

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Типова програма, методичні вказівки та контрольні завдання
для студентів заочної форми навчання
спеціальності 141 «Електротехніка, електроенергетика та
електромеханіка»

Харків 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Типова програма, методичні вказівки та контрольні завдання
для студентів заочної форми навчання
спеціальності 141 «Електротехніка, електроенергетика та
електромеханіка»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою НТУ «ХПІ»,
протокол № 3 від 30.10.20

Харків
НТУ «ХПІ»
2020

Електричні машини : Типова програма, методичні вказівки та контрольні завдання для студентів заочної форми навчання спеціальності 141 «Електротехніка, електроенергетика та електромеханіка» / Уклад. В.І. Мілих, О.Ю. Юр'єва. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. - 36 с.

Укладачі: В.І. МІЛИХ,
О.Ю. ЮР'ЄВА

Рецензент В.Ф. Болюх
Кафедра електричних машин

ВСТУП

Дисципліна «Електричні машини» вивчає різноманітні електричні машини, що забезпечують роботу сучасних механізмів, а також силові трансформатори, електромагнітні процеси в яких схожі з електромагнітними процесами в електричних машинах.

Основним завданням і метою викладання дисципліни є вивчення будови та принципу дії основних видів електричних машин і трансформаторів; вивчення їх характеристик та сфер використання; набуття студентами практичних навичок в експериментальному дослідженні та розрахунках електричних машин і трансформаторів.

Вивчення навчальної дисципліни базується на знаннях з вищої математики, фізики, інженерної графіки, теоретичних основ електротехніки, теоретичної механіки, електроізоляційних матеріалів і метрології.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен знати конструкцію та принцип дії основних типів електричних машин і трансформаторів; їх основні характеристики з відповідним теоретичним обґрунтуванням; переваги та недоліки різних типів електричних машин з точки зору їх використання у тих чи інших електроприводах.

Студент має навчитися теоретично обґрунтовувати фізичні процеси в електричних машинах і трансформаторах; пояснювати особливості характеристик електричних машин і трансформаторів; обґрунтовувати вибір типу електричної машини для застосування в конкретному електроприводі; проводити експериментальні дослідження електричних машин і трансформаторів; здійснювати розрахунки основних величин та характеристик електричних машин і трансформаторів.

Вивчення дисципліни «Електричні машини» студентами заочної форми навчання відбувається під час самостійної роботи. Студент повинен скласти конспект за вивченим матеріалом та відповісти на контрольні запитання для самоперевірки. Після вивчення відповідних розділів дисципліни рекомендується виконувати контрольне завдання.

Це методичне видання містить програму дисципліни «Електричні машини», контрольні запитання за розділами курсу, методичні вказівки для виконання контрольних завдань, а також перелік джерел інформації, необхідних для вивчення дисципліни.

1. СТРУКТУРА ДИСЦИПЛІНИ

За навчальним планом дисципліна «Електричні машини» вивчається в п'ятому семестрі на третьому курсі. Навчальним планом передбачено 6 кредитів базового обсягу, що становить 180 навчальних годин, які складаються з 10 годин лекційних занять, 4 годин лабораторних занять, 2 годин практичних занять і 134 годин самостійної роботи для виконання контрольного завдання та підготовки до екзамену.

До складу дисципліни увійшли такі розділи:

- «Трансформатори»;
- «Загальні питання щодо електричних машин»;
- «Машини постійного струму»;
- «Асинхронні машини»;
- «Синхронні машини».

2. ТИПОВА ПРОГРАМА ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

Розділ 1. Трансформатори

Призначення і будова трансформаторів, загальні відомості про них. Класифікація трансформаторів. Принцип дії та основні величини, що характеризують роботу трансформатора. ЕРС в обмотках трансформатора та його коефіцієнт трансформації.

Рівняння напруг в обмотках трансформатора. Рівняння МРС і струмів обмоток трансформатора. Векторна діаграма трансформатора. Потужності і втрати потужності трансформатора. Енергетична діаграма трансформатора і його ККД.

Зведений трансформатор: визначення, необхідність зведення, умови зведення. Схема заміщення трансформатора і фізичний сенс її елементів. Дослідження і характеристики трансформатора в режимі неробочого ходу. Визначення параметрів трансформатора і його схеми заміщення за даними досліду неробочого ходу. Дослідження і характеристики трансформатора в режимі короткого замикання. Визначення параметрів трансформатора і його схеми заміщення за даними досліду короткого замикання.

Режим навантаження і робочі характеристики трансформатора. Зміна напруги трансформатора та його зовнішня характеристика. Розрахункова характеристика ККД трансформатора.

Будова трифазних трансформаторів і схеми з'єднання їх обмоток. Співвідношення електричних величин і потужності трифазних трансформаторів. Будова автотрансформаторів і співвідношення величин, що характеризують їх роботу.

Контрольні запитання

1. Поясніть принцип дії та будову трансформатора.
2. Перелічте основні конструктивні елементи силових трансформаторів, вкажіть їхнє призначення.
3. Як проходять основний магнітний потік та магнітний потік розсіяння в трансформаторі?
4. Дайте визначення коефіцієнта трансформації трансформатора.
5. Напишіть рівняння напруг і струмів трансформатора.
6. Дайте визначення зведеному трансформатору.
7. Нарисуйте схему заміщення трансформатора. Визначте елементи схеми заміщення.
8. Опишіть режим неробочого ходу трансформатора, характеристики трансформатора в режимі неробочого ходу. Поясніть доцільність проведення дослідів неробочого ходу.
9. Опишіть режим короткого замикання трансформатора, характеристики трансформатора в режимі короткого замикання, доцільність проведення дослідів короткого замикання.
10. Нарисуйте енергетичну діаграму трансформатора, поясніть розподіл потужності в трансформаторі.
11. Як визначається ККД трансформатора?
12. Поясніть вигляд зовнішньої характеристики трансформатора?
13. Як отримують робочі характеристики трансформатора? Поясніть їх вигляд.

Розділ 2. Загальні питання щодо електричних машин

Основи принципу дії і будова найпростіших електричних машин. Отримання ЕРС, напруг, струмів у найпростіших електричних машинах. Отримання електромагнітного моменту в найпростіших електричних машинах. Генераторний та двигунний режими роботи електричних машин і принцип їх оборотності.

Узагальнений конструктивний модуль електричної машини і його загальні частини та елементи, матеріали, що використовуються. Обертове магнітне поле трифазної обмотки.

Потужності та втрати в електричних машинах. Класифікація електричних машин, основні параметри, що їх характеризують.

Контрольні запитання

1. Поясніть основи принципу дії та будову найпростіших електричних машин.
2. Як отримуються ЕРС, напруги, струми у найпростіших електричних машинах?
3. Як отримується електромагнітний момент у найпростіших електричних машинах?
4. Поясніть, як отримати генераторний та двигунний режими роботи електричних машин.
5. Поясніть принцип оборотності електричних машин.
6. Як отримується обертове магнітне поле в електричних машинах?
7. Наведіть класифікацію електричних машин, основні параметри, що їх характеризують.

Розділ 3. Асинхронні машини

Призначення і галузі застосування асинхронних машин. Конструкція трифазних асинхронних машин з короткозамкненим ротором. Конструкція трифазних асинхронних машин із фазним ротором. Принцип дії трифазних асинхронних двигунів. Ковзання ротора і відповідні режими роботи трифазних асинхронних двигунів.

ЕРС в обмотках трифазних асинхронних двигунів. Рівняння напруг трифазних асинхронних двигунів. Рівняння МРС і струмів трифазних асинхронних двигунів. Зведення ротора асинхронної машини до її статора. Схеми заміщення трифазних асинхронних двигунів.

Векторна діаграма трифазних асинхронних двигунів. Потужності та втрати в трифазних асинхронних двигунах. Енергетична діаграма і ККД трифазних асинхронних двигунів. Електромагнітний момент трифазного асинхронного двигуна. Механічна характеристика трифазного асинхронного двигуна. Робочі характеристики трифазних асинхронних двигунів.

Процес пуску асинхронного двигуна, проблеми та способи пуску.

Властивість саморегулювання трифазних асинхронних двигунів та умови стійкої роботи. Вихідні умови регулювання частоти обертання трифазних

асинхронних двигунів.

Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна введенням додаткового опору до кола ротора. Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна змінюванням підведеної напруги. Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна зміною кількості пар полюсів. Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна змінюванням частоти підведеної напруги.

Способи гальмування асинхронних двигунів.

Контрольні запитання

1. Поясніть принцип дії асинхронної машини.
2. Поясніть будову трифазних асинхронних двигунів із короткозамкненим та фазним ротором.
3. Що таке ковзання?
4. Охарактеризуйте режими роботи асинхронної машини.
5. Напишіть рівняння напруг і струмів асинхронної машини.
6. Нарисуйте Т- і Г-подібні схеми заміщення асинхронної машини. Визначте елементи схеми заміщення.
7. Нарисуйте енергетичну діаграму асинхронного двигуна й асинхронного генератора, поясніть розподіл потужності в асинхронній машині.
8. Як визначається ККД асинхронного двигуна та асинхронного генератора?
9. Поясніть механічну характеристику асинхронного двигуна, її особливі точки та ділянки.
10. Поясніть робочі характеристики асинхронного двигуна.
11. Охарактеризуйте способи пуску асинхронних двигунів.
12. Охарактеризуйте способи регулювання частоти обертання асинхронних двигунів.
13. Охарактеризуйте способи гальмування асинхронних двигунів.

Розділ 4. Синхронні машини

Призначення і галузі застосування синхронних машин. Конструкція синхронної неявнополюсної машини. Конструкція синхронної явнополюсної машини. Принцип дії синхронного генератора. Принцип дії синхронного двигуна. Магнітні поля синхронної машини та види реакції якоря.

Поняття про ЕРС та індуктивні опори синхронної машини. Рівняння напруг і векторна діаграма неявнополюсного синхронного генератора. Рівняння напруг і векторна діаграма явнополюсного синхронного генератора.

Характеристика неробочого ходу синхронного генератора. Характеристика короткого замикання синхронного генератора. Експериментальне визначення індуктивного опору синхронних машин по поздовжній осі.

Потужності, втрати та ККД синхронної машини. Електромагнітний момент синхронної машини і рівняння моментів у різних режимах роботи.

Робота синхронного генератора при автономному навантаженні. Зовнішня і регулювальна характеристики синхронного генератора. Навантажувальна характеристика і реактивний трикутник синхронного генератора.

Проблеми при пуску та способи пуску синхронного двигуна. Рівняння напруг і векторна діаграма синхронного двигуна. Механічна та робочі характеристики синхронного двигуна. Способи регулювання частоти обертання та способи гальмування синхронних двигунів. Поняття про синхронні компенсатори.

Контрольні запитання

1. Поясніть принцип дії синхронного двигуна та синхронного генератора.
2. Поясніть будову явнополюсних та неявнополюсних синхронних машин.
3. Охарактеризуйте види реакції якоря синхронної машини.
4. Напишіть рівняння напруг синхронного двигуна та синхронного генератора.
5. Поясніть застосування векторних діаграм при визначенні характеристик синхронних машин.
6. Нарисуйте енергетичну діаграму синхронного двигуна та синхронного генератора, поясніть розподіл потужності в синхронній машині.
7. Поясніть характеристику неробочого ходу синхронної машини.
8. Поясніть характеристику короткого замикання синхронної машини.
9. Поясніть характеристики синхронного генератора при автономній роботі.
10. Охарактеризуйте способи пуску синхронних двигунів.
11. Поясніть робочі характеристики синхронного двигуна.
12. Охарактеризуйте роботу синхронних компенсаторів.

Розділ 5. Машини постійного струму

Призначення та галузі застосування машин постійного струму. Будова машини постійного струму і призначення елементів її конструкції. Отримання ЕРС в обмотці якоря машини постійного струму. Отримання електромагнітного моменту машини постійного струму.

Генераторний режим роботи машини постійного струму, електрична схема

заміщення, рівняння напруг та обертальних моментів. Двигунний режим роботи машини постійного струму, електрична схема заміщення, рівняння напруг та обертальних моментів. Потужності, втрати потужності і ККД машин постійного струму. Способи збудження машини постійного струму, умовні позначення.

Умови самозбудження генератора постійного струму паралельного збудження. Характеристики неробочого ходу та короткого замикання генераторів постійного струму. Зовнішня, регульовальна та навантажувальна характеристики генераторів постійного струму.

Проблеми при пуску та способи пуску двигунів постійного струму. Процес саморегулювання двигунів постійного струму.

Електромеханічна характеристика двигунів постійного струму. Механічна характеристика двигунів постійного струму. Моментна характеристика двигунів постійного струму. Робочі характеристики двигунів постійного струму.

Спосіб регулювання частоти обертання двигунів постійного струму шляхом введення реостата до кола якоря. Спосіб регулювання частоти обертання двигунів постійного струму змінюванням підведеної напруги. Спосіб регулювання частоти обертання двигунів постійного струму змінюванням струму збудження.

Способи гальмування двигунів постійного струму.

Контрольні запитання

1. Поясніть принцип дії та будову двигуна постійного струму та генератора постійного струму.

2. Поясніть конструкцію та призначення колектора машини постійного струму.

3. Отримайте рівняння ЕРС машини постійного струму.

4. Отримайте рівняння електромагнітного моменту машини постійного струму.

5. Які способи збудження існують у машинах постійного струму?

6. Охарактеризуйте генераторний режим роботи машини постійного струму, нарисуйте електричну схему заміщення, напишіть рівняння напруг та обертальних моментів.

7. Охарактеризуйте двигунний режим роботи машини постійного струму, нарисуйте електричну схему заміщення, напишіть рівняння напруг та обертальних моментів.

8. Нарисуйте енергетичну діаграму двигуна постійного струму та генератора постійного струму, поясніть розподіл потужності в машині постійного струму.

9. Поясніть умови самозбудження генератора постійного струму паралельного збудження.
10. Поясніть характеристики генераторів постійного струму.
11. Поясніть електромеханічну, механічну та моментну характеристику двигуна постійного струму.
12. Поясніть робочі характеристики двигуна постійного струму.
13. Охарактеризуйте способи пуску двигунів постійного струму.
14. Охарактеризуйте способи регулювання частоти обертання двигунів постійного струму.
15. Охарактеризуйте способи гальмування двигунів постійного струму.

3. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОГО ЗАВДАННЯ

Контрольне завдання охоплює всі розділи дисципліни та складається з чотирьох задач, які потрібно виконати письмово.

Задачі розв'язуються відповідно до варіанта. Номер варіанта видається студенту індивідуально на настановних заняттях під час сесії. Контрольне завдання зараховується після співбесіди з викладачем.

Під час виконання контрольного завдання рекомендується користуватися джерелами інформації [1–7] або іншими, знайденими самостійно, які обов'язково навести наприкінці контрольної роботи. Літерні позначення величин та одиниці їх вимірювання повинні відповідати діючим стандартам [8].

Контрольне завдання повинно бути оформлене ручним або машинним способом відповідно до вимог стандартів [9].

Додаткову інформацію щодо вивчення дисципліни «Електричні машини» можна отримати за посиланням [10].

Задача 1. Параметри та характеристики однофазного трансформатора

Для заданого варіанта (табл. 1) однофазного трансформатора (рис. 1) визначити параметри та характеристики:

- 1) коефіцієнт трансформації;
- 2) номінальні струми обмоток, струм первинної обмотки в режимі неробочого ходу і при аварійному короткому замиканні;
- 3) характеристику ККД;
- 4) зовнішню характеристику.

В табл. 1 позначено: S_N – повна номінальна потужність; U_{highN} , U_{lowN} – номінальні напруги обмоток вищої та нижчої напруг відповідно; i_o , P_o – струм і

потужність втрат у режимі неробочого ходу відповідно; P_k , u_k – потужність втрат та напруга у режимі дослідного короткого замикання (i_o і u_k подані у відсотках від номінальних величин відповідно струму і напруги первинної обмотки I_{pN} та U_{pN}); $\cos\phi_{load}$ – коефіцієнт потужності навантаження величиною Z_l трансформатора, що має активно-індуктивний характер.

Будемо вважати, що первинна обмотка трансформатора є обмоткою вищої напруги (індекс *high*), а вторинна – обмоткою нижчої напруги (індекс *low*).

На рис. 1 позначено: U_p , I_p – напруга та струм первинної обмотки відповідно; U_s , I_s – напруга та струм вторинної обмотки відповідно (позначення відповідають діючим значенням синусоїдних величин).

Принцип розв’язання задачі 1 подано нижче в прикладах 1–3.

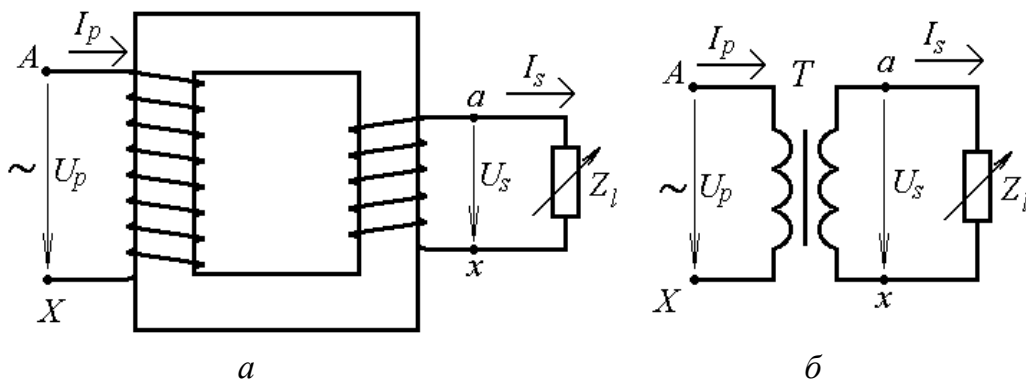


Рисунок 1 – Фізична модель однофазного трансформатора (а) та його умовне графічне позначення (б)

Задача 2. Параметри та характеристики двигуна постійного струму паралельного збудження

Для заданого варіанта (табл. 2) двигуна постійного струму паралельного збудження (рис. 2) необхідно:

1) для номінального режиму роботи визначити струм, споживаний двигуном з мережі, I_N ; струм якоря I_{aN} ; струм збудження I_{EN} ; сумарні втрати потужності в двигуні ΔP_{nom} ; електромагнітну потужність $P_{em\ nom}$; електрорушійну силу (ЕРС) E_{nom} ; M_N – обертальний момент;

2) визначити частоту обертання якоря n_o у режимі ідеального неробочого ходу;

3) побудувати природну механічну характеристику $n(M)$, де n – частота обертання, M – обертальний момент;

Таблиця 1 – Дані однофазного трансформатора та його навантаження

Номер варіанта	S_N , кВ·А	U_{highN} , В	U_{lowN} , В	i_o , %	P_o , Вт	P_k , Вт	u_k , %	$\cos \phi_l$
1	1	660	230	12,6	15	50	5,4	0,90
2	1	380	230	12,5	15	49	5,3	0,85
3	1,6	660	230	10,9	20	68	4,6	0,90
4	1,6	380	230	10,8	20	67	4,6	0,85
5	2,5	660	230	9,1	25	88	3,9	0,90
6	2,5	380	230	9,0	25	86	3,8	0,85
7	4	660	230	8,3	35	125	3,5	0,90
8	4	380	230	8,2	34	122	3,5	0,85
9	6,3	660	230	9,6	60	223	4,1	0,90
10	6,3	380	230	9,5	59	218	4,0	0,85
11	10	660	230	9,2	88	333	3,9	0,90
12	10	380	230	9,1	85	325	3,8	0,85
13	16	660	230	9,1	131	509	3,8	0,90
14	16	380	230	8,9	127	497	3,7	0,85
15	1	660	133	12,5	15	49	5,3	0,85
16	1	380	133	12,3	14	48	5,1	0,80
17	1	220	133	12,1	14	46	5,0	0,75
18	1,6	660	133	10,8	20	67	4,6	0,85
19	1,6	380	133	10,6	19	64	4,4	0,80
20	1,6	220	133	10,3	18	62	4,2	0,75
21	2,5	660	133	9,0	24	86	3,8	0,85
22	2,5	380	133	8,7	23	82	3,6	0,80
23	2,5	220	133	8,5	22	78	3,5	0,75
24	4	660	133	8,2	34	122	3,5	0,85
25	4	380	133	7,9	32	116	3,3	0,80
26	4	220	133	7,6	30	110	3,1	0,75
27	6,3	660	133	9,5	59	218	4,0	0,85
28	6,3	380	133	9,2	56	208	3,8	0,80
29	6,3	220	133	9,0	54	198	3,6	0,75
30	10	660	133	9,1	85	325	3,8	0,85

Таблиця 2 – Параметри двигуна постійного струму паралельного збудження

Номер варіанта	P_N , кВт	U_N , В	n_N , об/хв	η_N	R_a , Ом	R_E , Ом
1	4	220	900	0,723	1,60	191
2	3,15	220	750	0,693	2,38	255
3	2	220	450	0,576	3,16	199
4	4,25	220	730	0,680	1,61	110
5	3	220	475	0,603	3,14	139
6	3,55	220	425	0,601	2,67	117
7	15	220	1400	0,779	0,37	103
8	7,5	220	1000	0,760	0,79	175
9	6	220	875	0,740	0,80	85
10	4,25	220	580	0,650	1,84	105
11	11	220	1060	0,785	0,45	100
12	8,5	220	875	0,760	0,62	98
13	8	220	600	0,680	0,85	58
14	11	220	800	0,760	0,48	73
15	8,5	220	515	0,680	0,93	91
16	15	220	850	0,807	0,21	45
17	11	220	530	0,705	0,56	46
18	15	220	580	0,753	0,34	44
19	17	220	500	0,730	0,33	34
20	20	220	475	0,750	0,26	32
21	7,5	440	2120	0,871	1,54	1124
22	5,5	440	1450	0,814	3,06	964
23	4,25	440	975	0,740	5,93	971
24	3,14	440	730	0,690	9,64	994
25	7,5	440	1450	0,825	1,54	414
26	5,5	440	900	0,741	4,96	1304
27	4,25	440	690	0,674	6,62	438
28	10	440	1320	0,812	1,23	260
29	7,5	440	975	0,810	2,53	1045
30	5,5	440	690	0,708	5,24	671

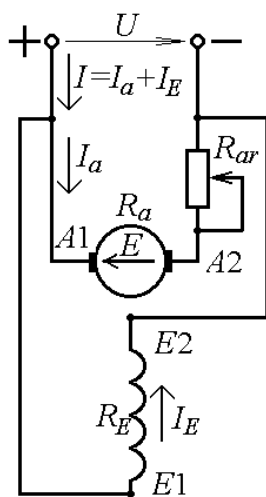


Рисунок 2 – Електрична схема двигуна постійного струму паралельного збудження

4) визначити частоту обертання якоря n при обертальному моменті $M = 0,6M_N$;

5) побудувати штучну механічну характеристику $n(M)$ при номінальній напрузі U_N , якщо у коло обмотки якоря ввімкнено регульовальний реостат з опором $R_{ar} = 2,5R_a$ (рис. 2);

6) визначити опір R_{ar} регульовального реостата у колі обмотки якоря (рис. 2) для обмеження пускового струму якоря до $I_{a\text{ start}} = 2,4I_{aN}$, якщо двигун вмикається при пуску на номінальну напругу U_N ;

7) знайти величину напруги живлення при пуску U_{start} , до якої її потрібно знизити при

вмиканні двигуна, щоби пусковий струм якоря $I_{a\text{ start}}$ не перевищував значення $I_{a\text{ start}} = 2,3I_{aN}$ за відсутності пускового реостата.

В табл. 2 позначено P_N , U_N , n_N , η_N – номінальні потужність, напруга, частота обертання і ККД відповідно; R_a – опір кола обмотки якоря; R_E – опір обмотки збудження.

Принцип розв'язання задачі 2 подано нижче в прикладах 4–6.

Задача 3. Параметри та характеристики трифазного асинхронного двигуна

Для заданого варіанта (табл. 3) асинхронного двигуна (рис. 3) виконати такі завдання:

1) вибрати лінійну напругу живильної трифазної мережі U_N ;

2) визначити синхронну частоту обертання магнітного поля статора n_s , номінальну n_N і критичну n_{cr} частоти обертання ротора;

3) визначити для номінального режиму потужність $P_{in\text{ nom}}$, яку двигун споживає з мережі, і сумарні втрати потужності в двигуні ΔP_{nom} ; номінальний I_N і пусковий I_1 струми двигуна; номінальний M_N і максимальний M_{max} обертальні моменти;

4) розрахувати і побудувати графік внутрішньої механічної характеристики – залежності $M(s)$, де M – обертальний момент, s – ковзання ротора. З цієї

Таблиця 3 – Параметри трифазних асинхронних двигунів

Номер варіанта	Схема обмотки	P_N , кВт	p	s_N	η_N	k_{Mm}	k_{I1}	$\cos \varphi_N$
1	Δ	0,09	1	0,086	0,600	2,2	5,0	0,700
2	Y	0,12	1	0,097	0,630	2,2	5,0	0,700
3	Δ	0,18	1	0,080	0,660	2,2	5,0	0,760
4	Y	0,25	1	0,080	0,680	2,2	5,0	0,770
5	Δ	0,37	1	0,083	0,700	2,2	5,0	0,860
6	Y	0,55	1	0,085	0,730	2,2	5,0	0,860
7	Δ	0,75	1	0,080	0,770	2,2	5,5	0,870
8	Y	1	1	0,065	0,720	2,2	5,5	0,870
9	Δ	1,1	1	0,075	0,775	2,2	5,5	0,870
10	Y	1,5	1	0,072	0,810	2,2	6,5	0,850
11	Δ	2,2	1	0,069	0,830	2,2	6,5	0,870
12	Y	3	1	0,067	0,845	2,2	6,5	0,880
13	Δ	4	1	0,065	0,865	2,2	7,5	0,890
14	Y	5,5	1	0,064	0,875	2,2	7,5	0,910
15	Δ	11	1	0,050	0,840	2,4	7,5	0,890
16	Y	0,09	2	0,086	0,550	2,2	5,0	0,600
17	Δ	0,12	2	0,080	0,630	2,2	5,0	0,660
18	Y	0,18	2	0,087	0,640	2,2	5,0	0,640
19	Δ	0,25	2	0,080	0,680	2,2	5,0	0,650
20	Y	0,37	2	0,090	0,680	2,2	5,0	0,690
21	Δ	0,55	2	0,087	0,705	2,2	4,5	0,700
22	Y	0,75	2	0,087	0,720	2,2	4,5	0,730
23	Δ	1,1	2	0,067	0,750	2,2	5,0	0,810
24	Y	1,5	2	0,067	0,770	2,2	5,0	0,830
25	Δ	2,2	2	0,066	0,800	2,2	6,0	0,830
26	Y	3	2	0,066	0,820	2,2	6,5	0,830
27	Δ	4	2	0,065	0,840	2,2	6,0	0,840
28	Y	5,5	2	0,065	0,855	2,2	7,0	0,860
29	Δ	7,5	2	0,064	0,875	2,2	7,5	0,860
30	Y	11	2	0,060	0,875	2,4	7,5	0,870

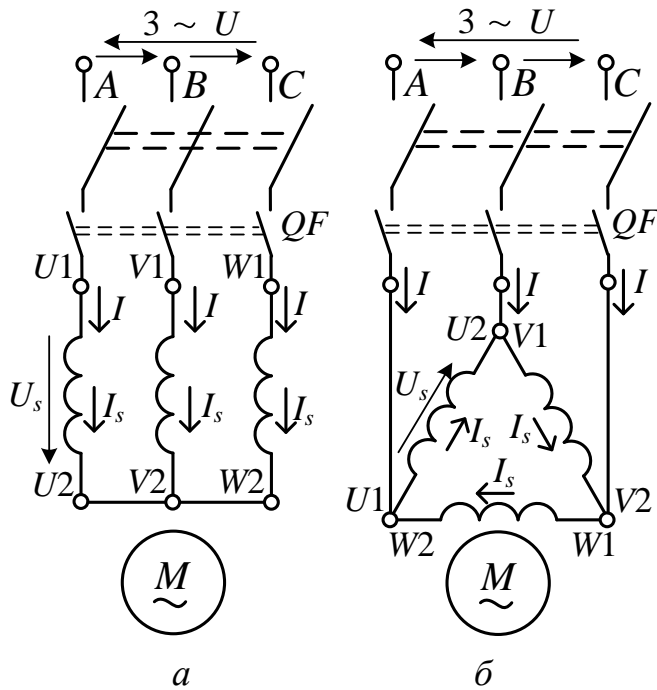


Рисунок 3 – Електричні схеми вмикання трифазного асинхронного двигуна при з'єднанні фазних обмоток статора «зіркою» (а) та «трикутником» (б)

двигуна;

б) штучну механічну характеристику при зниженій напрузі живильної мережі на 15 %, тобто при напрузі $0,85U_N$;

в) штучну механічну характеристику двигуна за умови, що сумарний активний опір у кожній фазі обмотки ротора $R_r + R_{rr}$ став більшим за власний опір фазної обмотки R_r , при якому розраховувались попередні характеристики. Тепер сумарний опір $R_r + R_{rr} = 2,5R_r$ (це можливо, якщо би двигун мав фазний ротор (рис. 4), тоді б у фазі обмотки ротора можна було увімкнути регульовальні реостати з опорами R_{rr}); при цьому індуктивний опір фазної обмотки ротора X_{ork} не змінюється; напругу мережі вважати такою, що дорівнює U_N .

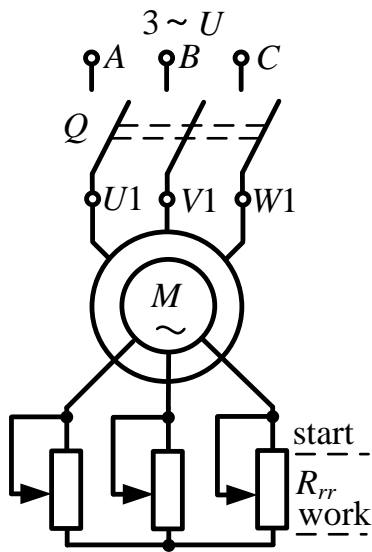


Рисунок 4 – Електрична схема трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором

характеристики визначити пусковий обертальний момент двигуна M_1 і кратність цього моменту $k_{M1} = \frac{M_1}{M_N}$;

5) розрахувати і побудувати в одній координатній системі три механічні характеристики – залежності $n(M)$, де n – частота обертання ротора, за такими умовами:

а) природну механічну характеристику при заданій напрузі мережі, що відповідає номінальній лінійній напрузі U_N , а також визначити з характеристики діапазон частот обертання ротора, при яких можлива стійка робота

Розрахування проводити для асинхронних двигунів номінальною лінійною напругою 220/380 В при частоті 50 Гц. Перше значення напруги відповідає схемі «трикутник» (див.

рис. 3, б), у цьому випадку номінальні лінійна і фазна напруги однакові, тобто $U_{sN} = U_N$. Друге значення напруги відповідає схемі «зірка» (рис.3, а), у цьому випадку номінальні лінійна і фазна напруги пов'язані співвідношенням $U_{sN} = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$.

У табл. 3 позначено: P_N – номінальна потужність; p – кількість пар полюсів, утворюваних магнітним полем обмотки статора; s_N – номінальне ковзання; η_N – номінальний ККД; $k_{Mm} = \frac{M_{\max}}{M_N}$ – перевантажувальна здатність (M_{\max}, M_N – максимальний і номінальний моменти відповідно); $k_{I1} = \frac{I_1}{I_N}$ – кратність пускового струму (I_1, I_N – пусковий і номінальний струм асинхронного двигуна відповідно); $\cos \varphi_N$ – номінальний коефіцієнт потужності. Також задано схему з'єднання обмотки статора (Y – зірка, Δ – трикутник).

Принцип розв'язання задачі 3 подано нижче в прикладах 7–11.

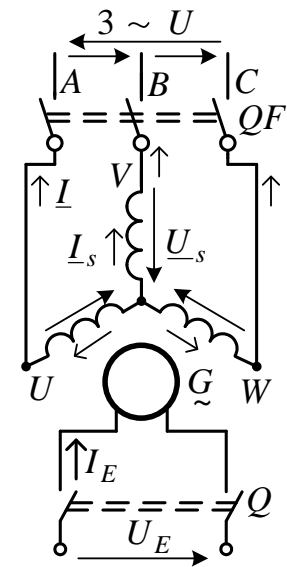


Рисунок 5 – Схема вмикання трифазного синхронного генератора

Задача 4. Параметри та характеристики трифазного синхронного генератора

Для заданого варіанта (табл. 4) трифазного синхронного генератора (рис. 5) виконати завдання:

1) визначити номінальні фазну напругу U_{sN} , фазний I_{sN} і лінійний I_N струми обмотки статора; синхронну частоту обертання n_s ; кутову швидкість обертання ротора Ω , номінальний обертальний момент на валу ротора M_N ; фазовий зсув φ_N між фазними напругою та струмом обмотки статора; реактивний спад напруги U_{ss} в обмотці статора;

2) побудувати спрощену векторну діаграму;

3) за допомогою векторної діаграми і подальших розрахунків визначити ЕРС обмотки статора від магнітного поля обмотки ротора E_{so} ; кут навантаження в номінальному режимі θ_{nom} ; струм збудження у номінальному режимі I_{EN} ;

Таблиця 4 – Номінальні дані та параметри трифазних синхронних генераторів

Номер варіанта	P_N , МВт	U_N , кВТ	$2p$	$\cos \varphi_N$	η_N	X_{s*} , в.о.	I_{Eo} , А
1	25	6,3	2	0,80	0,977	1,61	108
2	30	6,3	2	0,80	0,979	2,36	126
3	30	6,3	2	0,85	0,980	1,69	115
4	30	10,5	2	0,85	0,979	1,70	154
5	30	10,5	2	0,90	0,981	1,39	139
6	60	10,5	2	0,85	0,983	1,57	216
7	60	10,5	2	0,80	0,982	1,43	208
8	100	10,5	4	0,85	0,983	1,92	242
9	100	15,75	2	0,90	0,984	1,57	284
10	100	15,75	2	0,80	0,985	2,04	272
11	150	18	2	0,85	0,985	1,85	537
12	150	18	2	0,80	0,983	2,14	513
13	165	18	2	0,85	0,985	1,71	521
14	200	15,75	2	0,80	0,986	2,12	724
15	200	15,75	2	0,90	0,986	1,52	44
16	220	15,75	2	0,85	0,986	1,93	744
17	220	15,75	2	0,80	0,986	2,27	522
18	300	20	2	0,85	0,986	1,72	945
19	300	20	2	0,90	0,985	2,00	1105
20	320	20	2	0,85	0,986	1,69	945
21	320	20	2	0,90	0,985	2,00	1105
22	500	20	4	0,85	0,987	2,06	1840
23	500	20	2	0,85	0,987	1,99	1934
24	500	20	2	0,85	0,987	2,16	1615
25	500	24	2	0,90	0,987	2,16	1700
26	800	24	2	0,90	0,988	1,90	2276
27	800	24	2	0,90	0,988	1,77	1812
28	1000	24	4	0,90	0,987	1,64	1635
29	1200	27	2	0,90	0,989	1,59	1763
30	12	10,5	2	0,85	0,975	1,85	114

максимальний обертальний момент M_{\max} та перевантажувальну здатність генератора k_{Mm} .

В табл. 4 позначено: P_N – номінальна потужність; U_N – номінальна напруга (лінійна); $2p$ – кількість полюсів; $\cos\varphi_N$ – номінальний коефіцієнт потужності; η_N – номінальний ККД; X_{s*} – синхронний індуктивний опір (у відносних одиницях – в.о.); струм збудження неробочого ходу I_{Eo} при номінальній напрузі U_N . Частота напруги та інших величин генератора f_s становить 50 Гц. Схема з'єднання обмотки статора – «зірка». Активним опором обмотки статора можна знехтувати через його незначність, магнітну систему генератора можна вважати ненасиченою, ротор – неявнополюсним.

Принцип розв'язання задачі 4 подано нижче в прикладі 12.

4. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Приклад 1. Однофазний трансформатор (див. рис. 1) має номінальні дані: повна потужність $S_N = 12$ кВ·А; напруги первинної і вторинної обмоток $U_{pN} = 220$ В і $U_{sN} = 133$ В. Напруга короткого замикання трансформатора $u_k = 5\%$; струм неробочого ходу $i_o = 8\%$ від номінального струму первинної обмотки I_{pN} .

Визначити: коефіцієнт трансформації n ; номінальні струми первинної I_{pN} і вторинної I_{sN} обмоток; струми аварійного короткого замикання цих обмоток $I_{pk\ emer}$, $I_{sk\ emer}$; струм неробочого ходу первинної обмотки I_{po} .

Розрахунок. Коефіцієнт трансформації $n = \frac{U_{pN}}{U_{sN}} = \frac{220}{133} = 1,654$.

Номінальні струми обмоток:

$$I_{pN} = \frac{S_N}{U_{pN}} = \frac{12 \cdot 10^3}{220} = 54,5 \text{ А}; \quad I_{sN} = \frac{S_N}{U_{sN}} = \frac{12 \cdot 10^3}{133} = 90,2 \text{ А}.$$

Напруга в режимі дослідного короткого замикання

$$U_{pk} = \frac{u_k \cdot U_{pN}}{100} = \frac{5 \cdot 220}{100} = 11 \text{ В}.$$

Струми аварійного короткого замикання обмоток при номінальній напрузі:

$$I_{pk\ emer} = I_{pN} \frac{U_{pN}}{U_{pk}} = 54,5 \cdot \frac{220}{11} = 1090 \text{ А};$$

$$I_{sk\ emer} = I_{pk\ emer} \cdot n = 1090 \cdot 1,654 = 1803 \text{ А}.$$

Струм у режимі неробочого ходу $I_{po} = \frac{i_o \cdot I_{pN}}{100} = \frac{8 \cdot 54,5}{100} = 4,36 \text{ А.}$

Приклад 2. Однофазний трансформатор (див. рис. 1) має номінальні дані: напруга первинної обмотки $U_{pN} = 660 \text{ В}$, напруга вторинної обмотки $U_{sN} = 400 \text{ В}$, струм первинної обмотки $I_{pN} = 3,8 \text{ А}$. В режимі дослідного короткого замикання потужність втрат становить $P_k = 80 \text{ Вт}$, напруга $U_{pk} = 33 \text{ В}$. Навантаження має активно-індуктивний характер при $\cos \varphi_{load} = 0,75$.

Розрахувати та побудувати зовнішню характеристику трансформатора.

Розрахунок. Зовнішньою характеристикою трансформатора є залежність вторинної напруги U_s від коефіцієнта навантаження β , тобто $U_s(\beta)$.

Коефіцієнт навантаження визначається як відношення значення струму вторинної обмотки I_s до його номінального значення I_{sN} : $\beta = \frac{I_s}{I_{sN}}$.

Для інженерних розрахунків зовнішню характеристику можна визначати за наближеною формулою [6]:

$$U_s = U_{so} \left[1 - \beta \frac{u_k}{100} \cdot \cos(\varphi_{load} - \varphi_k) \right],$$

де U_{so} – напруга вторинної обмотки в режимі неробочого ходу;

u_k – напруга короткого замикання у відсотках (%) від номінального значення U_{pN} , що визначаються виразами:

$$U_{so} = U_{sN} = 400 \text{ В}; \quad u_k = \frac{U_{pk}}{U_{pN}} \cdot 100 \% = \frac{33}{660} \cdot 100 \% = 5 \ \% .$$

Кут зсуву фаз між струмом і напругою на навантаженні

$$\varphi_{load} = \arccos(\cos \varphi_{load}) = \arccos(0,75) = 41,41^\circ .$$

Кут зсуву фаз між струмом і напругою при дослідному короткому замиканні

$$\varphi_k = \arccos\left(\frac{P_k}{U_{pk} \cdot I_{pN}}\right) = \arccos\left(\frac{80}{33 \cdot 3,8}\right) = 50,36^\circ .$$

$$\text{Тоді } U_s = 400 \left[1 - \beta \frac{5}{100} \cos(41,41^\circ - 50,36^\circ) \right] = 400(1 - 0,0494\beta) .$$

Зовнішня характеристика (рис. 6) при використанні цього наближеного виразу являє собою пряму лінію, що проводиться через дві точки: точку A з координатами $\beta = 0$; $U_{so} = 400 \text{ В}$, точку B з координатами $\beta = 1$; $U_s = 380 \text{ В}$.

Приклад 3. Однофазний трансформатор (див. рис. 1) має такі дані: повна номінальна потужність $S_N = 6$ кВ·А; втрати потужності в режимі неробочого ходу $P_o = 60$ Вт; втрати потужності в режимі дослідного короткого замикання $P_k = 200$ Вт. Навантаження має активно-індуктивний характер при $\cos \varphi_{load} = 0,75$.

Розрахувати та побудувати графік характеристики ККД трансформатора.

Розрахунок. Для інженерних розрахунків характеристика ККД трансформатора визначається як залежність ККД від коефіцієнта навантаження $\eta(\beta)$. Залежність $\eta(\beta)$ можна визначати за наближеною формулою [6]:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_N \cdot \cos \varphi_{load}}{\beta \cdot S_N \cdot \cos \varphi_{load} + P_o + \beta^2 \cdot P_k}.$$

Підставляючи в цю формулу значення заданих величин, визначаємо для даного трансформатора залежність $\eta(\beta)$:

$$\eta = \frac{\beta \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,75}{\beta \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,75 + 60 + \beta^2 \cdot 200} = \frac{4500\beta}{4500\beta + 60 + 200\beta^2}.$$

Для ряду конкретних значень β від неробочого ходу ($\beta = 0$) до номінального навантаження ($\beta = 1$) визначаємо числово залежність $\eta(\beta)$, що наведена в табл. 5.

Розрахована крива залежності $\eta(\beta)$ побудована на рис. 6.

Таблиця 5 – Результати розрахунку характеристики ККД трансформатора

β	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
η	0	0,788	0,879	0,93	0,945	0,951	0,953	0,953	0,952	0,95	0,948	0,945

Приклад 4. Двигун постійного струму паралельного збудження (див. рис. 2) має в номінальному режимі: потужність $P_N = 90$ кВт; напругу $U_N = 220$ В; частоту обертання $n_N = 1060$ об/хв; ККД $\eta_N = 0,892$. Опір кола обмотки якоря становить $R_a = 0,03$ Ом; опір обмотки збудження $R_E = 25,6$ Ом.

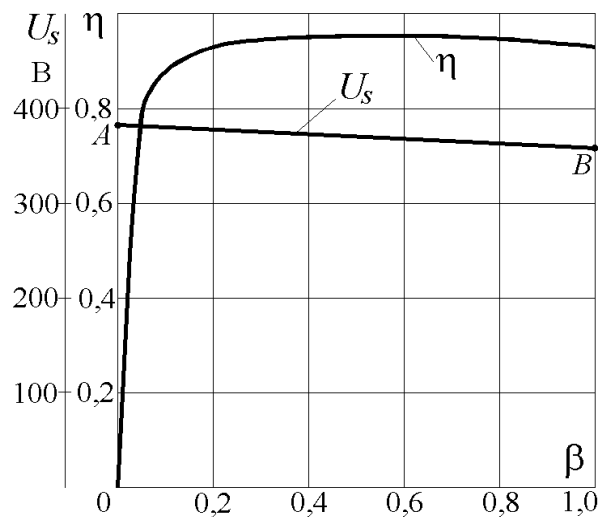


Рисунок 6 – Зовнішня характеристика і характеристика ККД трансформатора

Визначити для номінального режиму: потужність $P_{in\ nom}$ і струм I_N , які двигун споживає з мережі; струми збудження I_{EN} і якоря I_{aN} ; сумарні втрати потужності в двигуні ΔP_{nom} ; ЕРС якоря E_{nom} ; електромагнітну потужність $P_{em\ nom}$; обертальні електромагнітний $M_{em\ nom}$ і корисний M_N моменти.

Для спрощення розрахунків реакцією якоря можна знехтувати.

Розрахунок. Для номінального режиму:

– потужність і струм, які двигун споживає з мережі:

$$P_{in\ nom} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{90}{0,892} = 100,9 \text{ кВт}; \quad I_N = \frac{P_{in\ nom}}{U_N} = \frac{100,9 \cdot 10^3}{220} = 458,6 \text{ А};$$

– струм збудження і струм обмотки якоря

$$I_{EN} = \frac{U_N}{R_E} = \frac{220}{25,6} = 8,6 \text{ А}; \quad I_{aN} = I_N - I_{EN} = 458,6 - 8,6 = 450 \text{ А};$$

– сумарні втрати потужності в двигуні

$$\Delta P_{nom} = P_{in\ nom} - P_N = 100,9 - 90 = 10,9 \text{ кВт};$$

– ЕРС обмотки якоря

$$E_{nom} = U_N - I_{aN} \cdot R_a = 220 - 450 \cdot 0,03 = 206,5 \text{ В};$$

– електромагнітна потужність

$$P_{em\ nom} = E_{nom} \cdot I_{aN} = 206,5 \cdot 450 = 92925 \text{ Вт};$$

– обертальні електромагнітний і корисний моменти

$$M_{em\ nom} = 9,55 \cdot \frac{P_{em\ nom}}{n_N} = \frac{92925}{1060} = 837,2 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_N = 9,55 \cdot \frac{P_N}{n_N} = \frac{90 \cdot 10^3}{1060} = 810,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Приклад 5. Двигун постійного струму паралельного збудженням (рис. 2) має в номінальному режимі напругу $U_N = 440 \text{ В}$; струм обмотки якоря $I_{aN} = 200 \text{ А}$. Опір кола обмотки якоря становить $R_a = 0,15 \text{ Ом}$.

Визначити опір регулювального реостата R_{ar} , який потрібно увімкнути в коло обмотки якоря для обмеження її пускового струму до $I_{a\ start} = 2,2I_{aN}$, якщо двигун вмикається при пуску на номінальну напругу U_N . Знайти значення напруги живлення U_{start} , до якого необхідно її знизити, щоби пусковий струм обмотки якоря не перевищував значення $I_{a\ start} = 2,5I_{aN}$ за відсутності регулювального реостата.

Розрахунок. Опір регулювального реостата при U_N визначається з формули для струму обмотки якоря:

$$I_a = \frac{U_N}{R_a + R_{ar}} = 2,2 \cdot I_{aN}.$$

Після перетворення опір регулювального реостата

$$R_{ar} = \frac{U_N}{2,2I_{aN}} - R_a = \frac{440}{2,2 \cdot 200} - 0,15 = 0,85 \text{ Ом.}$$

Напруга живлення U_{start} при опорі $R_{ar} = 0$ для струму $I_{a start} = 2,5I_{aN}$ визначається з формули для струму обмотки якоря:

$$U_{start} = 2,5 \cdot I_{aN} \cdot R_a = 2,5 \cdot 200 \cdot 0,15 = 75 \text{ В.}$$

Приклад 6. Двигун постійного струму паралельного збудження (див. рис. 2) має номінальні дані: напруга $U_N = 220 \text{ В}$; струм обмотки якоря $I_{aN} = 130 \text{ А}$; струм збудження $I_{EN} = 5 \text{ А}$; частота обертання $n_N = 1000 \text{ об/хв}$. Опір кола обмотки якоря $R_a = 0,1 \text{ Ом}$.

Побудувати механічні характеристики $n(M)$ при номінальній нарузі U_N : а) природну; б) штучну – за умови, що в коло обмотки якоря увімкнено регулювальний реостат з опором $R_{ar} = 0,2 \text{ Ом}$ (n – частота обертання якоря; M – обертальний момент).

Аналітично або користуючись природною механічною характеристикою, визначити частоту обертання якоря при $M = 0,5M_N$.

Розрахунок. Відомо, що ЕРС двигуна E й електромагнітний момент M_{em} визначаються формулами:

$$E = C_E \cdot \Phi \cdot n; \quad (1)$$

$$M_{em} = C_M \cdot \Phi \cdot I_a, \quad (2)$$

де C_E , C_M – електрична і механічна сталі двигуна відповідно;

Φ – магнітний потік.

У номінальному режимі:

$$E_{nom} = C_E \cdot \Phi_{nom} \cdot n_N, \quad (3)$$

$$M_{em nom} = C_M \cdot \Phi_{nom} \cdot I_{aN}. \quad (4)$$

З формул (1)–(4) маємо:

$$\frac{E}{E_{nom}} = \frac{\Phi \cdot n}{\Phi_{nom} \cdot n_N}, \quad (5)$$

$$\frac{M_{em}}{M_{em nom}} = \frac{\Phi \cdot I_a}{\Phi_{nom} \cdot I_{a nom}}. \quad (6)$$

Якщо напруга живлення є незмінною, то в двигуні паралельного збудження магнітний потік Φ майже не змінюється навіть при зміні навантаження. Тому, враховуючи, що $\Phi = \Phi_{nom}$, маємо з формул (5) і (6):

$$n = n_N \frac{E}{E_{nom}}, \quad (7)$$

$$I_a = I_{aN} \frac{M_{em}}{M_{em nom}}. \quad (8)$$

Відомо, що ЕРС також визначається формулою:

$$E = U - I_a \cdot R_a. \quad (9)$$

Значення струму з формули (8) підставляємо в (9) і отримуємо:

$$E = U - I_{aN} \cdot R_a \frac{M_{em}}{M_{em nom}}. \quad (10)$$

Підставляючи в формулу (7) вираз ЕРС E з формули (10), маємо базову формулу для розрахування механічних характеристик:

$$n = n_N \frac{U}{E_{nom}} - \frac{I_{aN} \cdot n_N}{E_{nom} \cdot M_{em nom}} M_{em} \cdot R_a. \quad (11)$$

Для цього двигуна визначаються:

– номінальна ЕРС

$$E_{nom} = U_N - I_{aN} \cdot R_a = 220 - 130 \cdot 0,1 = 207 \text{ В};$$

– номінальна електромагнітна потужність

$$P_{em nom} = E_{nom} \cdot I_{aN} = 207 \cdot 130 = 26910 \text{ Вт};$$

– номінальний електромагнітний момент

$$M_{em nom} = 9,55 \frac{P_{em nom}}{n_N} = 9,55 \cdot \frac{26910}{1000} = 257 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Для спрощеного визначення **механічних характеристик** обертальний момент на валу M заміняють електромагнітним моментом M_{em} [3].

Природна механічна характеристика $n(M)$ при $U = U_N$ визначається за базовою формулою (11):

$$n = n_N \frac{U_N}{E_{nom}} - \frac{I_{aN} \cdot n_N}{E_{nom} \cdot M_{em nom}} M_{em} \cdot R_a = n_o - C \cdot M_{em} \cdot R_a, \quad (12)$$

де частота обертання якоря при неробочому ході ($M = 0$)

$$n_o = n_N \cdot \frac{U_N}{E_{nom}} = 1000 \cdot \frac{220}{207} = 1063 \text{ об/хв};$$

стала двигуна

$$C = \frac{I_{aN} \cdot n_N}{E_{nom} \cdot M_{em nom}} = \frac{130 \cdot 1000}{207 \cdot 257} = 2,444 \frac{\text{об}}{\text{хв} \cdot \text{Ом} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}}.$$

Природна механічна характеристика є приблизно прямою лінією (рис. 7), яку можна побудувати за двома точками: точкою A з координатами ($M = 0$,

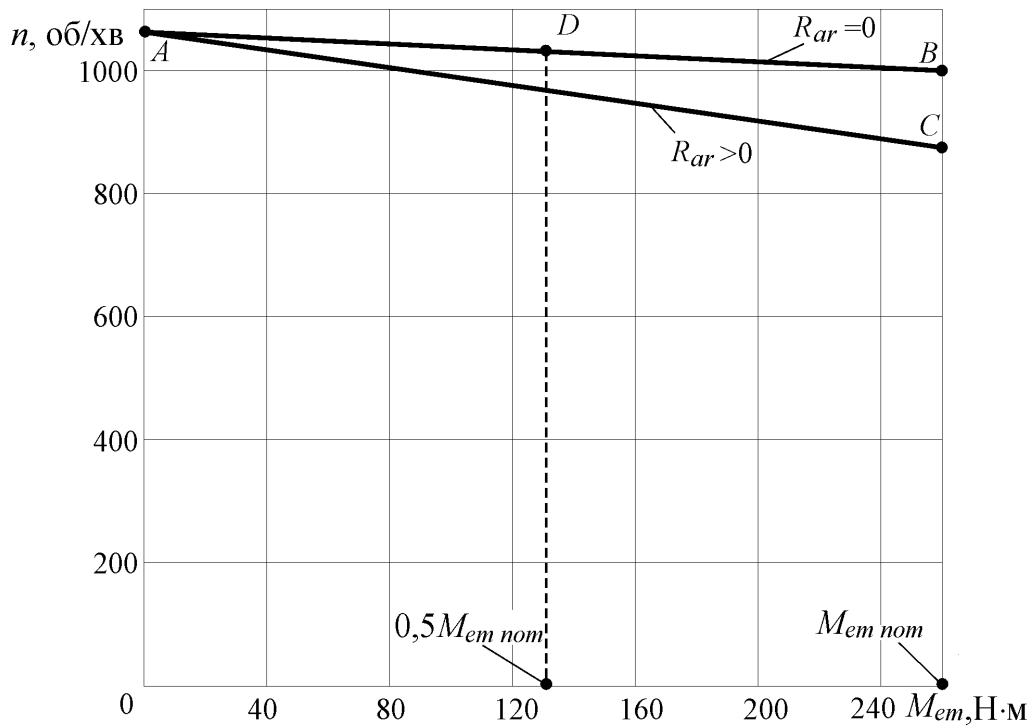


Рисунок 7 – Механічні характеристики ДПС паралельного збудження

$n = n_o = 1063$ об/хв) і точкою B з координатами ($M = M_{em\ nom} = 257$ Н·м, $n = n_N = 1000$ об/хв).

Штучна механічна характеристика $n(M)$ при вмиканні регулювального реостата з опором $R_{ar} = 0,2$ Ом і при збереженні $U = U_N$ визначається за базовими формулами (11) і (12) заміною R_a на $R_a + R_{ar}$:

$$n = n_N \frac{U_N}{E_{nom}} - \frac{I_{aN} \cdot n_N}{E_{nom} \cdot M_{em\ nom}} M_{em} \cdot (R_a + R_{ar}) = n_o - C \cdot M_{em} \cdot (R_a + R_{ar}),$$

де частота обертання якоря при неробочому ході n_o та стала двигуна C зберігаються, як і для випадку розрахунку природної механічної характеристики.

Штучна механічна характеристика також є прямою лінією (див. рис. 7), яка також будується за двома точками. Точка A має координати ($M = 0$, $n = n_o = 1063$ об/хв). Для другої точки C при номінальному моменті $M_{em} = M_{em\ nom} = 257$ Н·м розрахуємо частоту обертання:

$$n = n_o - C \cdot M_{em} \cdot (R_a + R_{ar}) = 1063 - 2,444 \cdot 257 \cdot (0,1 + 0,2) = 875 \text{ об/хв.}$$

Частота обертання n' при U_N і $M_{em} = 0,5 \cdot M_{em\ nom}$ і при відсутності регулювального реостата визначається за формулою (12):

$$n' = n_o - C \cdot 0,5 \cdot M_{em\ nom} \cdot R_a = 1063 - 2,444 \cdot 0,5 \cdot 257 \cdot 0,1 = 1031,5 \text{ об/хв.}$$

Такий самий результат отримуємо графічно з природної механічної характеристики для $M_{em} = 0,5 \cdot M_{em\ nom}$ (рис. 7, точка D).

Приклад 7. Трифазний асинхронний двигун має номінальну напругу 220/380 В при частоті $f_s = 50$ Гц; номінальне ковзання $s_N = 0,05$; кількість пар полюсів $p = 6$; перевантажувальну здатність $k_{Mm} = 1,8$. Схема з'єднання обмоток статора – «зірка» (див. рис. 3, а). Вибрати лінійну напругу живильної мережі U_N і визначити синхронну частоту обертання магнітного поля статора n_s , номінальну n_N і критичну n_{cr} частоти обертання ротора.

Розрахунок. В маркуванні асинхронного двигуна друге значення напруги відповідає схемі з'єднання фазних обмоток статора «зірка». Тому лінійна напруга мережі $U_N = 380$ В.

Синхронна частота обертання поля статора

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p} = \frac{60 \cdot 50}{6} = 500 \text{ об/хв.}$$

Номінальна частота обертання ротора

$$n_N = n_s(1 - s_N) = 500(1 - 0,05) = 475 \text{ об/хв.}$$

Щоб визначити критичну частоту обертання ротора $n_{cr} = n_s(1 - s_{cr})$, необхідно знати критичне ковзання двигуна s_{cr} . Це таке значення ковзання s , при якому обертальний момент M досягає максимального значення M_{\max} .

Для визначення величини ковзання s_{cr} використовуємо відому формулу Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}}.$$

У номінальному режимі роботи двигуна, при якому номінальному значенню ковзання відповідає номінальне значення обертального моменту,

$$M_N = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\frac{s_N}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s_N}}.$$

Зважаючи на те що перевантажувальна здатність $k_{Mm} = \frac{M_{\max}}{M_N}$, з

попередньої формули маємо

$$\frac{s_{cr}}{s_N} + \frac{s_N}{s_{cr}} = 2 \cdot k_{Mm},$$

звідки отримуємо квадратне рівняння

$$s_{cr}^2 - 2 \cdot k_{Mm} \cdot s_N \cdot s_{cr} + s_N^2 = 0,$$

розв'язання якого дає вираз та значення критичного ковзання

$$s_{cr} = s_N (k_{Mm} + \sqrt{k_{Mm}^2 - 1}) = 0,05(1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1}) = 0,165.$$

Таким чином, критична частота обертання ротора

$$n_{cr} = n_s (1 - s_{cr}) = 500 \cdot (1 - 0,165) = 417,5 \text{ об/хв.}$$

Приклад 8. Трифазний асинхронний двигун має у номінальному режимі потужність на валу $P_N = 22$ кВт; напругу 220/380 В; ККД $\eta_N = 0,9$; коефіцієнт потужності 0,88. Кратність пускового струму $k_{I1} = 5,5$. Схема з'єднання фазних обмоток статора – «трикутник» (див. рис. 3, б). Вибрати лінійну напругу живильної мережі U_N і визначити номінальні та пускові струми обмотки статора.

Розрахунок. При з'єднанні обмотки статора трикутником $U_N = U_{sN}$, тому лінійна напруга мережі збігається з лінійною та фазною напругами асинхронного двигуна: $U_N = 220$ В.

Зважаючи на те що потужність, яка споживається двигуном з мережі, має вираз, з одного боку, $P_{in nom} = \frac{P_N}{\eta_N}$, а з іншого – $P_{in nom} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi_{sN}$, отримуємо номінальні лінійний та фазний струми обмотки статора двигуна:

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta_N \cdot \cos \varphi_{sN}} = \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,88} = 72,9 \text{ А};$$

$$I_{sN} = \frac{I_N}{\sqrt{3}} = \frac{72,9}{\sqrt{3}} = 41,7 \text{ А.}$$

Пускові лінійний та фазний струми обмотки статора двигуна

$$I_{start} = k_{I1} \cdot I_N = 5,5 \cdot 72,9 = 401 \text{ А}; \quad I_{s start} = k_{I1} \cdot I_{sN} = 5,5 \cdot 41,7 = 229 \text{ А.}$$

Приклад 9. Трифазний асинхронний двигун вмикається в мережу з лінійною напругою $U_N = 380$ В і має в номінальному режимі потужність на валу $P_N = 45$ кВт; напругу 220/380 В; частоту обертання ротора $n_N = 580$ об/хв; ККД $\eta_N = 0,9$; коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{sN} = 0,81$. Крім того, двигун має кратність пускового струму $k_{I1} = 5,0$; його перевантажувальна здатність $k_{Mm} = 2,2$. Визначити номінальну потужність, споживану двигуном із мережі; $P_{in nom}$, суму всіх втрат потужності у двигуні ΔP_{nom} ; номінальний і пусковий струми обмотки статора двигуна; номінальний M_N і максимальний M_{max} обертальні моменти.

Розрахунок. Номінальна потужність, споживана двигуном із мережі,

$$P_{in nom} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{45}{0,9} = 50 \text{ кВт.}$$

Сума всіх втрат у двигуні

$$\Delta P_{nom} = P_{in nom} - P_N = 50 - 45 = 5 \text{ кВт.}$$

При заданій напрузі мережі $U_N = 380 \text{ В}$ фазні обмотки статора з'єднуються за схемою «зірка» (рис. 3, а). При цьому номінальні лінійний і фазний струми однакові:

$$I_N = I_{sN} = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta_N \cdot \cos \phi_{sN}} = \frac{45 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9 \cdot 0,81} = 93,8 \text{ А.}$$

Пусковий лінійний та фазний струми обмотки статора

$$I_{start} = I_{s start} = k_{I1} \cdot I_N = 5,0 \cdot 93,8 = 469 \text{ А.}$$

Номінальний і максимальний обертальні моменти

$$M_N = 9,55 \frac{P_N}{n_N} = 9,55 \cdot \frac{45 \cdot 10^3}{580} = 741 \text{ Н·м;}$$

$$M_{max} = k_{Mm} \cdot M_N = 2,2 \cdot 741 = 1630 \text{ Н·м.}$$

Приклад 10. Трифазний асинхронний двигун має в номінальному режимі: потужність на валу $P_N = 15 \text{ кВт}$; частоту обертання магнітного поля статора $n_s = 1500 \text{ об/хв}$; ковзання $s_N = 0,05$. Задані перевантажна здатність з обертального моменту $k_{Mm} = 2,5$; кратність пускового моменту $k_{M1} = 1,8$. Розрахувати і побудувати залежність обертального моменту від ковзання $M(s)$, визначити розрахунковий пусковий обертальний момент M_1 і його розрахункову кратність k_{M1} відносно номінального моменту.

Розрахунок. Для наближених практичних розрахунків залежність $M(s)$ визначається за формулою Клоса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{max}}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}} = \frac{2 \cdot 250}{\frac{s}{0,24} + \frac{0,24}{s}} \text{ Н·м,}$$

куди увійшли значення критичного ковзання

$$s_{cr} = s_N (k_{Mm} + \sqrt{k_{Mm}^2 - 1}) = 0,05 \cdot (2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1}) = 0,24,$$

а також значення максимального обертального моменту

$$M_{max} = k_{Mm} \cdot M_N = 2,5 \cdot 100 = 250 \text{ Н·м,}$$

де номінальний обертальний момент

$$M_N = 9,55 \frac{P_N}{n_N} = 9,55 \cdot \frac{15 \cdot 10^3}{1425} = 100 \text{ Н·м;}$$

номінальна частота обертання ротора двигуна

$$n_N = n_s (1 - s_N) = 1500 \cdot (1 - 0,05) = 1425 \text{ об/хв.}$$

Тепер, задаючись значеннями s від 0 до 1, необхідно визначити значення

обертального моменту за формулою Клоса. При цьому зауважимо, що на частині залежності $M(s)$, яка відповідає стійкій роботі двигуна ($0 \leq s \leq s_{cr}$), достатньо мати чотири точки при:

$$s = 0; \quad s = s_N; \quad s_N \leq s \leq s_{cr}; \quad s = s_{cr}.$$

На ділянці залежності $M(s)$ з нестійкою роботою двигуна ($s_{cr} < s \leq 1$) можна задатися значеннями ковзання s : 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1.

Результати розрахунку зведено до табл. 6.

Таблиця 6 – Результати розрахунку залежності $M(s)$

s	0	$s_N = 0,05$	0,1	$s_{cr} = 0,24$	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	0	100	178	250	244	221	172	137	113

За даними табл. 6 на рис. 8 кривою 1 дана залежність $M(s)$, яку називають внутрішньою механічною характеристикою асинхронного двигуна.

Пусковий момент двигуна визначається при $s=1$ і дорівнює $M_1 = 113 \text{ Н} \cdot \text{м}$, тоді кратність цього моменту відносно номінального

$$k_{M1} = \frac{M_1}{M_N} = \frac{113}{100} = 1,13.$$

Очевидно, що розрахункове значення k_{M1} виявляється меншим за задане паспортне значення $k_{M1} = 1,8$. Це пояснюється тим, що формула Клоса не враховує явище витіснення струму в провідниках короткозамкненої обмотки ротора. Тому дані залежності $M(s)$ при $s_{cr} < s \leq 1$ слід вважати лише демонстраційними. Але у практиці проектування асинхронних двигунів явище витіснення струму в провідниках короткозамкненої обмотки

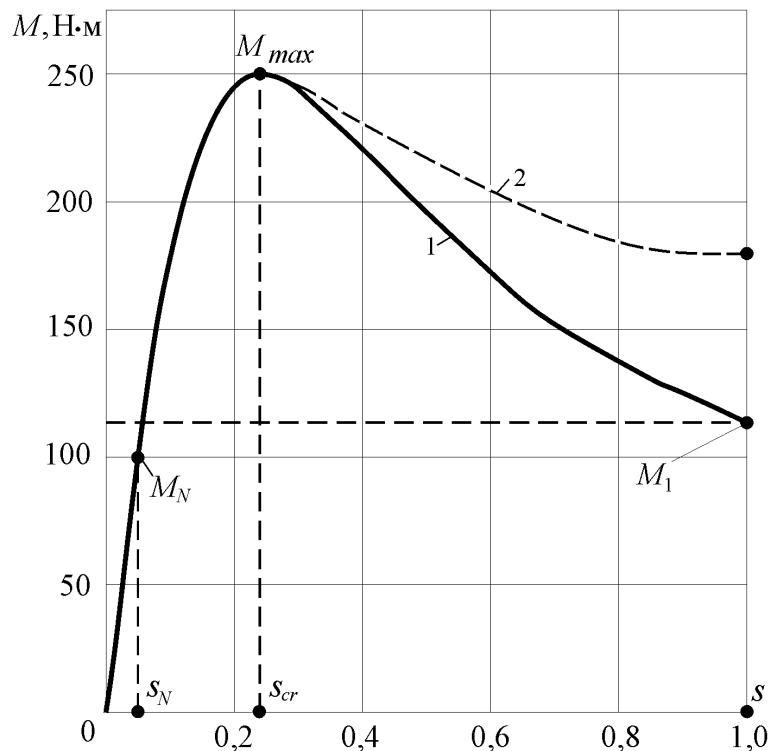


Рисунок 8 – Внутрішня механічна характеристика асинхронного двигуна

ротора враховується, і тоді отримуються достовірніші параметри двигуна.

Якщо взяти $k_{M1} = 1,8$, то за паспортними даними маємо пусковий момент $M_1 = k_{M1} \cdot M_{\max} = 180$ Н·м. На рис. 8 показано точку для цього значення пускового моменту і пунктиром показано штучно скореговану характеристику (крива 2).

Приклад 11. Трифазний асинхронний двигун має в номінальному режимі потужність на валу $P_N = 11$ кВт; частоту обертання магнітного поля статора $n_s = 1000$ об/хв; ковзання ротора $s_N = 0,06$. Перевантажувальна здатність з обертового моменту $k_{Mm} = 2,5$. Розрахувати і побудувати в одній координатній системі три механічні характеристики – залежності частоти обертання ротора від обертового моменту $n(M)$ – за такими умовами:

а) природну механічну характеристику при напрузі мережі 380 В, а також визначити з неї діапазон частот обертання ротора, при яких можлива стійка робота двигуна;

б) штучну механічну характеристику при зниженій напрузі живильної мережі на 10 %, тобто при $U = 0,9U_N$;

в) штучну механічну характеристику при номінальній напрузі U_N , але за умови, що сумарний активний опір у кожній фазі обмотки ротора став у двічі більшим, ніж у двигуна, для якого розраховані попередні характеристики, тобто $R_r + R_{rr} = 2R_r$: це можливо, якщо б цей двигун був із фазним ротором (див. рис. 4), тоді у фазні обмотки ротора можна було б увімкнути регулювальні реостати з опорами R_{rr} , які дорівнюють R_r , а при цьому, як відомо [3], індуктивний опір фаз обмотки нерухомого ротора X_{crk} не змінюється.

Розрахунок. Номінальна частота обертання ротора двигуна

$$n_N = n_s(1 - s_N) = 1000(1 - 0,06) = 940 \text{ об/хв.}$$

Критичне ковзання

$$s_{cr} = s_N(k_{Mm} + \sqrt{k_{Mm}^2 - 1}) = 0,06(2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1}) = 0,288.$$

Номінальний і максимальний обертові моменти

$$M_N = 9,55 \frac{P_N}{n_N} = 9,55 \cdot \frac{11 \cdot 10^3}{940} = 112 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\max} = k_{Mm} \cdot M_N = 2,5 \cdot 112 = 280 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Природну механічну характеристику $n(M)$ при $U = U_N$ отримуємо шляхом окремих розрахунків частоти обертання й обертового моменту на основі виразів, у які входить один аргумент – ковзання s :

$$n = n_s(1 - s) = 1500 \cdot (1 - s) \text{ об/хв};$$

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}} = \frac{2 \cdot 280}{\frac{s}{0,288} + \frac{0,288}{s}} \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Тепер, щоб отримати природну механічну характеристику, достатньо задати ряд значень s від 0 до 1 і виконати розрахунки за наведеними формулами. Значення ковзання s для механічної характеристики вибирається так само, як і в прикладі 10. У тому числі завжди необхідно робити розрахунок для значень ковзання s_N і s_{cr} .

Результати розрахунку зведено до табл. 7, де ще додано значення $s'_{cr} = 0,576$, яке визначається далі для однієї зі штучних характеристик.

За даними табл. 7 на рис. 8 зображено природну механічну характеристику $n(M)$ при $U_{nw} = U_N$.

Таблиця 7 – Дані для механічних характеристик асинхронного двигуна

s	0	0,06	0,1	0,2	0,288	0,4	0,576	0,6	0,8	1,0
n , об/хв	1000	940	900	800	712	600	434	400	200	0
M , Н·м, при $U = U_N, R_{rr} = 0$	0	112	173	262	280	265	223	218	178	149
M , Н·м, при $U = 0,9U_N, R_{rr} = 0$	0	90	140	212	227	215	201	177	144	120
M , Н·м, при $U = U_N, R_{rr} = R_r$	0	58	94	173	223	262	280	278	265	242

Щоб отримати *штучну механічну характеристику при зниженні напруги* живильної мережі на 10 %, тобто при $U = 0,9U_N$, скористаємось тими самими формулами, що й у попередньому випадку для природної механічної характеристики. Але при цьому необхідно враховувати те, що максимальний обертальний момент змінюється залежно від цієї напруги:

$$M'_{\max} = \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 \cdot M_{\max} = 0,81 \cdot M_{\max} = 0,81 \cdot 280 = 227 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Тобто штучну механічну характеристику за таких умов визначаємо для тих самих значень ковзання s і частоти обертання n , розраховуючи обертальний момент за формулою:

$$M = \frac{2 \cdot M'_{\max}}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}} = \frac{2 \cdot 227}{\frac{s}{0,288} + \frac{0,288}{s}}$$

(як відомо, значення s_{cr} не залежить від величини напруги живлення).

Результати розрахунків зведено до табл. 7. За її даними на рис. 9 зображено штучну механічну характеристику $n(M)$ при $U = 0,9 \cdot U_N$.

Ця і попередня механічні характеристики отримані при умові, що фазні обмотки ротора мають тільки свій активний опір R_r , тобто $R_{rr} = 0$.

Щоб отримати штучну механічну характеристику при введенні у фази обмотки ротора регулювальних реостатів з опором $R_{rr} = R_r$, скористаємось тими самими формулами, що і для природної механічної характеристики. Але при цьому треба враховувати те, що тепер змінюється критичне ковзання, яке визначається за формулою $s_{cr} = R_r / X_{\text{орк}}$, де $X_{\text{орк}}$ – реактивний опір розсіювання обмотки ротора у нерухомому стані.

Тому при додаванні до R_r ще регулювального реостата з опором $R_{rr} = R_r$ та з урахуванням, що індуктивний опір фази обмотки статора $X_{\text{орк}}$ при цьому не змінюється, складемо пропорцію і отримаємо нове значення критичного ковзання для нової штучної механічної характеристики:

$$s'_{cr} = \frac{R_r + R_{rr}}{R_r} s_{cr} = \frac{R_r + R_r}{R_r} s_{cr} = 2s_{cr} = 2 \cdot 0,288 = 0,576.$$

При цьому максимальний обертальний момент M_{\max} не залежить від R_r та R_{rr} і зберігається таким самим, як і для природної механічної характеристики (його тепер буде отримано при новому значенні критичного ковзання s'_{cr}). Зауважимо, що ця штучна механічна характеристика розраховується при нарузі живлення $U = U_N$.

Таким чином, штучну механічну характеристику при визначених умовах ($R_{rr} = R_r$, $U = U_N$) отримуємо для тих самих значень ковзання s і частоти обертання n , що і в попередніх випадках, розраховуючи обертальний момент за

модифікованою формулою:
$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{s}{s'_{cr}} + \frac{s'_{cr}}{s}} = \frac{2 \cdot 280}{\frac{s}{0,576} + \frac{0,576}{s}}.$$

Результати розрахунків зведені до табл. 7. За її даними на рис. 9 зображено штучну механічну характеристику $n(M)$ при $U = U_N$ і $R_{rr} = R_r$.

Зауважимо, що механічні характеристики на рис. 9 в зоні за критичною точкою є фактично тільки ілюстративними через неврахування явища витіснення

струму в провідниках обмотки ротора при підвищеній частоті $f_r = s \cdot f_s$ цього струму. Про це вже йшла мова при поясненні рис. 8.

Приклад 12. Трифазний синхронний генератор має у номінальному режимі потужність $P_N = 12$ МВт; лінійну напругу $U_N = 6,3$ кВ; ККД $\eta_N = 0,976$; $\cos\varphi_{sN} = 0,8$. Крім того, кількість полюсів $2p = 2$; синхронний опір $X_{s*} = 1,63$ в.о. (відносних одиниць); струм збудження неробочого ходу $I_{Eo} = 89$ А при U_N ; частота $f_s = 50$ Гц; схема обмотки статора – зірка.

На цій основі визначимо низку інших параметрів генератора в номінальному режимі і побудуємо векторну діаграму.

Розрахунок. Номінальна фазна напруга при з'єднанні фазних обмоток статора зіркою $U_{sN} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{6,3}{\sqrt{3}} = 3,637$ кВ = 3637 В.

Фазний і лінійний струми обмотки статора при схемі зірка

$$I_{sN} = I_N = \frac{P_N}{3U_{sN} \cos\varphi_{sN}} = \frac{12 \cdot 10^6}{3 \cdot 3637 \cdot 0,8} = 1375 \text{ А.}$$

Фазовий зсув між фазними напругою та струмом статора

$$\varphi_{sN} = \arccos(\cos\varphi_{sN}) = \arccos(0,8) = 36,9^\circ.$$

Для синхронних машин базовим опором є $Z_N = \frac{U_{sN}}{I_{sN}}$. Тоді у цьому випадку

$$Z_N = \frac{U_{sN}}{I_{sN}} = \frac{3637}{1375} = 2,645 \text{ Ом.}$$

Тому синхронний опір фазної обмотки статора в абсолютних одиницях

$$X_s = X_{s*} \cdot Z_N = 1,63 \cdot 2,645 = 4,31 \text{ Ом.}$$

Внутрішній реактивний спад напруги в обмотці статора генератора:

$$U_{ss} = X_s I_{sN} = 4,31 \cdot 1375 = 5926 \text{ В,}$$

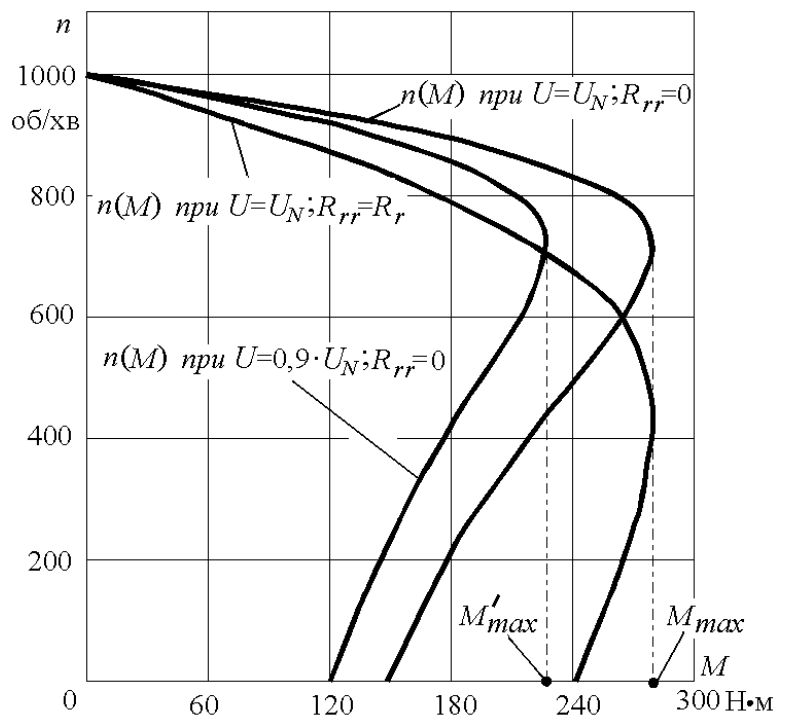


Рисунок 9 – Сім'я механічних характеристик асинхронного двигуна

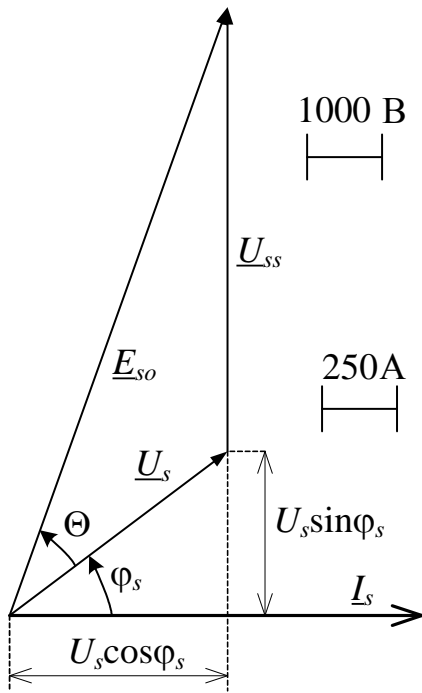


Рисунок 10 – Векторна діаграма синхронного генератора

а незначним спадом напруги на її активному опорі знехтуємо.

Співвідношення електричних величин проілюструємо на рис. 10 спрощеною векторною діаграмою. Спочатку довільно проводимо вектор струму $\underline{I}_s = \underline{I}_{sN}$, а відносно нього під кутом $\varphi_s = \varphi_{sN}$ – вектор напруги $\underline{U}_s = \underline{U}_{sN}$. Вектор $\underline{U}_{ss} = jX_s \underline{I}_{sN}$ є перпендикулярним до вектора \underline{I}_s . Вектор ЕРС обмотки статора від магнітного поля обмотки ротора будемо на основі формули $\underline{E}_{so} = \underline{U}_s + jX_s \underline{I}_s = \underline{U}_s + \underline{U}_{ss}$, а діюче значення цієї ЕРС за геометричними співвідношеннями на діаграмі:

$$E_{so} = \sqrt{(U_{sN} \cos \varphi_{sN})^2 + (U_{sN} \sin \varphi_{sN} + U_{ss})^2} = \\ = \sqrt{(3637 \cdot 0,8)^2 + (3637 \cdot \sin 36,9^\circ + 5926)^2} = 8617 \text{ В.}$$

З діаграми визначаємо номінальний кут навантаження:

$$\theta_{nom} = \arctg \frac{U_{sN} \cdot \sin \varphi_{sN} + U_{ss}}{U_{sN} \cdot \cos \varphi_{sN}} - \varphi_{sN} = 70,3^\circ - 36,9^\circ = 33,4^\circ.$$

Якщо вважати магнітну систему генератора ненасиченою, тобто характеристику неробочого ходу лінійною, то можна визначити струм збудження у номінальному режимі: $I_{EN} = I_{Eo} \frac{E_{so}}{U_{sN}} = 89 \cdot \frac{8617}{3637} = 211 \text{ А.}$

$$\text{Кутова швидкість обертання ротора } \Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_s}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{1} = 314 \text{ рад/с.}$$

Вхідна механічна потужність генератора та обертальний момент на валу його ротора $P_{innom} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{12}{0,976} = 12,3 \text{ МВт;}$

$$M_{in} = \frac{P_{innom}}{\Omega} = \frac{12,3 \cdot 10^6}{314} = 39156 \text{ Н} \cdot \text{м} \approx 39,2 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Максимальний момент та перевантажувальна здатність генератора:

$$M_{max} = \frac{M_{in}}{\sin \theta_{nom}} = \frac{39,2}{\sin 33,4^\circ} = 71,1 \text{ кН} \cdot \text{м; } k_{Mm} = \frac{M_{max}}{M_N} = \frac{1}{\sin \theta_{nom}} = 1,82.$$

ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

1. Мілих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник / В.І. Мілих, О.О. Шавьолкін; за ред. В.І.Мілих. – Київ : Каравела, 2012. – 688 с.
2. Мілих В.І. Електротехніка та електромеханіка / В.І. Мілих. – Київ : "Каравела", 2006. – 376 с.
3. Андрієнко В.М. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за напрямом підгот. «Електротехніка та електротехнології» / В.М. Андрієнко, В.П. Куєвда. – К. : НУХТ, 2010. – 366 с.
4. Белікова Л.Я. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Л.Я. Белікова, В.П. Шевченко. – Одеса : Наука і техніка, 2012. – 478 с.
5. Загірняк М.В. Електричні машини : підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – Київ : Знання, 2009. – 399 с.
6. Електричні машини : підручник / Б.Т. Кононов, Г.І. Лагутін, О.Б. Котов та ін.; за заг. ред. Б.Т. Кононова. – Харків : ХУПС, 2015. – 493 с.
7. Яцун М.А. Електричні машини : навч. посіб. для студ. базового напрямку «Електромеханіка» / М.А. Яцун – 2-ге вид., стер. – Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2004. – 440 с.
8. Мілих В.І. Літерні позначення величин та параметрів електричних машин: методичні вказівки до використання в навчальному процесі кафедри «Електричні машини» для студентів і викладачів електротехнічних спеціальностей / Укладач В.І. Мілих. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – 34 с.
9. СТЗВО-ХП-3.01-2018. Текстові документи у сфері навчального процесу. – [Діє від 28.09.2018]. – Харків: НТУ «ХП», 2018. – 48 с.
10. Офіційна сторінка кафедри «Електричні машини» НТУ «ХП». – Режим доступу : <http://web.kpi.kharkov.ua/elmash/>.

Навчальне видання

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Типова програма, методичні вказівки та контрольні завдання
для студентів заочної форми навчання
спеціальності 141 «Електротехніка, електроенергетика та електромеханіка»

Укладачі: МІЛИХ Володимир Іванович
ЮР'ЄВА Олена Юріївна

Відповідальний за випуск А.В. Єгоров
Роботу до друку рекомендував Б.Г. Любарський
Редактор О.В. Козюк

План 2020 р. п. 310

Підписано до друку	Формат 60x84 ^{1/16} .	Папір офсетний.
Друк – ризографія.	Гарнітура Times New Roman.	Ум. друк. арк. .
Наклад – 100 прим.	Зам. № .	Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ»
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Друкарня НТУ «ХПІ», 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2