2} = P_{z2} + P_{c2} = 16.4 + 35.39 = 51.8 \text{ Вт}.$$

Активний опір гілки намагнічування

$$R_\mu = \frac{P_{ст}}{m_1 \cdot I_\mu^2} = \frac{106}{3 \cdot 2.79^2} = 4.54 \text{ Ом}.$$

Активний змінний опір гілки намагнічування

$$R_{\mu 2} = \frac{P_{ст2}}{m_1 \cdot I_\mu^2} = \frac{51.8}{3 \cdot 2.79^2} = 2.22 \text{ Ом}.$$

Момент інерції ротора

Момент інерції ротора

$$J = 0.6 \cdot D_2^4 \cdot l_\delta \cdot 10^{-12} = 0.6 \cdot 98.4^4 \cdot 133 \cdot 10^{-12} = 7.48 \times 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Заступні схеми

Коефіцієнт зведення Т-подібної заступної схеми до Г-подібної

$$c_1 = \left| 1 + \frac{Z_1}{Z_\mu} \right| = \left| 1 + \frac{2.06 + 1.29 \cdot i}{4.54 + 76.5 \cdot i} \right| = 1.02.$$

Розрахунок параметрів номінального режиму

Коефіцієнт

$$k_T = \begin{cases} (1 - D_{H1} 10^{-3}) \cdot 1.3 & \text{if } p = 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_T = (1 - 153 \cdot 10^{-3}) \cdot 1.3 = 1.1$$

Основні механічні втрати

$$P_{\text{mex}} = k_T \cdot \left(\frac{n_1}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{H1}}{100} \right)^4 = 1.1 \cdot \left(\frac{3 \times 10^3}{1 \times 10^3} \right)^2 \cdot \left(\frac{153}{100} \right)^4 = 54.3 \quad \text{Вт}$$

Додаткові втрати

$$P_{\text{dob}} = 5 \cdot \frac{P_{2H}}{\eta'} = 5 \cdot \frac{3}{0.848} = 17.7 \quad \text{Вт}$$

Повна механічна потужність

$$p'_2 = P_{2H} \cdot 1000 + P_{\text{mex}} + P_{\text{dob}} = 3 \cdot 10^3 + 54.3 + 17.7 = 3.071 \times 10^3 \quad \text{Вт}$$

Коефіцієнти рівняння ковзання:

$$A_{s1} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot R_{21}}{p'_2} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1.28}{3.071 \times 10^3} = 60.5 \quad \text{Ом}^2$$

$$A_{s2} = (X_1 + c_1 \cdot X_{21})^2 + R_1^2 = (1.29 + 1.02 \cdot 0.706)^2 + 2.06^2 = 8.28 \quad \text{Ом}^2$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 60.5 + 8.28 = 68.8 \quad \text{Ом}^2$$

$$B_s = 2c_1 \cdot R_1 \cdot R_{21} - A_{s1} = 2 \cdot 1.02 \cdot 2.06 \cdot 1.28 - 60.5 = -55.1 \quad \text{Ом}^2$$

$$C_s = (c_1 \cdot R_{21})^2 = (1.02 \cdot 1.28)^2 = 1.7 \quad \text{Ом}^2$$

$$D_{sn} = B_s^2 - 4A_s \cdot C_s = (-55.1)^2 - 4 \cdot 68.8 \cdot 1.7 = 2.568 \times 10^3 \quad \text{Ом}^4$$

Номінальне ковзання

$$s'_n = \frac{-B_s - \sqrt{D_{sn}}}{0.0186A_s} = \frac{-(-55.1) - \sqrt{2.568 \times 10^3}}{0.019 \cdot 68.8} = 3.46 \quad \%$$

Активний опір робочої гілки

$$R_{21s} = \frac{c_1^2 \cdot R_{21}}{s_n} + c_1 \cdot R_1 = \frac{1.02^2 \cdot 1.28}{0.033} + 1.02 \cdot 2.06 = 42.51 \quad \text{Ом}$$

Індуктивний опір робочої гілки

$$X_{21s} = c_1^2 \cdot X_{21} + c_1 \cdot X_1 = 1.02^2 \cdot 0.706 + 1.02 \cdot 1.29 = 2.05 \quad \text{Ом}$$

Еквівалентний опір гілки намагнічування

$$Z_{p\mu} = Z_1 + Z_{\mu} = 2.06 + 1.29 \cdot i + 4.54 + 76.5 \cdot i = 6.6 + 77.79i \quad \text{Ом.}$$

Еквівалентний опір заступної схеми

$$Z_{ek} = \left(\frac{1}{Z_{21s}} + \frac{1}{Z_{p\mu}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{42.51 + 2.05i} + \frac{1}{6.6 + 77.79 \cdot i} \right)^{-1} = 30.85 + 17.46i \quad \text{Ом .}$$

Номинальний зведений струм ротора

$$I_{21n} = c_1 \cdot \frac{U_1}{|Z_{21s}|} = 1.02 \cdot \frac{220}{|42.51 + 2.05i|} = 5.27 \quad \text{А .}$$

Номинальний струм статора

$$I_{1n} = \frac{U_1}{|Z_{ek}|} = \frac{220}{|30.85 + 17.46 \cdot i|} = 6.21 \quad \text{А .}$$

Струм в стрижні короткозамкненого ротора

$$I_{ст} = \frac{I_{21n} \cdot 2 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{об1}}{z_2} = \frac{5.27 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 126 \cdot 0.931}{44} = 84.3 \quad \text{А .}$$

Номинальний коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi_{1n} = \cos(\arg(Z_{ek})) = \cos(\arg(30.85 + 17.46 \cdot i)) = 0.87 \quad .$$

Номинальна потужність споживання

$$P_{1n} = 10^{-3} \cdot m_1 \cdot U_1 \cdot I_{1n} \cdot \cos \varphi_{1n} = 10^{-3} \cdot 3 \cdot 220 \cdot 6.21 \cdot 0.87 = 3.57 \quad \text{кВт.}$$

Втрати потужності:

- у обмотці статора

$$P_{e1} = m_1 \cdot I_{1n}^2 \cdot R_1 = 3 \cdot 6.21^2 \cdot 2.06 = 238 \quad \text{Вт .}$$

- у обмотці ротора

$$P_{e2} = m_1 \cdot I_{21n}^2 \cdot R_{21} = 3 \cdot 5.27^2 \cdot 1.28 = 107 \quad \text{Вт .}$$

- загальні електричні

$$P_{ze} = P_{e1} + P_{e2} = 238 + 107 = 345 \quad \text{Вт .}$$

- загальні

$$P_s = (P_{ze} + P_{ст} + P_{мех} + P_{доб}) \cdot 10^{-3} = (345 + 106 + 54.3 + 17.7) \cdot 10^{-3} = 0.523 \quad \text{кВт.}$$

Корисна потужність

$$P_2 = P_{1n} - P_s = 3.57 - 0.523 = 3 \quad \text{кВт.}$$

ККД

$$\eta = 1 - \frac{P_s}{P_{1n}} = 1 - \frac{0.523}{3.57} = 0.854 \quad .$$

Номинальна частота обертання ротора

$$n_{2n} = n_1 \cdot (1 - s_n) = 3 \times 10^3 \cdot (1 - 0.033) = 2.901 \times 10^3 \quad \frac{\text{об}}{\text{хв}}.$$

Коефіцієнт номінального електромагнітного моменту

$$k_{Mn} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot p \cdot c_1^2 \cdot R_{21}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1.02^2 \cdot 1.28}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 615 \quad \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{Ом}^2.$$

Номинальний електромагнітний момент

$$M_n = \frac{k_{Mn}}{s_n \cdot (|Z_{21s}|)^2} = \frac{615}{0.033 \cdot (|42.51 + 2.05i|)^2} = 10.3 \quad \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Розрахунок робочих характеристик АД

Для розрахунку робочих характеристик АД задається ряд відносних значень корисної потужності $P_{2*} = P_2 / P_{2n}$ від 0 до 1,25. Для кожного із цих значень розраховуються необхідні параметри і заносяться у таблицю. Потім будуються робочі характеристики АД у відносних одиницях (рис. Б.1).

Додаткові втрати потужності

$$P_{\text{dob}}(P_{2x}) = 0.005 \cdot \frac{P_2(P_{2x})}{\eta}.$$

Потужність на валу

$$p'_2(P_{2x}) = P_2(P_{2x}) + P_{\text{mex}} + P_{\text{dob}}(P_{2x}).$$

Розрахункові коефіцієнти

$$A_s(P_{2x}) = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot R_{21}}{p'_2(P_{2x})} + R_1^2 + (X_1 + c_1 \cdot X_{21})^2.$$

$$B_s(P_{2x}) = 2c_1 \cdot R_1 \cdot R_{21} - \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot R_{21}}{p'_2(P_{2x})}.$$

Ковзання

$$s(P_{2x}) = \frac{-B_s(P_{2x}) - \sqrt{B_s(P_{2x})^2 - 4A_s(P_{2x}) \cdot C_s}}{1.86 A_s(P_{2x})}.$$

Повний опір робочої гілки

$$Z_{21s}(P_{2x}) = \frac{c_1^2 \cdot R_{21}}{s(P_{2x})} + c_1 \cdot R_1 + i \cdot (c_1^2 \cdot X_{21} + c_1 \cdot X_1) .$$

Еквівалентний опір

$$Z_{ek}(P_{2x}) = \left(\frac{1}{Z_{21s}(P_{2x})} + \frac{1}{Z_1 + Z_\mu} \right)^{-1} .$$

Струм стагора

$$I_1(P_{2x}) = \frac{U_1}{|Z_{ek}(P_{2x})|} .$$

Коефіцієнт потужності

$$\cos\phi_1(P_{2x}) = \cos(\arg(Z_{ek}(P_{2x}))) .$$

Потужність споживання

$$P_1(P_{2x}) = 10^{-3} \cdot m_1 \cdot U_1 \cdot I_1(P_{2x}) \cdot \cos\phi_1(P_{2x}) .$$

ККД

$$\eta(P_{2x}) = \frac{P_2(P_{2x})}{P_1(P_{2x}) \cdot 1000} .$$

Швидкість обертання ротора

$$n_2(P_{2x}) = (1 - s(P_{2x})) .$$

Електромагнітний момент

$$M(P_{2x}) = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot p \cdot R_{21}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s(P_{2x}) \cdot \left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R_{21}}{s(P_{2x})} \right)^2 + (X_1 + c_1 \cdot X_{21})^2 \right] \cdot M_n} .$$

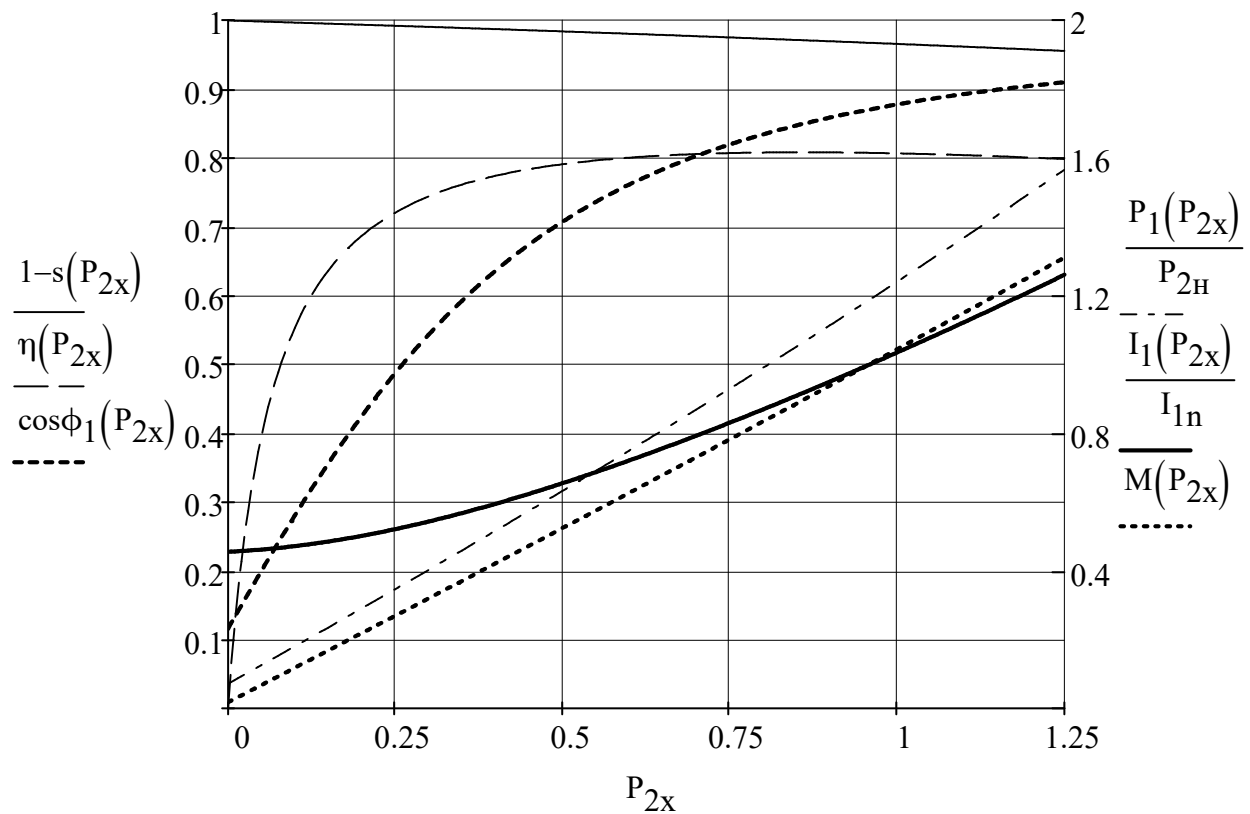


Рис.Б.1. Робочі характеристики

Електромеханічні характеристики

Задаючись рядом значень ковзання s від 0 до 1, виконується розрахунок у наступному порядку:

- електромагнітний момент

$$M(s) = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot p \cdot R_{21}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s \cdot \left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R_{21}}{s} \right)^2 + (X_1 + c_1 \cdot X_{21})^2 \right]} \cdot M_n$$

- повний опір робочої гілки заступної Г-подібної схеми

$$Z_{21s}(s) = \frac{c_1^2 \cdot R_{21}}{s} + c_1 \cdot R_1 + i \cdot (c_1^2 \cdot X_{21} + c_1 \cdot X_1)$$

- еквівалентний опір заступної Г-подібної схеми

$$Z_{ek}(s) = \left(\frac{1}{Z_{21s}(s)} + \frac{1}{Z_1 + Z_\mu} \right)^{-1}$$

- струм статора

$$I_{1s}(s) = \frac{U_1}{I_{1n} \cdot |Z_{ek}(s)|} \quad .$$

Наділі будуються залежності струму статора і електромагнітного моменту від ковзання (рис. Б.2).

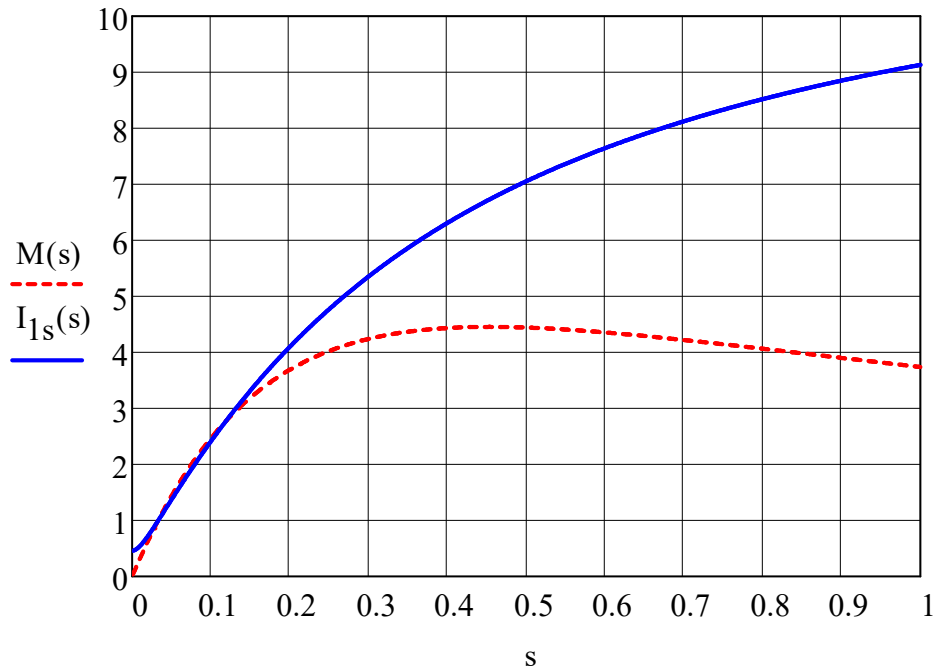


Рис.Б.2. Електромеханічні характеристики

Вихідні дані

$$P_{2H} := 0.18 \text{ кВт} .$$

$$R_1 := 78.2 \text{ Ом} .$$

$$X_1 := 19.1 \text{ Ом} .$$

$$f_1 := 50 \text{ Гц} .$$

$$R_{21} := 33.5 \text{ Ом} .$$

$$X_{21} := 16.9 \text{ Ом} .$$

$$U_1 := 220 \text{ В} .$$

$$R_m := 46.4 \text{ Ом} .$$

$$X_m := 736 \text{ Ом} .$$

$$p := 1 .$$

$$m_1 := 3 .$$

$$R_{m2} := 24.9 \text{ Ом} .$$

$$j_d := 2.92 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 .$$

$$I_{1n} := 0.523 \text{ А} .$$

$$s_H := 0.072$$

$$M_H := 0.679 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Розрахунок базових величин

$$z_b := \frac{U_1}{I_{1n}} = 420.65$$

$$\omega_b := 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_1}{p} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{50}{1} = 314.159$$

$$m_b := \frac{U_1 \cdot I_{1n}}{\omega_b} = \frac{220 \cdot 0.523}{314.159} = 0.36625$$

$$j_b := \frac{2 \cdot m_b}{\omega_b^2} = \frac{2 \cdot 0.36625}{314.159^2} = 0.00000742$$

$$r_s := \frac{R_1}{z_b} = 0.186$$

$$r_r := \frac{R_{21}}{z_b} = 0.08$$

$$x_s := \frac{X_1}{z_b} = 0.045$$

$$x_r := \frac{X_{21}}{z_b} = 0.04$$

$$r_m := \frac{R_m}{z_b} = 0.11$$

$$r_{m2} := \frac{R_{m2}}{z_b} = 0.059$$

$$x_m := \frac{X_m}{z_b} = 1.75$$

$$j := \frac{2 \cdot j_d}{j_b} = 78.706$$

Параметри:

$$c_r := \frac{x_r}{x_m} + 1 = 1.02$$

$$c_s := \frac{x_s}{x_m} + 1 = 1.03$$

$$a := x_m \cdot (c_r \cdot c_s - 1) = 0.0885$$

Розрахунок без урахування магнітних втрат потужності у роторі

$$\text{Крок} \quad t_{\max} := 1.4 \text{ с} \quad T_{\max} := t_{\max} \cdot f_1 = 70 \quad i_{\max} := 70000$$

$$h = \frac{T_{\max}}{i_{\max}} = 1 \times 10^{-3}$$

$$usu = 1 \quad usv := 0 \quad i = 0 .. i_{\max}$$

$$M_0 = 0 \quad s_0 = 1 \quad t_0 = 0$$

$$isu_0 := 0 \quad isv_0 := 0$$

$$iru_0 := 0 \quad irv_0 := 0$$

$$\psi_{su_0} = 0 \quad \psi_{ru_0} = 0$$

$$\psi_{sv_0} = 0 \quad \psi_{rv_0} = 0$$

$$\text{Матриця часу} \quad t_{i+1} = t_i + h$$

$$\begin{pmatrix} isu_{i+1} \\ isv_{i+1} \\ iru_{i+1} \\ irv_{i+1} \\ \psi_{su_{i+1}} \\ \psi_{sv_{i+1}} \\ \psi_{ru_{i+1}} \\ \psi_{rv_{i+1}} \\ M_{i+1} \\ s_{i+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \frac{cr \cdot \psi_{su_i} - \psi_{ru_i}}{a} \\ \frac{cr \cdot \psi_{sv_i} - \psi_{rv_i}}{a} \\ \frac{cs \cdot \psi_{ru_i} - \psi_{su_i}}{a} \\ \frac{cs \cdot \psi_{rv_i} - \psi_{sv_i}}{a} \\ \psi_{su_i} + h \cdot [usu - rs \cdot isu_i + \psi_{sv_i} - rm \cdot (isu_i + iru_i)] \\ \psi_{sv_i} + h \cdot [usv - rs \cdot isv_i - \psi_{su_i} - rm \cdot (isv_i + irv_i)] \\ \psi_{ru_i} + h \cdot [-rr \cdot iru_i + s_i \cdot \psi_{rv_i} - s_i \cdot rm \cdot (isu_i + iru_i)] \\ \psi_{rv_i} + h \cdot [-rr \cdot irv_i - s_i \cdot \psi_{ru_i} - s_i \cdot rm \cdot (isv_i + irv_i)] \\ m_1 \cdot (\psi_{su_i} \cdot isv_i - \psi_{sv_i} \cdot isu_i) \\ M_i - \frac{(1 - s_i)^2}{(1 - s_H)^2} \cdot \frac{M_H}{mb} \\ s_i - \frac{j}{j} \cdot h \end{bmatrix}$$

$$I_s = \sqrt{(isu)^2 + (isv)^2}$$

$$M := M \cdot \frac{mb}{M_H}$$

$$\omega := 1 - s \quad t := \frac{t}{f_1}$$

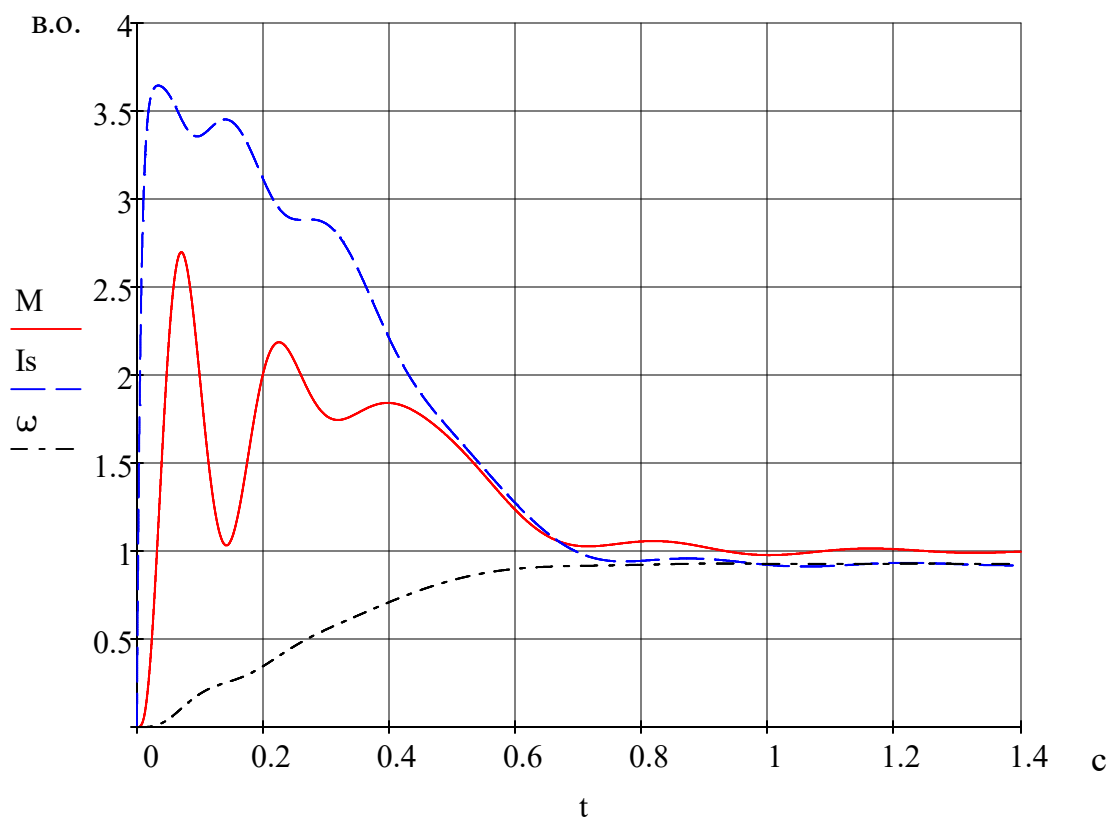


Рис. В.1. Часові динамічні характеристики АД без урахування магнітних втрат у роторі

Розрахунок з урахування магнітних втрат потужності у роторі

$$\psi_{su0} = 0$$

$$\psi_{ru0} = 0$$

$$\psi_{sv0} = 0$$

$$\psi_{rv0} = 0$$

$$\text{isu}_0 := 0$$

$$\text{isv}_0 := 0$$

$$\text{iru}_0 := 0$$

$$\text{irv}_0 := 0$$

$$\text{Mr}_0 = 0$$

$$\text{sr}_0 = 1$$

$$\begin{pmatrix} \text{isu}_{i+1} \\ \text{isv}_{i+1} \\ \text{iru}_{i+1} \\ \text{irv}_{i+1} \\ \psi_{\text{su}_{i+1}} \\ \psi_{\text{sv}_{i+1}} \\ \psi_{\text{ru}_{i+1}} \\ \psi_{\text{rv}_{i+1}} \\ \text{Mr}_{i+1} \\ \text{sr}_{i+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \frac{\text{cr} \cdot \psi_{\text{su}_i} - \psi_{\text{ru}_i}}{a} \\ \frac{\text{cr} \cdot \psi_{\text{sv}_i} - \psi_{\text{rv}_i}}{a} \\ \frac{\text{cs} \cdot \psi_{\text{ru}_i} - \psi_{\text{su}_i}}{a} \\ \frac{\text{cs} \cdot \psi_{\text{rv}_i} - \psi_{\text{sv}_i}}{a} \\ \psi_{\text{su}_i} + \text{h} \cdot \left[\text{usu} - \text{rs} \cdot \text{isu}_i + \psi_{\text{sv}_i} - \left[\text{rm} + \text{rm2} \cdot (\text{sr}_i)^{1.5} \right] \cdot (\text{isu}_i + \text{iru}_i) \right] \\ \psi_{\text{sv}_i} + \text{h} \cdot \left[\text{usv} - \text{rs} \cdot \text{isv}_i - \psi_{\text{su}_i} - \left[\text{rm} + \text{rm2} \cdot (\text{sr}_i)^{1.5} \right] \cdot (\text{isv}_i + \text{irv}_i) \right] \\ \psi_{\text{ru}_i} + \text{h} \cdot \left[-\text{rr} \cdot \text{iru}_i + \text{sr}_i \cdot \psi_{\text{rv}_i} - \text{sr}_i \cdot \left[\text{rm} + \text{rm2} \cdot (\text{sr}_i)^{1.5} \right] \cdot (\text{isu}_i + \text{iru}_i) \right] \\ \psi_{\text{rv}_i} + \text{h} \cdot \left[-\text{rr} \cdot \text{irv}_i - \text{sr}_i \cdot \psi_{\text{ru}_i} - \text{sr}_i \cdot \left[\text{rm} + \text{rm2} \cdot (\text{sr}_i)^{1.5} \right] \cdot (\text{isv}_i + \text{irv}_i) \right] \\ m_1 \cdot (\psi_{\text{su}_i} \cdot \text{isv}_i - \psi_{\text{sv}_i} \cdot \text{isu}_i) \\ \text{Mr}_i - \frac{(1 - \text{sr}_i)^2}{(1 - \text{s}_H)^2} \cdot \frac{\text{M}_H}{\text{mb}} \\ \text{sr}_i - \frac{\text{j}}{\text{j}} \cdot \text{h} \end{bmatrix}$$

$$\text{I's} = \sqrt{(\text{isu})^2 + (\text{isv})^2}$$

$$\omega' := 1 - \text{sr}$$

$$\text{M}' := \text{Mr} \cdot \frac{\text{mb}}{\text{M}_H}$$

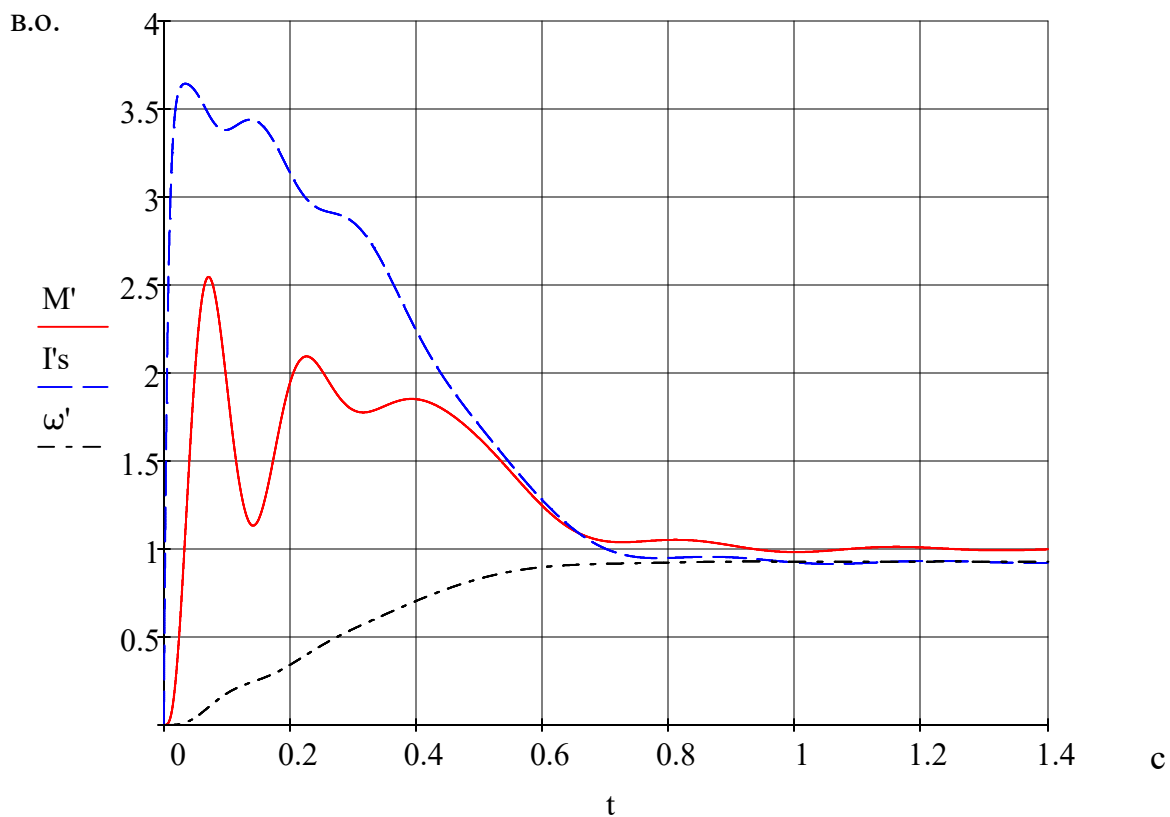


Рис. В.2. Часові динамічні характеристики АД з урахуванням магнітних втраг у роторі

Розрахунок різниці динамічних характеристик

$$\Delta\omega_i := \begin{cases} \frac{|\omega_i - \omega'_i|}{\omega_i} \cdot 100 & \text{if } \omega_i \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Delta M_i := \begin{cases} \frac{|M_i - M'_i|}{M_i} \cdot 100 & \text{if } M_i \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Delta I_i := \begin{cases} \frac{|I_{s_i} - I'_{s_i}|}{I_{s_i}} \cdot 100 & \text{if } I_{s_i} \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

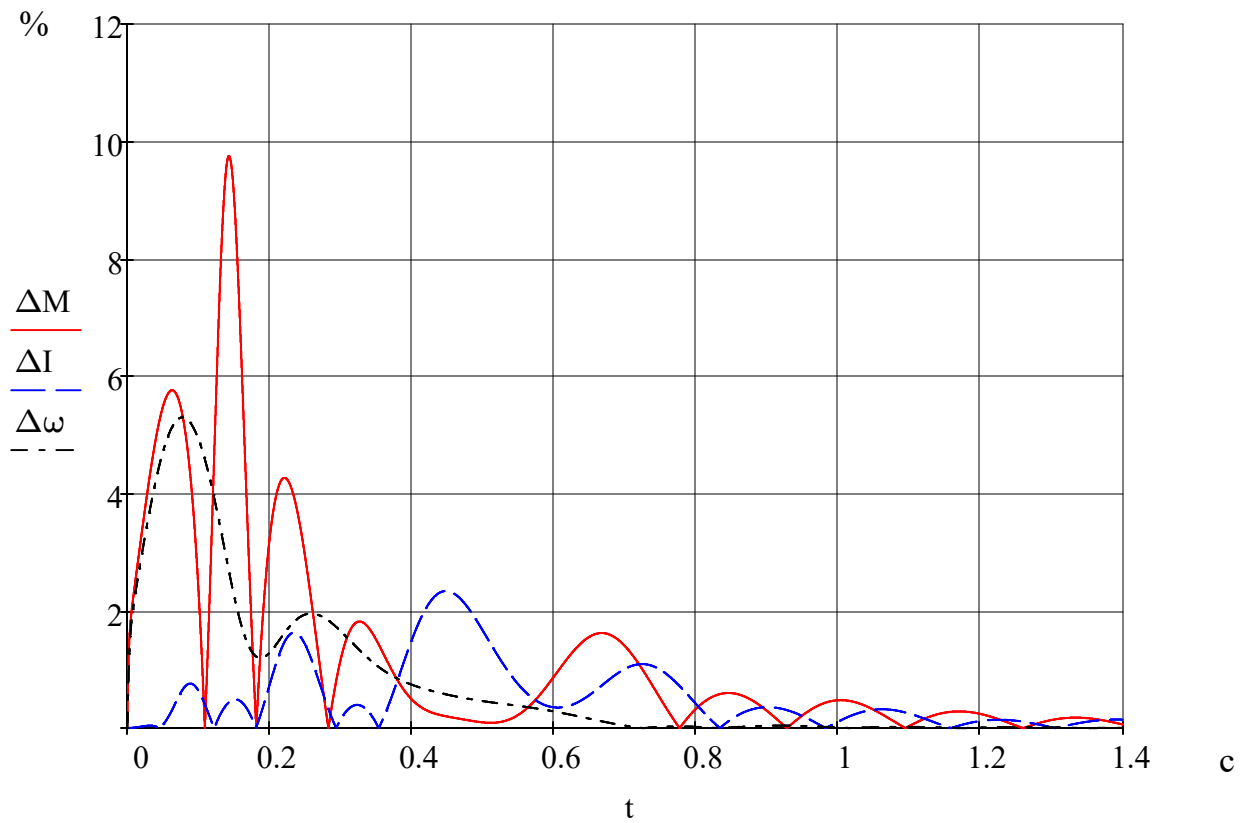


Рис. В.3. Часові характеристики різниць

$$\Delta M_{\max} = 9.754 \quad \%$$

$$\Delta I_{\max} = 0.761 \quad \%$$

$$\Delta \omega_{\max} = 5.297 \quad \%$$

$$\Delta M_{\text{cep}} := \frac{1}{t_{\max}} \cdot \sum_{i=0}^{i_{\max}} \left(\Delta M_i \cdot \frac{t_{\max}}{i_{\max}} \right) = 1.19$$

$$\Delta I_{\text{cep}} := \frac{1}{t_{\max}} \cdot \sum_{i=0}^{i_{\max}} \left(\Delta I_i \cdot \frac{t_{\max}}{i_{\max}} \right) = 0.535$$

$$\Delta \omega_{\text{cep}} := \frac{1}{t_{\max}} \cdot \sum_{i=0}^{i_{\max}} \left(\Delta \omega_i \cdot \frac{t_{\max}}{i_{\max}} \right) = 0.774$$

Вихідні дані

$$P_{2H} := 3 \quad \text{кВт} .$$

$$R_1 := 2.06 \quad \text{Ом} . \quad X_1 := 1.29 \quad \text{Ом} .$$

$$f_1 := 50 \quad \text{Гц} .$$

$$R_{21} := 1.28 \quad \text{Ом} . \quad X_{21} := 0.706 \quad \text{Ом} .$$

$$U_1 := 220 \quad \text{В} .$$

$$R_m := 4.54 \quad \text{Ом} . \quad X_m := 76.5 \quad \text{Ом} .$$

$$p := 1 .$$

$$m_1 := 3 .$$

$$R_{m2} := 2.22 \quad \text{Ом} .$$

$$jd := 7.48 \times 10^{-3} \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2 .$$

$$I_{1n} := 6.21 \quad \text{А} .$$

$$s_H := 0.033$$

$$M_H := 10.3 \quad \text{Н} \cdot \text{м}$$

Розрахунок базових величин

$$z_b := \frac{U_1}{I_{1n}} = 35.427$$

$$\omega_b := 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_1}{p} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{50}{1} = 314.159$$

$$m_b := \frac{U_1 \cdot I_{1n}}{\omega_b} = \frac{220 \cdot 6.21}{314.159} = 4.3488$$

$$j_b := \frac{2 \cdot m_b}{\omega_b^2} = \frac{2 \cdot 4.3488}{314.159^2} = 0.0000881$$

$$r_s := \frac{R_1}{z_b} = 0.058$$

$$r_r := \frac{R_{21}}{z_b} = 0.036$$

$$x_s := \frac{X_1}{z_b} = 0.036$$

$$x_r := \frac{X_{21}}{z_b} = 0.02$$

$$r_m := \frac{R_m}{z_b} = 0.128$$

$$r_{m2} := \frac{R_{m2}}{z_b} = 0.063$$

$$x_m := \frac{X_m}{z_b} = 2.159$$

$$j := \frac{2 \cdot jd}{j_b} = 169.807$$

Параметри:

$$c_r := \frac{x_r}{x_m} + 1 = 1.01$$

$$c_s := \frac{x_s}{x_m} + 1 = 1.02$$

$$a := x_m \cdot (c_r \cdot c_s - 1) = 0.0652$$

Розрахунок без урахування магнітних втрат потужності у роторі

$$\text{Крок} \quad t_{\max} := 1.4 \text{ с} \quad T_{\max} := t_{\max} \cdot f_1 = 70 \quad i_{\max} := 70000$$

$$h = \frac{T_{\max}}{i_{\max}} = 1 \times 10^{-3}$$

$$usu = 1 \quad usv := 0 \quad i = 0 .. i_{\max}$$

$$M_0 = 0 \quad s_0 = 1 \quad t_0 = 0$$

$$isu_0 := 0 \quad isv_0 := 0$$

$$iru_0 := 0 \quad irv_0 := 0$$

$$\psi su_0 = 0 \quad \psi ru_0 = 0$$

$$\psi sv_0 = 0 \quad \psi rv_0 = 0$$

$$\text{Матриця часу} \quad t_{i+1} = t_i + h$$

$$\begin{pmatrix} isu_{i+1} \\ isv_{i+1} \\ iru_{i+1} \\ irv_{i+1} \\ \psi su_{i+1} \\ \psi sv_{i+1} \\ \psi ru_{i+1} \\ \psi rv_{i+1} \\ M_{i+1} \\ s_{i+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \frac{cr \cdot \psi su_i - \psi ru_i}{a} \\ \frac{cr \cdot \psi sv_i - \psi rv_i}{a} \\ \frac{cs \cdot \psi ru_i - \psi su_i}{a} \\ \frac{cs \cdot \psi rv_i - \psi sv_i}{a} \\ \psi su_i + h \cdot [usu - rs \cdot isu_i + \psi sv_i - rm \cdot (isu_i + iru_i)] \\ \psi sv_i + h \cdot [usv - rs \cdot isv_i - \psi su_i - rm \cdot (isv_i + irv_i)] \\ \psi ru_i + h \cdot [-rr \cdot iru_i + s_i \cdot \psi rv_i - s_i \cdot rm \cdot (isu_i + iru_i)] \\ \psi rv_i + h \cdot [-rr \cdot irv_i - s_i \cdot \psi ru_i - s_i \cdot rm \cdot (isv_i + irv_i)] \\ m_1 \cdot (\psi su_i \cdot isv_i - \psi sv_i \cdot isu_i) \\ M_i - \frac{(1 - s_i)^2}{(1 - s_H)^2} \cdot \frac{M_H}{mb} \\ s_i - \frac{j}{j} \cdot h \end{bmatrix}$$

$$I_s = \sqrt{(isu)^2 + (isv)^2}$$

$$M := M \cdot \frac{mb}{M_H}$$

$$\omega := 1 - s \quad t := \frac{t}{f_1}$$

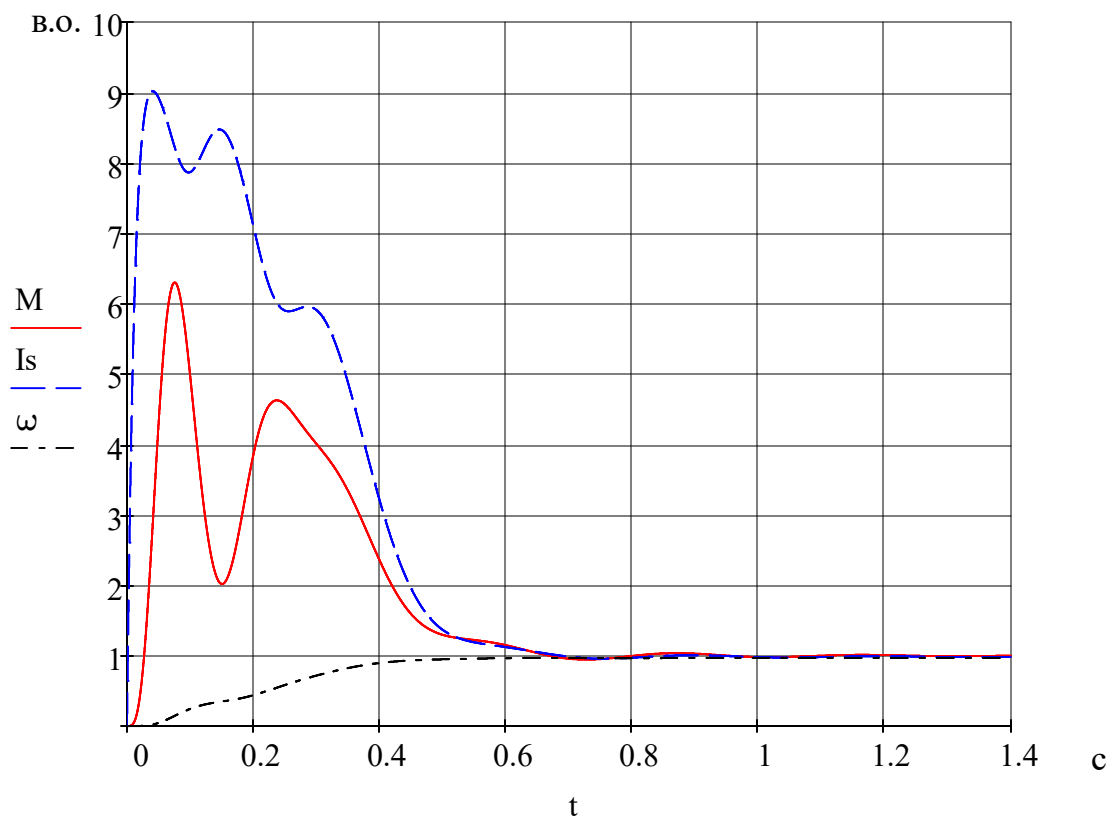


Рис. В.1. Часові динамічні характеристики АД без урахування магнітних втрат у роторі

Розрахунок з урахування магнітних втрат потужності у роторі

$$\psi_{su0} = 0$$

$$\psi_{ru0} = 0$$

$$\psi_{sv0} = 0$$

$$\psi_{rv0} = 0$$

$$\text{isu}_0 := 0$$

$$\text{isv}_0 := 0$$

$$\text{iru}_0 := 0$$

$$\text{irv}_0 := 0$$

$$\text{Mr}_0 = 0$$

$$\text{sr}_0 = 1$$

$$\begin{pmatrix} \text{isu}_{i+1} \\ \text{isv}_{i+1} \\ \text{iru}_{i+1} \\ \text{irv}_{i+1} \\ \psi_{\text{su}_{i+1}} \\ \psi_{\text{sv}_{i+1}} \\ \psi_{\text{ru}_{i+1}} \\ \psi_{\text{rv}_{i+1}} \\ \text{Mr}_{i+1} \\ \text{sr}_{i+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \frac{\text{cr} \cdot \psi_{\text{su}_i} - \psi_{\text{ru}_i}}{a} \\ \frac{\text{cr} \cdot \psi_{\text{sv}_i} - \psi_{\text{rv}_i}}{a} \\ \frac{\text{cs} \cdot \psi_{\text{ru}_i} - \psi_{\text{su}_i}}{a} \\ \frac{\text{cs} \cdot \psi_{\text{rv}_i} - \psi_{\text{sv}_i}}{a} \\ \psi_{\text{su}_i} + \text{h} \cdot \left[\text{usu} - \text{rs} \cdot \text{isu}_i + \psi_{\text{sv}_i} - \left[\text{rm} + \text{rm2} \cdot (\text{sr}_i)^{1.5} \right] \cdot (\text{isu}_i + \text{iru}_i) \right] \\ \psi_{\text{sv}_i} + \text{h} \cdot \left[\text{usv} - \text{rs} \cdot \text{isv}_i - \psi_{\text{su}_i} - \left[\text{rm} + \text{rm2} \cdot (\text{sr}_i)^{1.5} \right] \cdot (\text{isv}_i + \text{irv}_i) \right] \\ \psi_{\text{ru}_i} + \text{h} \cdot \left[-\text{rr} \cdot \text{iru}_i + \text{sr}_i \cdot \psi_{\text{rv}_i} - \text{sr}_i \cdot \left[\text{rm} + \text{rm2} \cdot (\text{sr}_i)^{1.5} \right] \cdot (\text{isu}_i + \text{iru}_i) \right] \\ \psi_{\text{rv}_i} + \text{h} \cdot \left[-\text{rr} \cdot \text{irv}_i - \text{sr}_i \cdot \psi_{\text{ru}_i} - \text{sr}_i \cdot \left[\text{rm} + \text{rm2} \cdot (\text{sr}_i)^{1.5} \right] \cdot (\text{isv}_i + \text{irv}_i) \right] \\ m_1 \cdot (\psi_{\text{su}_i} \cdot \text{isv}_i - \psi_{\text{sv}_i} \cdot \text{isu}_i) \\ \text{Mr}_i - \frac{(1 - \text{sr}_i)^2}{(1 - \text{s}_H)^2} \cdot \frac{\text{M}_H}{\text{mb}} \\ \text{sr}_i - \frac{\text{j}}{\text{j}} \cdot \text{h} \end{bmatrix}$$

$$\text{I's} = \sqrt{(\text{isu})^2 + (\text{isv})^2}$$

$$\omega' := 1 - \text{sr}$$

$$\text{M}' := \text{Mr} \cdot \frac{\text{mb}}{\text{M}_H}$$

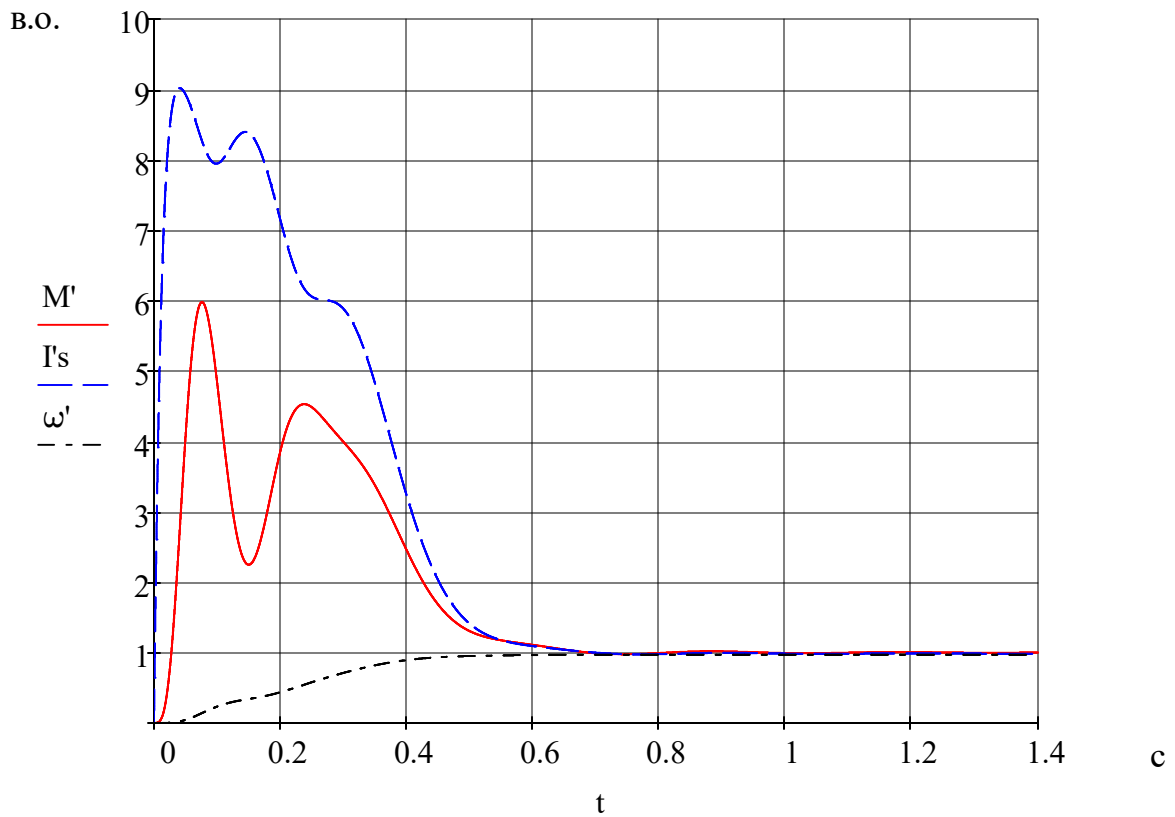


Рис. В.2. Часові динамічні характеристики АД з урахуванням магнітних втрат у роторі

Розрахунок різниці динамічних характеристик

$$\Delta\omega_i := \begin{cases} \frac{|\omega_i - \omega'_i|}{\omega_i} \cdot 100 & \text{if } \omega_i \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Delta M_i := \begin{cases} \frac{|M_i - M'_i|}{M_i} \cdot 100 & \text{if } M_i \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Delta I_i := \begin{cases} \frac{|I_{s_i} - I'_{s_i}|}{I_{s_i}} \cdot 100 & \text{if } I_{s_i} \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

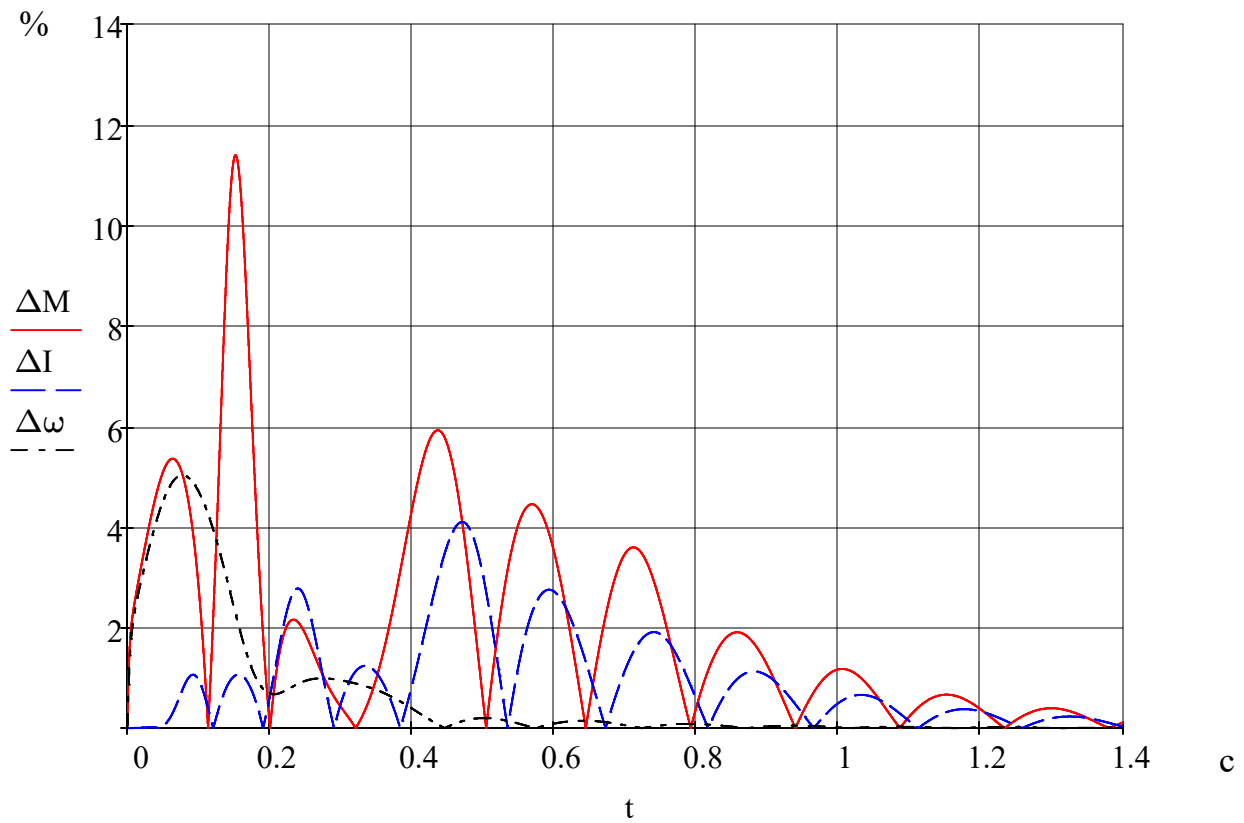


Рис. В.3. Часові характеристики різниць

$$\Delta M_{\max} = 11.394 \quad \%$$

$$\Delta I_{\max} = 1.064 \quad \%$$

$$\Delta \omega_{\max} = 5.029 \quad \%$$

$$\Delta M_{\text{cep}} := \frac{1}{t_{\max}} \cdot \sum_{i=0}^{i_{\max}} \left(\Delta M_i \cdot \frac{t_{\max}}{i_{\max}} \right) = 2.011$$

$$\Delta I_{\text{cep}} := \frac{1}{t_{\max}} \cdot \sum_{i=0}^{i_{\max}} \left(\Delta I_i \cdot \frac{t_{\max}}{i_{\max}} \right) = 0.954$$

$$\Delta \omega_{\text{cep}} := \frac{1}{t_{\max}} \cdot \sum_{i=0}^{i_{\max}} \left(\Delta \omega_i \cdot \frac{t_{\max}}{i_{\max}} \right) = 0.619$$

Додаток Е. Копія сертифіката учасника конференції



Міжнародна наукова конференція
«АКТУАЛЬНІ НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ У СУЧАСНОМУ СВІТІ»

СЕРТИФІКАТ

підтверджує, що

Безсмертний Костянтин Андрійович

автор статті:

«ЕФЕКТ ВРАХУВАННЯ МАГНІТНИХ ВТРАТ У РОТОРІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА»

взяв участь в СХІV Міжнародній науковій конференції
«АКТУАЛЬНІ НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ В СУЧАСНОМУ СВІТІ» (26-27 листопада 2024 р.)

Кількість годин: 15 (0,5 кредитів ЕКТС)

голова оргкомітету, канд. іст. наук,
Олег Водяний



27.11.2024 р.

м. Переяслав • Україна

KA2411043