

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”

**ЕЛЕКТРОТЕХНІКА.
ПРАКТИКУМ З ОСНОВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ ТА
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Київ
2014

УДК 621.3(076.2)

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих технічних навчальних закладів (Лист № 1/11-8444 від 3.06.2014р.)

К62

Рецензенти:

В.О.Новський, д-р техн. наук, пров. наук. співроб,
Інститут електродинаміки НАН України
М.Я.Островецьков, д-р техн. наук, проф.,
Національний технічний університет України «КПІ»
В.М.Синько, д-р техн. наук, проф.,
Національний авіаційний університет України

Відповідальний редактор

А.М. Сільвестров, д-р техн. наук, проф.,
Національний технічний університет України «КПІ»

А.А. Щерба , В.П. Грудська, Л.Ю. Спінул

К62 Електротехніка. Практикум з основ електромеханіки та електроприводу :
навч. посіб. / А.А. Щерба, В.П. Грудська, Л.Ю. Спінул, -К.: НТУУ “КПІ”, 2014.-290 с.:
іл.-Бібл.: с.288

Розглянуто основи розрахунку трансформаторів, асинхронних двигунів, синхронних машин і машин постійного струму; а також типових режимів їх роботи в електроприводі та критерії вибору для певного режиму. Наведено задачі практичного спрямування з детальним розв’язанням. Розв’язання кожної задачі проілюстровано необхідними графіками и векторними діаграмами.

УДК 621.3(076.2)

© А.А. Щерба,
В.П. Грудська,
Л.Ю. Спінул, 2014

Передмова

Сучасне устаткування виробничих підприємств та наукових лабораторій характеризується великою кількістю різноманітних електротехнічних вузлів, які забезпечують роботу виконавчих механізмів загальнопромислового і спеціального призначення. Найбільш поширеними елементами будь-якої електротехнічної системи є електричні машини і трансформатори, використання яких у даний час не обмежується виробництвом, передаванням та перетворенням електричної енергії в механічну. У системах автоматичного керування і регулювання електричні машини спеціального виконання застосовуються як елементи автоматики для отримання інформації про стан системи або для перетворення сигналу керування. Тому розділи «Електричні машини» і «Електропривод» є провідними в електротехнічній підготовці спеціалістів за фаховим спрямуванням «Машинобудування». Вивчення вказаних розділів має практичну спрямованість, оскільки правильний вибір електромеханічних перетворювачів енергії і раціональне використання їх можливостей є невід'ємною складовою комплексного вирішення проблеми енергозбереження. Трансформатор, який є електромагнітним апаратом, традиційно розглядається в розділі електричних машин внаслідок ідентичності електромагнітних процесів. Електричні машини і трансформатори є практичними прикладами складних електромагнітних кіл; процеси в них підпорядковуються вивченим раніше законам електротехніки, тому аналіз їх роботи можна проводити відомими методами розрахунку електричних і магнітних кіл.

Зважаючи на практичну важливість і теоретичну складність матеріалу посібника, автори посібника ставили за мету допомогти студентам:

- опанувати принципи роботи трансформатора та електричних машин загального призначення;
- засвоїти основні теоретичні положення, на яких базується аналіз їх роботи;
- зрозуміти математичні співвідношення, закладені в основу побудови характеристик;
- вивчити їх властивості при різних умовах роботи;
- сформуванню вміння аналізувати вплив зміни параметрів на характеристики пристроїв;
- уявити критерії вибору двигунів для різних режимів роботи в електроприводі.

Матеріал посібника поділено на вступ, в якому наведені основні відомості про функціональні можливості електромеханічних перетворювачів та їх роль в електроприводі, і два розділи – «Основи електромеханіки» і «Основи електропривода». У першому розділі розглянуто трансформатори, асинхронні двигуни, синхронні машини і машини постійного струму; у другому розділі – типові режими їх роботи в електроприводі та критерії вибору для певного режиму. Розділи однаково структуровані, кожний містить:

- основні теоретичні положення теми і рекомендації до їх опрацювання, що акцентують увагу студентів на питаннях, найбільш важливих для професійної підготовки;
- розрахункові співвідношення, за допомогою яких аналізують режими роботи;
- взяті з інженерної практики задачі з детальним поясненням їх розв'язання;

-задачі для самостійного розв'язання, що дозволяє студентам перевірити рівень засвоєності матеріалу;

-завдання на індивідуальну розрахунково-графічну роботу.

Посібник не замінює підручники з електротехніки, а доповнює їх матеріал практичними питаннями. В умовах скорочення лекційних годин і відсутності практичних занять на деяких спеціальностях такий посібник буде корисним у навчальному процесі.

Вступ

Пристрої, що здійснюють перетворення механічної енергії в електричну або зворотне перетворення, називають електричними машинами. Велика різноманітність функціональних і конструктивних особливостей електричних машин призводить до їх класифікації за різними ознаками **П.**

За призначенням електричні машини поділяють на генератори, двигуни, електромашинні перетворювачі, підсилювачі і електромеханічні перетворювачі сигналів.

Генератори перетворюють механічну енергію в електричну, оскільки природних джерел електричної енергії немає. Генератори використовують для виробництва електричної енергії на електростанціях, де вони приводяться в обертовий рух паровими або гідравлічними турбінами, а також в різних транспортних засобах (автомобілях, літаках, кораблях, тепловозах), де їх обертання здійснює двигун внутрішнього згоряння або газова турбіна.

Двигуни перетворюють електричну енергію в механічну для приведення в рух різних машин і механізмів.

Електромашинні перетворювачі перетворюють змінний струм у постійний і навпаки, змінюють напругу і частоту, число фаз (останнім часом їх витісняють статичні напівпровідникові перетворювачі, які мають низку переваг).

Електромашинні підсилювачі підсилюють потужність сигналу, що подається на обмотки збудження, в $10^3 - 10^4$ разів; їх використовують в автоматичних системах для керування великими потужностями за допомогою малої потужності.

Електро механічні перетворювачі сигналів призначені у вигляді мікро машин для систем автоматичного керування технологічними процесами, де їх використовують для отримання інформації про стан системи або для перетворення сигналу керувань.

За родом струму електричні машини поділяють на машини постійного і змінного струму.

Машини постійного струму використовують як двигуни, генератори, електромашинні підсилювачі, тахогенератори. Двигуни постійного струму переважають у випадках, коли за технологічними умовами потрібен широкий діапазон регулювання швидкості обертання.

Машини змінного струму бувають синхронні, асинхронні, колекторні.

Синхронні машини, в яких магнітне поле і ротор обертаються з однаковою швидкістю незалежно від навантаження, використовують, в основному, як генератори змінного струму та компенсатори реактивної потужності. Розповсюдження синхронних двигунів було обмежено складністю пуску та регулювання частоти обертання. На сьогоднішній день вказані недоліки можуть бути в значній мірі усунуті за допомогою напівпровідникових перетворювачів частоти. Оскільки синхронні двигуни мають високий ККД, поширюється їх використання в енергозберігаючих технологічних процесах.

Асинхронні машини, в яких магнітне поле і ротор обертаються з різною швидкістю, працюють переважно як двигуни. Вони прості у виготовленні, мають надійну конструкцію, відносно дешеві. Завдяки цим перевагам асинхронні двигуни набули найбільшого розповсюдження у промисловості.

Колекторні машини змінного струму використовують, здебільшого, як двигуни з підвищеною швидкістю обертання, яку не можуть

забезпечити синхронні і асинхронні двигуни. Ці двигуни відносно дорогі та потребують ретельного догляду, тому використовуються у спеціальних установках.

Універсальні колекторні двигуни можуть працювати і на змінному і на постійному струмі; вони поширені у пристроях автоматики і побутових приладах.

За потужністю електричні машини умовно поділяють на мікромашини, машини малої, середньої та великої потужностей.

Мікромашини мають потужність від декількох ват до 0,5 кВт; живляться постійною або змінною напругою частотою 50-2000 Гц.

Машини малої потужності – від 0.5 кВт до 10 кВт, живляться постійною або змінною напругою.

Машини середньої потужності – від 10 кВт до декількох сотень кіловат.

Машини великої потужності – понад декілька сотень кіловат, живляться постійною або змінною напругою промислової частоти.

За швидкістю обертання електричні машини поділяють на:

тихохідні – швидкість обертання $n < 300$ об/хв;

середньої швидкості - $300 < n < 1500$ об/хв;

швидкохідні - $1500 < n < 6000$ об/хв;

надшвидкохідні - $n > 6000$ об/хв.

Принцип роботи електричних машин побудований на використанні таких проявів електромагнітного поля, вказаних нижче.

1. Електричний струм завжди супроводжується магнітним полем (зв'язок між струмом і магнітним полем описує закон повного струму

$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum i$, напрямок магнітних ліній визначається правилом свердлика).

2. Зміна магнітного потоку, що пронизує контур, незалежно від причини (зміна у часі магнітного поля, зміна координат контуру у полі) призводить до появи у контурі електрорушійної сили (зв'язок між магнітним полем і Е.Р.С. описує закон електромагнітної індукції $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$, напрямок індукованої Е.Р.С. у сторонах контуру визначається за правилом правої руки).

3. На провідник із струмом, розміщений у магнітному полі, діє механічна сила (зв'язок між струмом і механічною силою описує закон Ампера $\vec{F} = \vec{I} \left[d\vec{l} \vec{B} \right]$, напрям сили визначається за правилом лівої руки).

В електричних машинах процес перетворення енергії відбувається за допомогою магнітного поля, для створення якого найчастіше використовують електромагніти. Обмотку статора і ротора можна розглядати як систему провідникових контурів, в якій індукується Е.Р.С. при обертанні в магнітному полі або ж при русі магнітного поля відносно обмотки. На валу машини магнітне поле створює в залежності від режиму роботи обертовий або гальмівний механічний момент. Отже процеси в електричних машинах повністю підлягають основним законам електромагнетизму. Крім того, для електромеханічних перетворювачів виконуються наведені далі положення. 1. Перетворення енергії завжди супроводжується перетворенням електричної або механічної енергії в тепло. Енергія, що перетворюється у тепло, відноситься до втрат, тому коефіцієнт корисної дії у таких перетворювачів завжди менше одиниці. 2. В усіх електричних машинах має місце зворотність процесу, тобто вони можуть працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна, що є важливою перевагою в порівнянні з іншими перетворювачами енергії (паровою турбіною, реактивним двигуном). 3. Електромеханічне

перетворення енергії здійснюється взаємонерухомими магнітними полями статора і ротора, які в повітряному проміжку створюють результуюче поле і електромагнітний момент.

Режим роботи електричної машини визначається не тільки видом енергетичного процесу, що відбувається в ній (двигунний, генераторний, гальмівний), але й має кількісну оцінку, тобто характеризується рядом електричних і механічних параметрів (потужністю, напругою, струмом, частотою напруги живлення, швидкістю обертання, К.К.Д., коефіцієнтом потужності тощо). При виготовленні машина призначається для роботи з певними величинами вищезгаданих параметрів протягом тривалого часу; ці величини називають номінальними параметрами (наприклад, номінальна потужність). Найбільш важливі номінальні параметри вказують на спеціальній табличці, що кріпиться до корпусу машини. Електрична машина може працювати і при неномінальних умовах (збільшених або зменшених потужностях, напрузі, струмі), але в таких випадках величини інших параметрів також можуть відрізнятися від паспортних даних.

У розділі електричних машин традиційно розглядається трансформатор, хоч він і не має рухомих частин і по суті є електромагнітним апаратом. Трансформатор за допомогою магнітного поля перетворює одну систему змінного струму в іншу, змінюючи величину напруги і струму, а в деяких спеціальних випадках – частоту і число фаз.

Для приведення в рух будь-якого виконавчого механізму окрім двигуна потрібна механічна передача, яка з'єднує вал електродвигуна з виробничим механізмом або робочим органом, узгоджує обертовий момент і швидкість двигуна з обертовим моментом і швидкістю виробничого механізму.

Електроmechanічний пристрій, до складу якого входять електродвигун, передавальні механізми, що з'єднують двигун з виконавчим механізмом, та елементи автоматизації і керування називають електроприводом.

Якщо двигун живиться від системи розподілення електричної енергії через перетворювач енергії (трансформатор, перетворювач частоти, електромагнітний підсилювач та інше), то перетворювач також вважається частиною електропривода. Всі елементи електропривода взаємно пов'язані і в процесі роботи впливають один на одного. Керування роботою здійснюють за допомогою спеціальної електричної системи керування шляхом впливу на перетворювач або безпосередньо на електродвигун. В залежності від призначення і рівня автоматизації система керування передбачає використання релейно-конекторних пристроїв (простіший неавтоматизований привод) або являє собою блок автоматичного керування, що забезпечує гнучку і надійну передачу енергії.

Широке коло завдань, що вирішуються за допомогою електропривода, зумовлює його велику різноманітність і спеціалізацію – від простіших нерегульованих до автоматизованих і автоматичних приводів, в яких використовуються обчислювальні машини, цифрові програмовані пристрої і системи автоматичного керування двигунами.

Електропривод вважається неавтоматизованим, якщо його ввімкнення, керування роботою і вимкнення виконує людина. Такий електропривод використовують для окремих механізмів, наприклад насосів, компресорів.

В автоматизованому електроприводі застосування різних електричних апаратів і пристроїв звільняє людину від ручних перемикачів в електричних колах керування двигуном (пуск, зупинка, реверс, зміна

швидкості) і, відповідно, виконавчим механізмом. Використання автоматизованого електропривода дозволяє збільшити продуктивність праці не тільки за рахунок звільнення від ручної роботи, але й за рахунок збільшення швидкості виконання операцій, зменшення часу простоїв обладнання та оптимізації виробничих процесів.

Автоматичний електропривод – це автоматичні лінії, тобто системи машин, які приводяться в рух електродвигунами з автоматичним керуванням і виконують у певній послідовності ряд операцій. Роль людини зводиться до налагодження електричного устаткування, спостереження за роботою та догляду за ним.

Ступінь досконалості електропривода визначає рівень продуктивності праці.

Електропривод охоплює багато питань, знання яких дозволяє розраховувати і вибирати елементи електропривода, а також розробляти схему керування двигуном і усім виробничим процесом відповідно до технологічних умов. До таких питань відносяться:

- механічні характеристики електроприводів у пусковому, обертовому і гальмівному режимах;
- регулювання швидкості обертання електроприводів;
- розрахунок пускових, гальмівних та регулювальних опорів;
- визначення потужності електродвигуна і вибір його за каталогом;
- розробка схеми керування двигуном;
- вибір апаратури керування.

Засвоєнню перших чотирьох питань допоможе пропонований навчальний посібник; останні два питання розглядаються в інших методичних виданнях.

Розділ 1. Основи електромеханіки

1.1. Трансформатор

1.1.1. Основні теоретичні положення

Трансформатор – це статичний індуктивний перетворювач, що має дві (або більше) індуктивно зв'язані обмотки і призначений для перетворення за допомогою явища електромагнітної індукції однієї (первинної) системи змінного струму в іншу (вторинну) систему змінного струму. У більшості випадків за допомогою трансформатора перетворюють тільки напругу та струм без зміни частоти і кількості фаз. Незважаючи на велику кількість різновидів трансформаторів і широкий діапазон потужностей, теорія їх єдина – вона базується на законі електромагнітної індукції. У первинній обмотці електрична енергія перетворюється в енергію магнітного поля, у вторинній обмотці навпаки – енергія магнітного поля перетворюється в електричну енергію. Зі сторони первинної обмотки з кількістю витків W_1 трансформатор є споживачем електричної енергії, а зі сторони вторинної обмотки з кількістю витків W_2 він є джерелом енергії для споживача з опором \underline{Z} . Струм вторинної обмотки визначається електрорушійною силою, яка індукується в ній магнітним полем і опором навантаження \underline{Z} . Параметри (напруга, струм, потужність), що характеризують режим роботи, для якого трансформатор призначений виробником, називають номінальними. При певному значенні опору навантаження $Z = Z_{\text{НОМ}}$ через вторинну обмотку проходить номінальний струм $I_2 = I_{2\text{НОМ}}$. Зменшення опору навантаження

($Z < Z_{\text{НОМ}}$) призводить до перевантаження трансформатора ($I_2 > I_{2\text{НОМ}}$); збільшення опору ($Z > Z_{\text{НОМ}}$) спричиняє недовантаження трансформатора ($I_2 < I_{2\text{НОМ}}$); при $Z = 0$ виникає коротке замикання ($I_2 \gg I_{2\text{НОМ}}$); при $Z = \infty$ трансформатор працює в режимі неробочого ходу ($I_2 = 0$). В останньому випадку трансформатор не перетворює електричну енергію, що й зумовлює таку назву режиму.

Вивчаючи процеси в трансформаторі, слід звернути увагу на таке: магнітний потік трансформатора при роботі пропорційний напрузі первинної обмотки, що видно з формули $U_1 \approx E_1 = 4,44 f W_1 \Phi_m$. Звідси впливає дуже важливе для аналізу процесів положення: якщо трансформатор увімкнений до джерела змінної напруги із сталим діючим значенням U_1 , то в діапазоні навантажень від $Z_{\text{Н}} = \infty$ до $Z_{\text{Н}} = Z_{\text{НОМ}}$ магнітний потік в осерді залишається практично незмінним і рівним магнітному потоку в режимі неробочого ходу. В останньому режимі магнітний потік визначається магніторухійною силою тільки первинної обмотки - $I_0 W_1$.

В робочих режимах вказаного діапазону під дією струмів \dot{I}_1 та \dot{I}_2 результуюча сила намагнічування буде такою ж, як і в режимі неробочого ходу. Рівняння для намагнічувальної сили у комплексній формі має вигляд:

$$\dot{I}_0 W_1 = \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2.$$

Поділивши обидві частини рівняння на W_1 і розв'язавши його відносно \dot{I}_1 , отримаємо:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2',$$

де $\dot{I}_2' = \frac{W_2}{W_1} \dot{I}_2 = \frac{1}{n} \dot{I}_2$ – струм вторинної обмотки, зведений до первинної обмотки, n – коефіцієнт трансформації.

У режимі неробочого ходу ($I_2 = 0$) первинний струм $I_1 = I_0$ є в основному реактивним струмом намагнічування, що утворює магнітний потік трансформатора Φ_{0m} , а трансформатор аналогічний котушці зі сталевим осердям. У робочому режимі $I_1 \approx I_2' = I_2/n$, оскільки струм неробочого ходу малий (зазвичай 5÷10% від номінального струму $I_{\text{НОМ}}$). Постійність результуючої намагнічувальної сили $I_0 W_1$ зумовлює в силових трансформаторах автоматичну зміну первинного струму при змінах струму навантаження I_2 – саморегулювання трансформатора.

Опрацьовуючи процеси в трансформаторі, необхідно зрозуміти мету і сутність зведення вторинної обмотки до первинної. Між обмотками звичайного трансформатора існує тільки магнітний зв'язок – енергія з первинної обмотки у вторинну передається магнітним полем, що суттєво ускладнює розрахунки. Для їх спрощення і побудови векторних діаграм магнітний зв'язок між обмотками доцільно замінити електричним зв'язком. З цією метою реальний трансформатор з числом витків W_2 у вторинній обмотці замінюють еквівалентним трансформатором з числом витків у вторинній обмотці $W_2' = W_1$. Таким чином, замість дійсного трансформатора з коефіцієнтом трансформації $n = W_1/W_2$ розглядають еквівалентний йому так званий зведений трансформатор з $n = 1$. Усі параметри вторинного кола трансформатора зводять до первинного кола

таким чином, щоб залишилися незмінними: 1) електромагнітна потужність, що передається з первинного кола у вторинне; 2) корисна потужність, яка віддається трансформатором у навантаження; 3) активна і реактивна потужності вторинного кола; 4) намагнічувальна сила $I_0 W_1$. Зведення полягає у множинні вторинних величин на коефіцієнт зведення, що дорівнює для Е.Р.С. і напруг коефіцієнту трансформації n ; для струмів $-\frac{1}{n}$; для опорів $-n^2$.

Робота зведеного трансформатора описується трьома рівняннями:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2 \quad \text{- рівняння струмів;}$$

$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + jX_{1\sigma} \dot{I}_1$ - рівняння електричного стану первинної обмотки;

$\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + R_2 \dot{I}'_2 + jX_{2\sigma} \dot{I}'_2$ - рівняння електричного стану вторинної обмотки.

Для аналізу і розрахунку характеристик трансформатора дуже зручна схема заміщення, яка будується для зведеного трансформатора на підставі вказаних рівнянь. Трансформатор можна розглядати як чотирьополосник, і представлення його схемою заміщення впливає з теорії чотирьополосників. Найбільш повною є Т-подібна, окрім якої часто використовують Г-подібну і спрощену схеми заміщення. Їх параметри визначають за результатами випробувальних дослідів неробочого ходу і короткого замикання. Знайдені з цих дослідів втрати потужності дають також можливість обчислювати втрати і ККД трансформатора в будь-якому робочому режимі.

Зміну вихідної напруги, струмів і кутів зсуву їх фаз у трансформаторі при різних режимах роботи найкраще видно на векторній діаграмі. Тому треба вміти її будувати і використовувати для аналізу роботи трансформатора з різним за характером і величиною навантаженням. Векторна діаграма трансформатора в режимі неробочого ходу відрізняється від векторної діаграми котушки зі сталевим осердям тільки тим, що додається вектор Е.Р.С. вторинної обмотки, яка створюється основним магнітним потоком Φ_{0m} . Вектор струму неробочого ходу випереджає вектор потоку Φ_{0m} на кут втрат $\delta = \pi/2 - \varphi_0$. Струм неробочого ходу є несинусоїдним, але на векторній діаграмі відкладається еквівалентний йому синусоїдний струм I_0 . Реактивну складову цього струму визначають з розрахунку магнітного кола, а активну складову – за втратами в сталі й напругою.

За допомогою векторної діаграми доцільно простежити, як змінюється за величиною і фазою первинний струм трансформатора при зміні навантаження, а також, як змінюється вторинна напруга при зміні вторинного струму. Відомо, що напруга на затискачах джерела Е.Р.С. змінюється при зміні струму споживача внаслідок спаду напруги на внутрішньому опорі джерела. Залежність $U = f(I)$ називається зовнішньою характеристикою будь-якого джерела живлення. Трансформатор також є джерелом живлення одного або декількох споживачів, які підключені до затискачів вторинної обмотки паралельно. Часто споживачі працюють не всі одночасно і, таким чином, трансформатор працює з різним навантаженням. Напруга на первинній обмотці трансформатора практично незмінна, оскільки трансформатор живиться від мережі. Напруга на вторинній обмотці змінюється із зміною струму навантаження внаслідок спаду напруги у самому трансформаторі

на опорі «короткого замикання» Z_K . Хоч зміна напруги U_2 в режимі навантаження відносно напруги $U_{2\text{НОМ}}$ неробочого ходу $\Delta U_2 = (U_{2\text{НОМ}} - U_2) / U_{2\text{НОМ}}$ зазвичай невелика, але вона може негативно вплинути на роботу деяких споживачів енергії, наприклад, ламп розжарювання. Залежність $U_2 = f(I_2)$, виражена графічно, являє собою зовнішню характеристику трансформатора. Для правильної експлуатації трансформатора слід знати зміну вторинної напруги ΔU_2 і вміти будувати зовнішню характеристику трансформатора для різних за величиною і характером споживачів. У випадках, коли зі зміною опору споживача напруга U_2 не залишається достатньо стабільною, напругу регулюють шляхом зміни кількості витків однієї з обмоток. Зазвичай це дозволяє регулювати напругу в межах $\pm 5\%$. Сучасні силові трансформатори мають спеціальні пристрої для регулювання напруги під навантаженням без розмикання кола.

Трифазний трансформатор є системою трьох однофазних, тому його можна представити конструктивно як тристрижневий трансформатор. Обмотки трифазного трансформатора можуть бути з'єднані зіркою або трикутником (в окремих випадках за схемою зигзаг). Схему з'єднання двообмоткового трансформатора позначають у вигляді дробу, в чисельнику якого вказують схему з'єднання обмотки вищої напруги (ВН), а в знаменнику – обмотки нижчої напруги (НН), наприклад Y / Δ або Δ / Y . Схема з'єднання обмоток спричинює певні особливості роботи трансформатора, тому її вибір залежить від багатьох факторів. Наприклад, при схемі Y / Y струм неробочого ходу є синусоїдним, однак крива магнітного потоку фази спотворюється і має третю гармоніку; відповідно несинусоїдною стає Е.Р.С. фази. Якщо одна з обмоток з'єднана

трикутником, то магнітні потоки фаз є практично синусоїдними. Слід звернути увагу на те, що при однаковому коефіцієнті трансформації фазної напруги ($n_{\Phi} = U_{\Phi ВН} / U_{\Phi НН}$) можливі різні коефіцієнти трансформації лінійної напруги ($n_{Л} = U_{Л ВН} / U_{Л НН}$) в залежності від схеми з'єднання обмоток. Коефіцієнти трансформації n_{Φ} і $n_{Л}$ збігаються тільки для однотипних схем з'єднання, тобто «зірка-зірка» і «трикутник-трикутник».

Для безаварійної роботи трансформаторів необхідно опанувати поняття «група з'єднання обмоток». При з'єднанні певним чином фаз обмотки використовують той чи інший затискач фази. В залежності від того, які затискачі фаз з'єднані разом, змінюється величина кута α зсуву фаз між векторами однойменних лінійних напруг первинної і вторинної обмотки трансформатора (наприклад \bar{U}_{AB} і \bar{U}_{ab}) в режимі неробочого ходу. В однофазних трансформаторах кут α дорівнює 0° або 180° , а в трифазних $\alpha = k \cdot 30^\circ$, де $k = 0, 1, 2, 3, \dots, 11$ - ціле число, яке називають групою з'єднання обмоток і визначають за допомогою циферблата годинника. У загальному випадку група з'єднань обмоток залежить від схеми з'єднання, напряму намотки і вибору початку і кінця обмотки. Номер групи вказують після позначення схеми з'єднання обмоток трансформатора, наприклад $Y/Y-11$. Знання групи з'єднання обмоток обов'язкове при використанні трансформаторів на паралельну роботу, коли потрібно з'єднувати рівнопотенціальні затискачі обмоток.

У разі симетричного навантаження трифазного трансформатора електромагнітні процеси в його фазах проходять однаково, тому розглядають одну фазу, використовуючи усі прийоми аналізу процесів у однофазному трансформаторі (схему заміщення, векторну діаграму,

рівняння, розрахункові співвідношення). Несиметричні режими роботи аналізуються методом симетричних складових.

Теорія трансформаторів повністю поширюється на автотрансформатори та вимірювані трансформатори. При вивченні останніх слід звернути увагу на особливості їх роботи і можливі додаткові похибки. Особливо це стосується трансформаторів струму (ТС), в яких увімкнення обмоток відрізняється від трансформаторів силових і напруги. Первинну обмотку ТС вмикають послідовно зі споживачем, струм якого треба виміряти. Опір цієї обмотки нехтовно малий порівняно з опором споживача Z_C , тому увімкнення ТС практично не змінює струм кола $I_1 = U_1 / Z_C$. При незмінному значенні напруги мережі U_1 і незмінному опорі споживача Z_C магніторухійна сила первинної обмотки ТС $W_1 I_1 = const$. Вторинна обмотка ТС замкнена на амперметр і струмові кола з дуже малими опорами інших вимірювальних пристроїв (ватметра, реле тощо). Таким чином, номінальним режимом ТС практично є режим короткого замикання, в якому намагнічувальна сила $W_1 I_0$ мала (відповідно малий потік Φ_m) і $W_1 I_1 \approx W_2 I_2$. Слід пам'ятати, що не можна під час роботи розмикати вторинне коло ТС, оскільки при цьому зникає розмагнічувальна дія вторинного струму ($I_2 = 0$), намагнічувальна сила $W_1 I_0$ збільшується до значення $W_1 I_1$ і магнітний потік збільшується у десятки-сотні разів. Трансформатор може вийти з ладу через перегрів осердя внаслідок збільшення магнітних втрат. Крім того, збільшений магнітний потік індукує на затискачах розімкненої вторинної обмотки велику Е.Р.С. (до 1 кВ), небезпечну для життя. Якщо потрібно відключити або замінити вимірювальний прилад, увімкнений в коло вторинної

обмотки ТС, то контакти цієї обмотки замикають накоротко спеціальними перемикачами.

Технічні дані трансформаторів

У каталозі та паспорті трансформатора наводяться технічні дані, необхідні для нормальної експлуатації трансформатора:

- тип трансформатора;
- номінальна потужність $S_{\text{НОМ}}$, кВА;
- лінійна номінальна напруга первинної обмотки $U_{1\text{НОМ}}$, кВ;
- лінійна номінальна напруга вторинної обмотки $U_{2\text{НОМ}}$, кВ;
- втрати потужності при неробочому ході P_0 , кВт;
- втрати потужності при короткому замиканні P_K , кВт;
- напруга короткого замикання, % від $U_{1\text{НОМ}}$;
- струм неробочого ходу, % від $I_{1\text{НОМ}}$;
- ККД для активного навантаження ($\cos \varphi_2 = 1$) при коефіцієнтах навантаження $\beta = 1, \beta = 0,5$;
- схема і група з'єднання обмоток.

Позначення трансформатора складається з літер і цифр, наприклад, ТМ – 100/6 означає: ТМ – трансформатор з трансформаторним маслом, природним повітряним охолодженням; 100 – номінальна потужність, кВА (потужність, яку може віддавати трансформатор увесь час роботи при будь-якому коефіцієнті потужності споживача $\cos \varphi_2$, нагріваючись не вище припустимої температури); 6 – номінальна напруга обмотки вищої напруги, кВ. Слід пам'ятати, що активна потужність, яку тривалий час

може віддавати трансформатор, залежить від коефіцієнта потужності $\cos \varphi_2$ споживача $P = S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2$.

Номинальні напруги трансформаторів встановлені приблизно на 5% більші від напруги мережі. В Україні прийняті такі напруги високовольтних мереж: 3, 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, 500 і 750 кВ; низьковольтних – 127, 220, 380, 500, 660 В. Якщо напруга мережі $U_M = 6$ кВ, то для трансформатора $U_{\text{НОМ}} = 6,3$ кВ; якщо $U_M = 10$ кВ, то $U_{\text{НОМ}} = 10,5$ кВ і т.д.

Номинальна частота f напруг і струмів для трансформаторів загального використання стандартизована – в Україні $f = 50$ Гц.

На підставі технічних даних можна розрахувати номинальні струми первинної та вторинної обмоток і параметри схеми заміщення однофазного трансформатора або однієї фази трифазного трансформатора.

Для однофазного трансформатора в паспорті наводяться номинальна потужність і номинальні напруги обмоток.

1.1.2. Основні розрахункові співвідношення

Діюче значення Е.Р.С., яка індукується основним магнітним потоком,

$$\text{у первинній обмотці } E_1 = 4,44 f W_1 \Phi_m, \quad (1.1)$$

$$\text{у вторинній обмотці } E_2 = 4,44 f W_2 \Phi_m, \quad (1.2)$$

де f – частота змінного струму; Φ_m – амплітудне значення основного магнітного потоку; W_1 , W_2 – кількість витків первинної і вторинної обмоток.

$$\text{Коефіцієнт трансформації } n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} \approx \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{20}}, \quad (1.3)$$

де U_{20} - напруга на затискачах вторинної обмотки в режимі неробочого ходу.

Співвідношення між напругами та між струмами у фазі трансформатора:

а) однофазного

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2} = n, \quad U_2 = \frac{U_1}{n};$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{1}{n}, \quad I_2 = I_1 \cdot n.$$

б) трифазного при з'єднанні обмотки

- «зіркою» $U_{\Phi} = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}}, \quad I_{\Phi} = I_{\text{Л}};$
- «трикутником» $U_{\Phi} = U_{\text{Л}}, \quad I_{\Phi} = \frac{I_{\text{Л}}}{\sqrt{3}},$

де U_{Φ}, I_{Φ} - фазні напруга та струм, $U_{\text{Л}}, I_{\text{Л}}$ - лінійні напруга та струм.

Співвідношення між лінійними напругами на обмотках трифазного трансформатора:

Схема з'єднання обмоток:

«зірка/зірка» $\frac{U_{1\text{Л}}}{U_{2\text{Л}}} = \frac{\sqrt{3}U_{\Phi 1}}{\sqrt{3}U_{\Phi 2}} = n,$

«трикутник/трикутник» $\frac{U_{1\text{Л}}}{U_{2\text{Л}}} = \frac{U_{\Phi 1}}{U_{\Phi 2}} = n,$

«зірка/трикутник» $\frac{U_{1\text{Л}}}{U_{2\text{Л}}} = \frac{\sqrt{3}U_{\Phi 1}}{U_{\Phi 2}} = \sqrt{3}n,$

«трикутник/зірка»
$$\frac{U_{1Л}}{U_{2Л}} = \frac{U_{\Phi 1}}{\sqrt{3}U_{\Phi 2}} = \frac{n}{\sqrt{3}}.$$

Зв'язок між параметрами вторинної обмотки реального і зведеного трансформатора

$$\begin{aligned} I'_2 &= \frac{I_2}{n}, & E'_2 &= nE_2 = E_1, & U'_2 &= nU_2, \\ R'_2 &= n^2 R_2, & X'_2 &= n^2 X_2, & Z'_H &= n^2 Z_H, \end{aligned} \quad (1.4)$$

де I_2, E_2, U_2, R_2, X_2 - параметри вторинної обмотки реального трансформатора; $I'_2, E'_2, U'_2, R'_2, X'_2$ - параметри вторинної обмотки зведеного трансформатора.

Опори трансформатора при неробочому ході

а) однофазний трансформатор:

повний опір $Z_0 = \frac{U_{1НОМ}}{I_0};$ (1.5)

активний опір $R_0 = \frac{P_0}{I_0^2} = Z_0 \cos \varphi_0,$ де $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{1НОМ} I_0};$

реактивний опір $X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = Z_0 \sin \varphi_0.$

б) трифазний трансформатор:

повний опір фази $Z_0 = \frac{U_{1ФНОМ}}{I_{0Ф}} = \frac{U_{1НОМ}}{\sqrt{3}I_0};$ (1.6)

активний опір фази $R_0 = \frac{P_0}{3I_{0Ф}^2} = Z_0 \cos \varphi_0,$ де $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{1НОМ} I_0};$

реактивний опір фази $X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = Z_0 \sin \varphi_0.$

P_0 - потужність втрат неробочого ходу,

$$I_0 = \frac{i_0 \% \cdot I_{\text{НОМ}}}{100} - \text{абсолютне значення струму неробочого ходу}; \quad (1.7)$$

$i_0 \%$ - відсоткове значення цього струму, вказане в паспорті трансформатора.

Опори трансформатора при випробувальному короткому замиканні

а) однофазний трансформатор:

$$\text{повний опір } Z_K = \frac{U_K}{I_{\text{НОМ}}}; \quad (1.8)$$

$$\text{активний опір } R_K = R_1 + R'_2 = \frac{P_K}{I_{\text{НОМ}}^2};$$

$$\text{реактивний опір } X_K = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2},$$

де $X_{1\sigma}, X'_{2\sigma}$ - реактивні опори потоку розсіювання;

б) трифазний трансформатор:

$$\text{повний опір фази } Z_K = \frac{U_{\text{КФ}}}{I_{\text{КФ}}} = \frac{U_K}{\sqrt{3}I_{\text{НОМ}}}; \quad (1.9)$$

$$\text{активний опір фази } R_K = R_1 + R'_2 = \frac{P_K}{3I_{\text{НОМ}}^2};$$

$$\text{реактивний опір фази } X_K = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2},$$

де P_K - потужність втрат при короткому замиканні,

$$U_K = \frac{u_K \% \cdot U_{\text{НОМ}}}{100} - \text{абсолютне значення лінійної напруги короткого}$$

замикання; (1.10)

$u_K \%$ - відсоткове значення цієї напруги, вказане в паспорті трансформатора.

Співвідношення між опорами фази обмоток трансформатора

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_K}{2}, \quad R_2 = \frac{R'_2}{n^2}; \quad (1.11)$$

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{X_K}{2}, \quad X_2 = \frac{X'_2}{n^2}.$$

Напряга випробувального короткого замикання у відсотках від номінальної $U_{1НОМ}$

$$u_K \% = \frac{U_K}{U_{1НОМ}} \cdot 100\% = \frac{I_{1НОМ} \cdot Z_K}{U_{1НОМ}} \cdot 100\% =$$

$$= \frac{I_{1НОМ}^2 \cdot Z_K}{S_{НОМ}} \cdot 100\% = \sqrt{u_{Ka}^2 \% + u_{Kp}^2 \%}; \quad (1.12)$$

активна складова

$$u_{Ka} \% = \frac{P_K}{S_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{I_{1НОМ} \cdot R_K}{U_{1НОМ}} \cdot 100\% =,$$

$$= u_K \% \cdot \cos \varphi_K = \frac{u_K \% \cdot R_K}{Z_K}; \quad (1.13)$$

реактивна складова

$$u_{Kp} \% = \frac{I_{1НОМ} \cdot X_K}{U_{1НОМ}} \cdot 100\% = u_K \% \cdot \sin \varphi_K = \frac{u_K \% \cdot X_K}{Z_K} =$$

$$= \sqrt{u_K^2 \% - u_{Ka}^2 \%}, \quad (1.14)$$

де $\cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3} U_K I_{1НОМ}}$.

Коефіцієнт завантаження (навантаження) $\beta = \frac{I_2}{I_{2НОМ}} = \frac{I'_2}{I_{1НОМ}}$. (1.15)

Оптимальне значення β , за якого ККД трансформатора досягає максимального значення

$$\beta_{\text{ОПТ}} = \sqrt{P_0/P_K}, \quad (1.16)$$

де P_0, P_K - втрати неробочого ходу та короткого замикання.

Зміна вторинної напруги при навантаженні

а) у відсотках від номінальної

$$\Delta u \% = \beta (u_{KA} \% \cos \varphi_2 \pm u_{KP} \% \cos \varphi_2) = \beta u_K \% \cos(\varphi_K - \varphi_2); \quad (1.17)$$

б) у відносних одиницях

$$\Delta u = \frac{\Delta u \%}{100} = \frac{1}{100} \beta u_K \cos(\varphi_K - \varphi_2), \quad (1.18)$$

де $\cos \varphi_2 = \frac{R_H}{Z_H}$ - коефіцієнт потужності навантаження.

Зовнішня характеристика $U_2 = f(\beta)$

при $U_{1\text{НОМ}} = \text{const}$, $f = \text{const}$, $\cos \varphi_2 = \text{const}$

$$U_2 = U_{2\text{НОМ}} (1 - \Delta u) \quad (1.19)$$

або у відносних величинах

$$U_2 = \frac{U_2}{U_{2\text{НОМ}}} = 1 - \Delta u.$$

Потужності

Номінальна потужність трансформатора:

а) однофазного $S_{\text{НОМ}} = U_{1\text{НОМ}} I_{1\text{НОМ}} = U_{2\text{НОМ}} I_{2\text{НОМ}};$ (1.20)

б) трифазного $S_{\text{НОМ}} = \sqrt{3} U_{1\text{НОМ}} I_{1\text{НОМ}} = \sqrt{3} U_{2\text{НОМ}} I_{2\text{НОМ}}.$ (1.21)

Слід пам'ятати: під номінальними напругами розуміють **лінійні** напруги на затискачах трансформатора в режимі неробочого ходу, а під

номінальними струмами – **лінійні** струми незалежно від схеми з'єднання обмоток при номінальному навантаженні.

Активна потужність, що віддається у навантаження

$$P_2 = \beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2, \quad (1.22)$$

де β - коефіцієнт завантаження трансформатора (див. 1.15);

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_{\text{Н}}}{Z_{\text{Н}}} - \text{коефіцієнт потужності навантаження.}$$

Активна потужність, що споживається з мережі

$$P_1 = P_2 + P_{e1} + P_{e2} + P_{\text{М}} = \beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{\text{К}} + P_0, \quad (1.23)$$

де P_{e1} , P_{e2} - втрати потужності в первинній і вторинній обмотках;

$P_{\text{М}}$ - втрати потужності в магнітопроводі;

$P_{\text{К}}$ - втрати випробувального короткого замикання;

P_0 - втрати неробочого ходу;

β - коефіцієнт завантаження.

Потужність втрат в обмотках

а) однофазного трансформатора

$$P_{e1} = R_1 I_1^2, \quad P_{e2} = R_2 I_2^2 = R'_2 (I'_2)^2; \quad (1.24)$$

де R_1 , R_2 - активні опори первинної і вторинної обмоток;

б) трифазного

$$P_{e1} = 3R_1 I_{1\text{Ф}}^2, \quad P_{e2} = 3R_2 I_{2\text{Ф}}^2, \quad (1.25)$$

де $I_{1\text{Ф}}$, $I_{2\text{Ф}}$ - струми в фазах обмоток.

Електричні втрати – це сумарні втрати в обмотках трансформатора:

$$P_e = P_{e1} + P_{e2}.$$

У разі номінального навантаження:

а) в однофазному трансформаторі $P_e = R_K I_{\text{НОМ}}^2$; (1.25)

б) у трифазному трансформаторі $P_e = 3R_K I_{\text{НОМ}}^2$. (1.26)

За будь-якого навантаження трансформатора $P_e = \beta^2 P_K$, де β - коефіцієнт завантаження, P_K - втрати короткого замикання. Електричні втрати P_e є змінними, оскільки вони залежать від навантаження.

Потужність втрат у магнітопроводі

$$P_M = G B_m^k P_{\text{ПІТ}} (f / 50)^{1,3}, \quad k = 5,691 \lg(P_{1,5} / P_{1,0}),$$

де G - маса магнітопроводу;

B_m - амплітуда магнітної індукції в магнітопроводі;

$P_{\text{ПІТ}}$ - питомі втрати у сталі при $B_m = 1$ Тл і $f = 50$ Гц;

$P_{1,5}$ - питомі втрати у сталі при $B_m = 1,5$ Тл і $f = 50$ Гц;

f - частота струму в обмотках.

Магнітні втрати – це втрати у магнітопроводі на гістерезис та вихрові струми. За умови незмінності напруги живлення U_1 магнітні втрати при будь-якому навантаженні дорівнюють втратам неробочого ходу

$$P_M = P_0.$$

Потужність втрат при неробочому ході

а) в однофазному трансформаторі

$$P_0 = U_{\text{НОМ}} I_0 \cos \varphi_0 = I_0^2 (R_1 + R_0) \approx I_0^2 R_0, \quad (1.27)$$

б) у трифазному трансформаторі

$$P_0 = \sqrt{3} U_{\text{НОМ}} I_0 \cos \varphi_0 = 3 I_0^2 (R_1 + R_0) \approx 3 I_0^2 R_0, \quad (1.28)$$

де $U_{\text{НОМ}}$ - номінальна напруга на входних затискачах трансформатора,

R_1 - активний опір первинної обмотки,

R_0 - активний опір вітки намагнічування.

Втрати неробочого ходу дорівнюють магнітним втратам у сталі осердя

$$P_0 = P_M.$$

Потужність втрат випробувального короткого замикання

а) в однофазному трансформаторі

$$P_K = U_K I_{1НОМ} \cos \varphi_K = R_K I_{1НОМ}^2; \quad (1.29)$$

б) у трифазному трансформаторі

$$P_K = 3U_K I_{1НОМ} \cos \varphi_K = 3R_K I_{1НОМ}^2, \quad (1.30)$$

де U_K - напруга на входних затискачах трансформатора,

$I_{1НОМ}$ - номінальний струм первинної обмотки,

R_K - активний опір фази при короткому замиканні.

При випробуванні у режимі короткого замикання втрати трансформатора дорівнюють електричним втратам в його обмотках

$$P_K = P_e.$$

Потужність загальних втрат

$$\sum P_{ВТР} = P_e + P_M = \beta^2 P_K + P_0, \quad (1.31)$$

де P_e - електричні втрати в обмотках,

P_M - магнітні втрати у сталі осердя,

P_K - втрати при дослідному короткому замиканні,

P_0 - втрати за неробочого ходу,

β - коефіцієнт завантаження.

ККД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P_{ВТР}} = \frac{\beta S_{НОМ} \cos \varphi_2}{\beta S_{НОМ} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_K + P_0} =$$

$$= 1 - \frac{\beta^2 P_K + P_0}{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_K + P_0}. \quad (1.32)$$

Максимальне значення ККД

$$\eta_{\text{max}} = 1 - \frac{2P_0}{\beta_{\text{ОПТ}} S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 + 2P_0}, \quad (1.33)$$

де $\beta_{\text{ОПТ}} = \sqrt{P_0/P_K}$ - оптимальний коефіцієнт завантаження трансформатора.

Автотрансформатори

Прохідна потужність $S_{\text{ПР}} = S_e + S_M = U_2 I_2 = U_2 I_1 + U_2 I$, (1.34)

де $S_e = U_2 I_1$ - потужність, яка передається електричним способом;

$S_M = U_2 I$ - потужність, яка передається магнітним способом; U_2 - напруга на вторинній обмотці; I_1 - струм первинної обмотки; I - струм загальної ділянки обмоток автотрансформатора.

Розрахункова (електромагнітна) потужність

$$S = S_M = S_{\text{ПР}} \left(1 - \frac{1}{n} \right). \quad (1.35)$$

Коефіцієнт вигідності $K_B = 1 - \frac{1}{n}$. (1.36)

1.1.3 Типові розв'язані задачі

Задача 1.1. Однофазний двообмотковий трансформатор ОС-16/0,22 був випробований у режимі неробочого ходу і короткого замикання. При неробочому ході напруги на обмотках трансформатора $U_{10} = 220$ В,

$U_{20} = 130$ В, струм $I_0 = 2$ А, втрати $P_0 = 75$ Вт. Під час короткого замикання напруга на первинній обмотці $U_K = 10$ В, втрати $P_K = 250$ Вт.

Визначити:

коефіцієнт трансформації n ;

струм неробочого ходу у відсотках від номінального значення i_0 % ;

напругу короткого замикання у відсотках від номінального значення u_K % ;

параметри Г- та Т-подібних схем заміщення;

струми I_1 , I_2 в обмотках та напругу U_2 на навантаженні

$R_H = 4,2$ Ом.

коефіцієнт потужності трансформатора при неробочому ході, короткому замиканні та навантаженні $R_H = 4,2$ Ом;

максимально можливий ККД у разі активного навантаження та при заданому навантаженні $R_H = 4,2$ Ом;

річний експлуатаційний ККД, якщо трансформатор працює під навантаженням $R_H = 4,2$ Ом протягом часу $T_H = 4200$ годин на рік, а решту часу знаходиться в режимі неробочого ходу.

Розв'язання. Розшифровка марки трансформатора: О – однофазний, С – сухий (тобто повітряного охолодження), 16 – номінальна потужність $S_{НОМ}$, кВА; 0,22 – номінальна напруга $U_{1Н}$ на первинній обмотці, кВ.

Скориставшись даними досліду неробочого ходу, який проводиться при номінальній напрузі на первинній обмотці $U_{10} = U_{1НОМ}$, визначаємо коефіцієнт трансформації (1.3):

$$n = \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{220}{130} = 1,7.$$

Розраховуємо номінальний струм первинної обмотки $I_{\text{НОМ}}$ і струм неробочого ходу у відсотках від $I_{\text{НОМ}}$ (1.7),(1.19):

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{16000}{220} = 72,7 \text{ А},$$

$$i_0 \% = \frac{I_0}{I_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% = \frac{2}{72,7} \cdot 100\% = 2,75\%.$$

За даними дослідження неробочого ходу знаходимо повний Z_0 , активний R_0 та індуктивний X_0 опори гілки намагнічування (1.5):

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{I_0} = \frac{220}{2} = 110 \text{ Ом},$$

$$R_0 = \frac{P_0}{I_0^2} = \frac{75}{4} = 18,75 \text{ Ом},$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = 108,4 \text{ Ом}.$$

За даними дослідження короткого замикання трансформатора, який виконується при номінальних струмах в обмотках, користуючись (1.9) і (1.10), обчислюємо:

- напругу короткого замикання у відсотках від $U_{\text{НОМ}}$

$$u_{\text{К}} \% = \frac{U_{\text{К}}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% = \frac{10}{220} \cdot 100\% = 4,54\%,$$

повний опір $Z_{\text{К}} = \frac{U_{\text{К}}}{I_{\text{К}}} = \frac{U_{\text{К}}}{I_{\text{НОМ}}} = \frac{10}{72,7} = 0,137 \text{ Ом},$

активний опір $R_K = \frac{P}{I_{1K}^2} = \frac{250}{72,7^2} = 0,047 \text{ Ом},$

реактивний опір $X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = 0,128 \text{ Ом}.$

Г-подібну схему заміщення трансформатора показано на рис. 1.1.

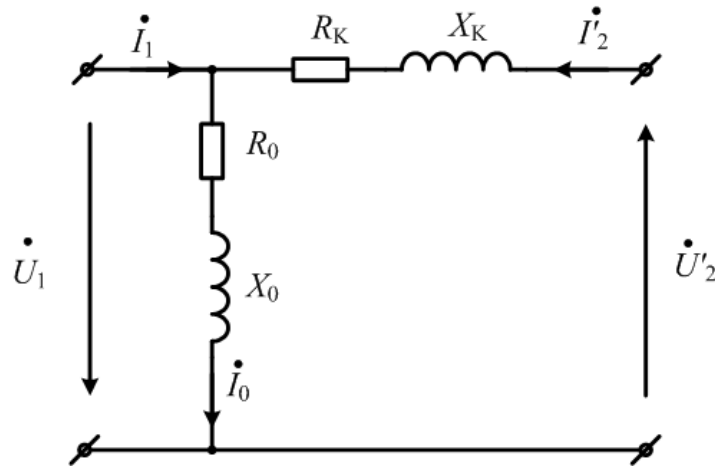


Рис. 1.1

Допускаючи, що потужність втрат розподіляється порівну між обмотками, знаходимо опори первинної та зведеної вторинної обмоток Г-подібної схеми заміщення трансформатора (рис. 1.2) за формулами (1.11):

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_K}{2} = \frac{0,047}{2} = 0,0235 \text{ Ом},$$

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{X_K}{2} = \frac{0,128}{2} = 0,064 \text{ Ом}.$$

Дійсні опори вторинної обмотки:

$$R_2 = \frac{R'_2}{n^2} = \frac{0,0235}{1,73^2} = 0,0078 \text{ Ом},$$

$$X_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{n^2} = \frac{0,064}{1,73^2} = 0,021 \text{ Ом}.$$

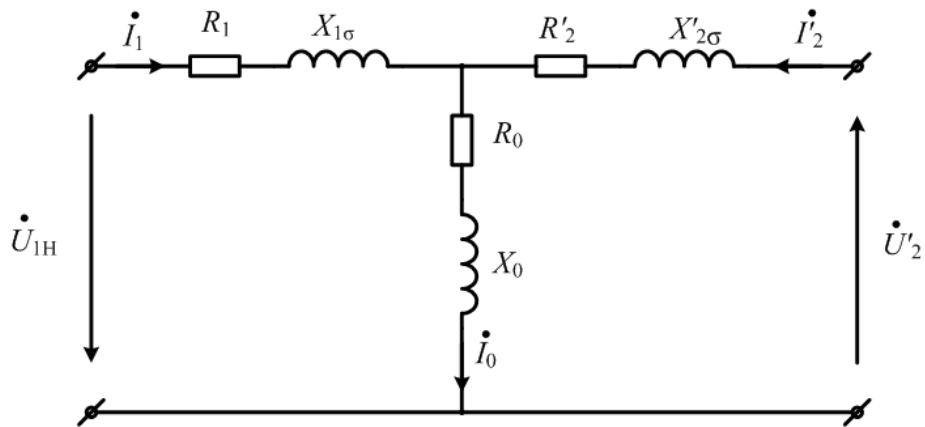


Рис. 1.2

Обчислюємо струми I_1 , I_2 в обмотках трансформатора і напругу U_2 на активному навантаженні $R_H = 4,2$ Ом. Для цього скористаємося T-подібною схемою заміщення (рис.1.2) і розрахуємо вхідний опір трансформатора при заданому навантаженні:

$$\underline{Z}_{\text{ВХ}} = R_1 + jX_{1\sigma} + \frac{(R'_2 + jX'_{2\sigma} + n^2 R_H) \cdot (R_0 + jX_0)}{R'_2 + jX'_{2\sigma} + n^2 R_H + R_0 + jX_0} = 11,8e^{j6,5^\circ} \text{ Ом.}$$

Тоді струм первинної обмотки

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_{\text{ВХ}}} = \frac{220}{11,8e^{j6,5^\circ}} = 18,64e^{-j6,5^\circ} \text{ А;}$$

зведений струм вторинної обмотки

$$\begin{aligned} \dot{I}'_2 &= \dot{I}_1 \frac{R_0 + jX_0}{R'_2 + jX'_{2\sigma} + n^2 R_H + R_0 + jX_0} = \\ &= 18,64e^{-j6,5^\circ} \frac{18,75 + j108,4}{0,0235 + j0,064 + 1,73^2 \cdot 4,2 + 18,75 + j108,4} = \\ &= 18,22e^{-j0,5^\circ} \text{ А;} \end{aligned}$$

дійсний струм вторинної обмотки

$$\dot{I}_2 = n \cdot \dot{I}'_2 = \frac{220}{130} \cdot 18,22e^{-j0,5^\circ} = 30,8e^{-j0,5^\circ} \text{ А};$$

напруга на навантаженні

$$\dot{U}_2 = R_H \dot{I}_2 = 4,2 \cdot 30,8e^{-j0,5^\circ} = 129,3e^{-j0,5^\circ} \text{ В.}$$

Знаходимо коефіцієнт потужності $\cos \varphi_1$ трансформатора:

у режимі неробочого ходу

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10} I_0} = \frac{P_0}{U_{\text{НОМ}} I_0} = \frac{75}{220 \cdot 2} = 0,17;$$

у разі короткого замикання

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{U_K I_{1K}} = \frac{P_K}{U_K I_{\text{НОМ}}} = \frac{250}{10 \cdot 72,7} = 0,34;$$

при навантаженні $R_H = 4,2 \text{ Ом}$ коефіцієнт потужності $\cos \varphi_1$ трансформатора визначається його вхідним опором $Z_{\text{ВХ}} = 11,8e^{j6,5^\circ} \text{ Ом}$, тому отже $\cos \varphi_1 = \cos 6,5^\circ = 0,728$.

ККД досягає максимального значення при однакових втратах в обмотках та осерді трансформатора. Максимальному ККД відповідає максимальний коефіцієнт навантаження, який визначаємо з рівності

$$\beta_{\text{ОПТ}}^2 P_K = P_0,$$

звідки

$$\beta_{\text{ОПТ}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}} = \sqrt{\frac{75}{250}} = 0,55.$$

Тоді при активному навантаженні ($\cos \varphi_2 = 1$) максимальний ККД трансформатора

$$\eta_{max} = \frac{\beta_{OPT} S_{НОМ} \cos \varphi_2}{\beta_{OPT} S_{НОМ} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta_{OPT}^2 P_K} =$$

$$= \frac{0,55 \cdot 16000 \cdot 1}{0,55 \cdot 16000 \cdot 1 + 75 + 0,3 \cdot 250} = 0,983.$$

Для навантаження $R_H = 4,2$ Ом

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2НОМ}} = \frac{I_2}{nI_{1НОМ}} = \frac{30,8}{1,7 \cdot 72,7} = 0,25;$$

$$\eta = \frac{\beta S_{НОМ} \cos \varphi_2}{\beta S_{НОМ} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K} =$$

$$= \frac{0,25 \cdot 16000}{0,25 \cdot 16000 + 75 + 0,0625 \cdot 250} = 0,978.$$

Річний експлуатаційний ККД для вказаного навантаження розраховуємо за формулою

$$\eta = \frac{\beta S_{НОМ} \cos \varphi_2 \cdot T_H}{\beta S_{НОМ} \cos \varphi_2 \cdot T_H + P_0 \cdot T_0 + \beta^2 P_K \cdot T_H},$$

де $T_H = 4200$ - кількість годин, які трансформатор працює під навантаженням; $T_0 = 8760$ - загальна кількість годин за рік, коли трансформатор працює в режимі неробочого ходу.

$$\eta = \frac{0,25 \cdot 16000 \cdot 1 \cdot 4200}{0,25 \cdot 16000 \cdot 1 \cdot 4200 + 75 \cdot 8760 + 0,0625 \cdot 250 \cdot 4200} = 0,96.$$

Задача 1.2. При вмиканні двох однакових однофазних трансформаторів на паралельну роботу виявилось, що їх первинні обмотки помилково ввімкнені на різні фази (рис. 1.3).

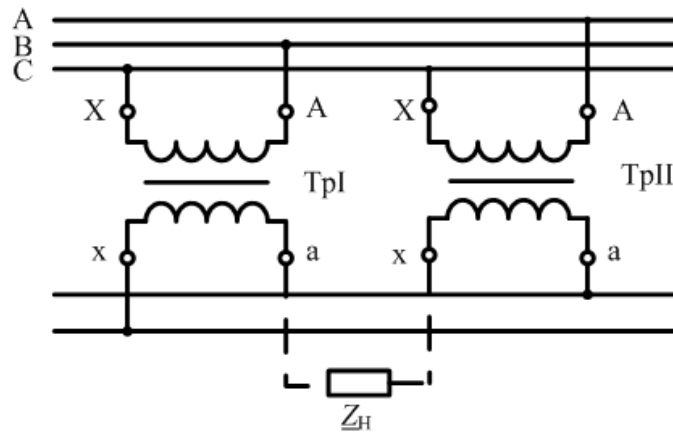


Рис. 1.3

Паспортні дані трансформаторів:

$$S_{\text{НОМ}(I)} = S_{\text{НОМ}(II)} = 40 \text{ кВА}, \quad U_{1\text{НОМ}(I)} = U_{1\text{НОМ}(II)} = 10,5 \text{ В},$$

$$U_{2\text{НОМ}(I)} = U_{2\text{НОМ}(II)} = 0,4 \text{ кВ}, \quad u_{\text{К}(I)} = u_{\text{К}(II)} = 4,5\% .$$

Обчислити зрівняльні струми в обмотках трансформаторів.

Розв'язання. Спрощена схема заміщення трансформаторів приведена на рис. 1.4. Зрівняльний струм, що проходить у первинних обмотках трансформаторів при відсутності навантаження, визначається за формулою

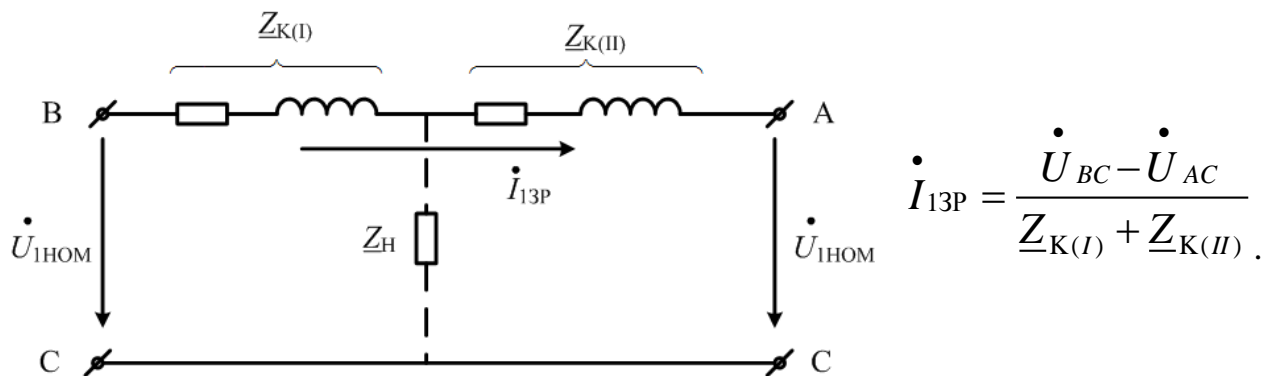


Рис. 1.4

Різниця напруг \dot{U}_{BC} і \dot{U}_{AC} внаслідок їхнього зсуву на 60° дорівнює лінійній напрузі мережі $\dot{U}_{\text{НОМ}}$.

Рівність опорів короткого замикання $\underline{Z}_{K(I)} = \underline{Z}_{K(II)}$ дозволяє підсумувати їх модулі. Скориставшись формулами (1.8) і (1.10) визначаємо

$$\underline{Z}_{K(I)} = \underline{Z}_{K(II)} = 2Z_K = \frac{2u_K \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}} \cdot 100} = 248 \text{ Ом.}$$

Таким чином,

$$I_{13P} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{2Z_K} = \frac{10500}{248} = 42,4 \text{ А.}$$

З урахуванням коефіцієнта трансформації зрівняльний струм вторинних обмоток

$$I_{23P} = n \cdot I_{13P} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} \cdot I_{13P} = \frac{10,5}{0,4} \cdot 42,4 = 1113 \text{ А.}$$

Висновок: співставлення зрівняльних струмів з номінальними значеннями

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} = 3,81 \text{ А та } I_{2\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} = 100 \text{ А свідчить про те, що}$$

описаний режим підключення трансформаторів є неприпустимим.

Задача 1.3. Як розподілиться навантаження $S = 1000$ кВА між двома ввімкненими паралельно трансформаторами з однаковими номінальними напругами первинної та вторинної обмоток?

Технічні дані трансформаторів:

$$S_{\text{НОМ}(I)} = 400 \text{ кВА, } u_{K(I)} \% = 4,5\% ;$$

$$S_{\text{НОМ}(II)} = 630 \text{ кВА, } u_{K(II)} \% = 5,5\% .$$

Розв'язання. Навантаження між паралельно працюючими трансформаторами розподіляється прямо пропорційно їх номінальним потужностям і обернено пропорційно напругам короткого замикання:

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{u_{к(II)}}{u_{к(I)}} \cdot \frac{S_{НОМ(I)}}{S_{НОМ(II)}}.$$

Враховуючи, що $S_{II} = S - S_I = 1000 - S_I$, знаходимо розподіл навантаження між трансформаторами:

$$\frac{S_I}{1000 - S_I} = \frac{5,5}{4,5} \cdot \frac{400}{630};$$

$$S_I = 437 \text{ кВА}, \quad S_{II} = 563 \text{ кВА}.$$

Висновок: нерівність напруг короткого замикання трансформаторів спричинює значне перевантаження одного з них $S_I > S_{НОМ(I)}$.

Задача 1.4. Однофазний автотрансформатор з первинною напругою $U_1 = 220$ В і вторинною напругою $U_2 = 127$ В має в первинній обмотці число витків $W_1 = 254$ і при повному активному навантаженні дає споживачеві струм $I_2 = 9$ А.

Визначити:

коефіцієнт трансформації, нехтуючи струмом неробочого ходу;

число витків вторинної обмотки;

струм I_1 через первинну обмотку;

струм I через спільну ділянку обмотки;

переріз S_1 проводу частини обмотки, через яку проходить тільки I_1 ;

переріз S проводу спільної частини обмотки, через яку проходить струм I (густина струму $j = 2$ А/мм²);

потужність S_M , яка передається у вторинне коло магнітним зв'язком обмоток і потужність S_e , яка передається електричним шляхом; коефіцієнт вигідності автотрансформатора.

Розв'язання. Визначаємо коефіцієнт трансформації n , враховуючи, що за умовою задачі струмом неробочого ходу можна знехтувати. У такому разі можна вважати, що наведена у первинній обмотці Е.Р.С. $E_1 \approx U_1$, а наведена у вторинній обмотці Е.Р.С. $E_2 \approx U_2$. Тоді

$$n = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{127} = 1,73.$$

За відомими значеннями n , W_1 обчислюємо кількість витків у вторинній обмотці:

$$W_2 = \frac{W_1}{n} = \frac{254}{1,73} = 147.$$

Нехтуючи втратами в автотрансформаторі, розраховуємо струм I_1 у первинній обмотці з рівності потужностей S_1 і S_2 :

$$U_1 I_1 = U_2 I_2,$$

звідки

$$I_1 = \frac{U_2 I_2}{U_1} = \frac{127 \cdot 9}{220} = 5,2 \text{ А.}$$

Знаходимо струм I через спільну ділянку обмотки за першим законом Кірхгофа:

$$I = I_2 - I_1 = 9 - 5,2 = 3,8 \text{ А.}$$

Обчислюємо перерізи S та S_1 проводів на вказаних ділянках обмотки, скориставшись заданою густиною струму:

$$S_1 = \frac{I_1}{j} = \frac{5,2}{2} = 2,6 \text{ мм}^2, \quad S = \frac{I}{j} = \frac{3,8}{2} = 1,9 \text{ мм}^2.$$

Визначаємо потужності (1.34):

$$\text{прохідну } S_{\text{ПР}} = U_2 I_2 = 127 \cdot 9 = 1143 \text{ ВА};$$

$S_{\text{М}}$, яка передається у вторинне коло магнітним потоком

$$S_{\text{М}} = U_2 I = 483 \text{ ВА};$$

$S_{\text{е}}$, яка передається струмом I через спільну ділянку обмотки

$$S_{\text{е}} = S_{\text{ПР}} - S_{\text{М}} = 1143 - 483 = 660 \text{ ВА}.$$

Розраховуємо коефіцієнт вигідності автотрансформатора (1.36):

$$K_{\text{В}} = 1 - \frac{1}{n} = 0,422.$$

Задача 1.5. При дослідженні кола були використані такі вимірювальні прилади: амперметр на 5 Ампер, вольтметр на 100 В, ватметр на 5 А та 100 В зі шкалою 500 поділок. Прилади ввімкнені в мережу змінного струму через вимірювальний трансформатор струму ТШЛ-20 10000/5 і вимірювальний трансформатор напруги НТМИ 10000/100. Визначити струм, напругу, активну потужність і коефіцієнт потужності кола, якщо амперметр показує $I_2 = 3$ А, вольтметр - $U_2 = 99,7$ В, а стрілка ватметра відхилилася на 245 поділок.

Розв'язання. Обчислюємо коефіцієнти трансформації:

$$\text{- трансформатора струму } n_I = \frac{I_1}{I_2} = \frac{10000}{5} = 2000;$$

- трансформатора напруги $n_U = \frac{U_1}{U_2} = \frac{10000}{100} = 100$.

Враховуючи, що вимірювальні прилади підключають до вторинних обмоток вимірювальних трансформаторів, а первинні обмотки таких трансформаторів вмикають у досліджуване коло, визначаємо напругу і струм на вході кола:

$$I_1 = n_I I_2 = 2000 \cdot 3 = 6000 \text{ А.}$$

$$U_1 = n_U U_2 = 100 \cdot 99,7 = 9970 \text{ В.}$$

За показом ватметра знаходимо активну потужність P_1 кола:

$$P_1 = n_U n_I P_2 = 100 \cdot 2000 \cdot 245 = 49 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Обчислюємо коефіцієнт потужності кола:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1} = \frac{49 \cdot 10^6}{9970 \cdot 6000} = 0,82.$$

Задача 1.6. Для трифазного трансформатора ТМ 63/10, обмотки якого з'єднані за схемою Y/Δ відомі такі параметри: нижча напруга $U_{2\text{НОМ}} = 400 \text{ В}$, втрати потужності при неробочому ході $P_0 = 265 \text{ Вт}$ і при короткому замиканні $P_K = 1280 \text{ Вт}$; струм неробочого ходу у відсотках від $I_{1\text{НОМ}}$ $i_0 = 2,8\%$; напруга короткого замикання у відсотках від $U_{1\text{НОМ}}$ $u_K = 5,5\%$.

Визначити:

- коефіцієнт трансформації фазних і лінійних напруг;
- номінальні струми первинних та вторинних обмоток;

- абсолютне значення струму неробочого ходу і напруги короткого замикання;
- опори фази трансформатора при короткому замиканні.

Побудувати зовнішню характеристику трансформатора для:

- активно-індуктивного навантаження ($\cos \varphi_2 = 0,8$);
- активно-ємнісного навантаження ($\cos \varphi_2 = -0,8$);
- активного навантаження.

Розв'язання. Марка трансформатора ТМ 63/10 означає: Т – трифазний, М – масляний, 63 – номінальна потужність $S_{\text{НОМ}}$, кВт, 10 – номінальна лінійна напруга на первинній обмотці $U_{1\text{НОМ}}$, кВ.

Розраховуємо коефіцієнт трансформації фазних напруг n_{Φ} і коефіцієнт трансформації лінійних напруг лінійний $n_{\text{Л}}$. Оскільки первинна обмотка трансформатора з'єднана зіркою, то напруга на фазі цієї обмотки

$$U_{1\Phi} = U_{1\text{Л}} / \sqrt{3} = 10000 / 1,73 = 5780,35 \text{ В.}$$

Вторинна обмотка з'єднана трикутником, тому

$$U_{2\Phi} = U_{2\text{Л}} = U_{2\text{НОМ}} = 400 \text{ В.}$$

$$n_{\Phi} = \frac{U_{1\Phi}}{U_{2\Phi}} = \frac{5780,35}{400} = 14,45, \quad n_{\text{Л}} = \frac{U_{1\text{Л}}}{U_{2\text{Л}}} = \frac{10000}{400} = 25.$$

Обчислюємо номінальні струми в обмотках, скориставшись формулою номінальної потужності $S_{\text{НОМ}}$ і нехтуючи втратами, тобто вважаючи ККД рівним одиниці:

$$S_{\text{НОМ}} = \sqrt{3}U_{1\text{НОМ}}I_{1\text{НОМ}} = \sqrt{3}U_{2\text{НОМ}}I_{2\text{НОМ}},$$

звідки

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}U_{1\text{НОМ}}} = \frac{63000}{1,73 \cdot 10000} = 3,64 \text{ А},$$

$$I_{2\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}U_{2\text{НОМ}}} = \frac{63000}{1,73 \cdot 400} = 91 \text{ А}.$$

Первинні обмотки з'єднані зіркою, тому в них номінальні фазні струми дорівнюють лінійним: $I_{1\Phi} = I_{1Л} = I_{1\text{НОМ}} = 3,64 \text{ А}$,

вторинні обмотки з'єднані трикутником, через це їх фазні струми

$$I_{2\Phi} = I_{2Л} / \sqrt{3} = I_{2\text{НОМ}} / \sqrt{3} = 52,6 \text{ А}.$$

Знаходимо абсолютне значення струму неробочого ходу I_0 і лінійної напруги короткого замикання $U_{\text{КЗ}}$ за формулами (1.7) і (1.10):

$$I_0 = \frac{i_0 \%}{100} I_{1\text{НОМ}} = 0,21 \text{ А},$$

$$U_{\text{КЗ}} = \frac{u_{\text{К}} \%}{100} U_{1\text{НОМ}} = 550 \text{ В}.$$

Визначаємо опори однієї фази трансформатора у разі короткого замикання, виходячи з того, що задане значення втрат $P_{\text{К}}$ відповідає номінальному значенню струму $I_{1\text{НОМ}}$.

Для фази трансформатора

$$\text{напруга короткого замикання } U_{\text{К}} = \frac{U_{\text{КЗ}}}{\sqrt{3}} = \frac{550}{1,73} = 317,92 \text{ В};$$

$$\text{струм короткого замикання } I_{\text{К}} = I_{1\text{НОМ}} = 3,64 \text{ А};$$

$$\text{втрати потужності } P_{\text{К}\Phi} = \frac{P_{\text{К}}}{3} = \frac{1280}{3} = 426,67 \text{ Вт};$$

$$\text{повний опір } Z_{\text{К}} = \frac{U_{\text{К}}}{I_{\text{К}}} = \frac{317,92}{3,64} = 87,34 \text{ Ом};$$

$$\text{активний опір } R_K = \frac{P_{K\Phi}}{I_{\text{НОМ}}^2} = \frac{426,67}{3,64^2} = 32,2 \text{ Ом};$$

$$\text{реактивний опір } X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{87,34^2 - 32,2^2} = 81,19 \text{ Ом.}$$

Для побудови зовнішніх характеристик трансформатора при різному характері навантаження спочатку розраховуємо активну $u_{KA} \%$ та реактивну $u_{KP} \%$ складові відсоткової напруги короткого замикання $u_K \%$

(1.12)

$$u_{KA} \% = \frac{P_K}{S_{\text{НОМ}}} 100\% = \frac{1280}{63000} \cdot 100\% = 2\%,$$

$$u_{KP} \% = \sqrt{u_K \%^2 - u_{KA} \%^2} = \sqrt{5,5^2 - 2^2} = 5,1\%$$

Розраховуємо відсотковий спад напруги у вторинній обмотці $\Delta u_2 \%$

(1.16):

- для активно-індуктивного (RL) навантаження

$$\Delta u_2 \% = \beta (u_{KA} \% \cos \varphi_2 + u_{KP} \% \sin \varphi_2) = \beta \cdot (2 \cdot 0,8 + 5,1 \cdot 0,6) = \beta \cdot 4,7\% ;$$

- для активно-ємнісного (RC) навантаження

$$\Delta u_2 \% = \beta (u_{KA} \% \cos \varphi_2 - u_{KP} \% \sin \varphi_2) = \beta \cdot (2 \cdot 0,8 - 5,1 \cdot 0,6) = -\beta \cdot 1,5\% ;$$

- для активного (R) навантаження

$$\Delta u_2 \% = \beta \cdot u_{KA} \% = \beta \cdot 2.$$

Для побудови графіка $U_2 = f(\beta)$, який відповідає певному характеру навантаження, доцільно задатися значеннями коефіцієнта навантаження $\beta = 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25$ і для кожного β розрахувати напругу U_2 на вторинній обмотці за формулою (1.18):

$$U_2 = \left(1 - \frac{\Delta u_2 \%}{100}\right) \cdot U_{2\text{НОМ}}$$

Результати розрахунків наведено в таблиці 1.1, графіки показано на рис. 1.5.

Таблиця 1.1

β	$\Delta u_2 \%$			$U_2, (B)$		
	RL навантаж.	RC навантаж.	R навантаж.	RL навантаж.	RC навантаж.	R навантаж.
0,25	1,17	-0,37	0,5	395	401	398
0,5	2,35	-0,75	1	391	403	396
0,75	3,52	-1,12	1,5	386	404	394
1	4,7	-1,5	2	381	406	392
1,25	5,87	-1,87	2,5	376	408	390

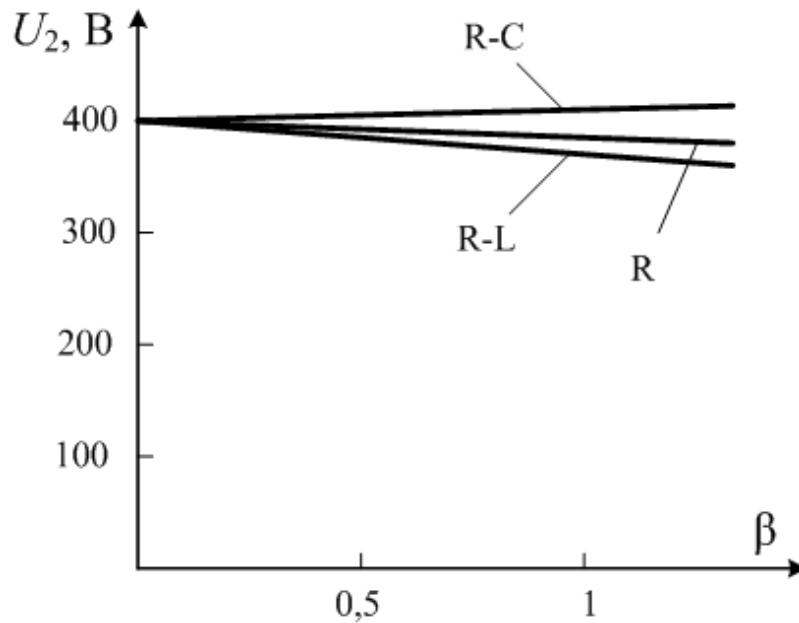


Рис. 1.5

Задача 1.7. Паспортні дані трифазного трансформатора ТМ100/6, обмотки якого з'єднані за схемою Y/Y , такі: номінальна потужність $S_{\text{НОМ}} = 100$ кВА, номінальна лінійна напруга первинної обмотки $U_{1\text{НОМ}} = 6$ кВ, вторинної $U_{2\text{НОМ}} = 0,4$ кВ; втрати потужності при неробочому ході $P_0 = 600$ Вт, при короткому замиканні $P_K = 2400$ Вт; струм неробочого ходу $i_0 = 7\%$, напруга короткого замикання $u_K = 5,5\%$.

Визначити параметри Т-подібної схеми заміщення однієї фази трансформатора.

Побудувати графіки:

залежності електричних втрат від навантаження $P_e = f(\beta)$;

залежності магнітних втрат від навантаження $P_M = f(\beta)$;

залежності ККД від навантаження $\eta = f(\beta)$ при коефіцієнті потужності навантаження $\cos\varphi_2 = 0,75$;

залежності ККД від коефіцієнта потужності навантаження $\eta = f(\cos\varphi_2)$ при номінальному струмі.

Побудувати векторну діаграму фази трансформатора для режиму роботи, коли коефіцієнт завантаження $\beta = 0,8$, а коефіцієнт потужності навантаження $\cos\varphi_2 = 0,75$.

Розв'язання. Т-подібну схему заміщення однієї фази трансформатора показано на рис. 1.6.

Для визначення опорів $R_1, X_{1\sigma}$ первинної обмотки та опорів $R'_2, X'_{2\sigma}$ зведеної вторинної обмотки скористаємося відомими значеннями P_K ,

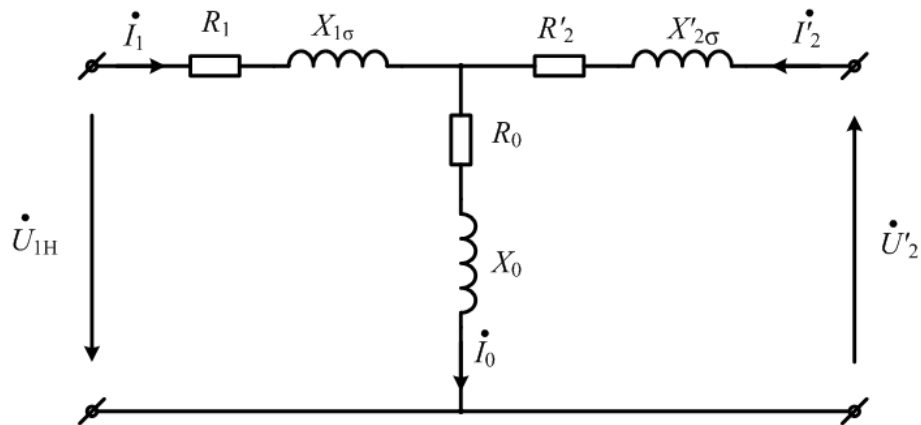


Рис. 1.6

$u_K\%$ і врахуємо, що паспортна величина P_K відповідає номінальним струмам в обмотках, тобто $I_K = I_{\text{НОМ}}$.

Розраховуємо номінальний струм первинної обмотки (1.20):

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 9,623 \text{ А.}$$

Обчислюємо абсолютне значення напруги при короткому замиканні (1.10):

$$U_K = \frac{u_K\% \cdot U_{\text{НОМ}}}{100} = \frac{5,5 \cdot 6000}{100} = 330 \text{ В.}$$

Знаходимо опори фази трансформатора при короткому замиканні:

- повний $Z_K = \frac{U_{\text{КФ}}}{I_{\text{КФ}}} = \frac{U_K}{\sqrt{3} I_{\text{НОМ}}} = 19,8 \text{ Ом};$

- активний $R_K = \frac{P_K}{3I_K^2} = \frac{P_K}{3I_{\text{НОМ}}^2} = \frac{2400}{3 \cdot 9,6^2} = 8,64 \text{ Ом},$

- реактивний $X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{19,8^2 - 8,7^2} = 17,815 \text{ Ом.}$

Допускаючи, що потужність втрат розподіляється між обмотками порівну, визначаємо опори обмоток (1.11):

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_K}{2} = \frac{8,7}{2} = 4,32 \text{ Ом}, \quad X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{X_K}{2} = \frac{17,9}{2} = 8,908 \text{ Ом}.$$

Розрахувавши коефіцієнт трансформації $n = U_{1\text{НОМ}}/U_{2\text{НОМ}} = 6000/4 = 15$, переходимо від зведених до реальних параметрів вторинної обмотки (1.11):

$$R_2 = \frac{R'_2}{n^2} = \frac{4,35}{15^2} = 0,019 \text{ Ом}, \quad X_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{n^2} = \frac{8,95}{15^2} = 0,04 \text{ Ом}.$$

Для обчислення опорів гілки намагнічування Z_0 , R_0 , X_0 використовуємо відомі значення P_0 , $i_0\%$ і враховуємо, що паспортна величина втрат P_0 відповідає номінальній напрузі на вході трансформатора $U_{10} = U_{1\text{НОМ}}$.

Абсолютне значення струму неробочого ходу (1.7)

$$I_0 = \frac{i_0\% \cdot I_{1\text{НОМ}}}{100} = \frac{0,07 \cdot 9,6}{100} = 0,00067 \text{ А}.$$

Опори гілки намагнічування (1.6):

$$\text{- повний } Z_0 = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{\sqrt{3}I_0} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 0,00067} = 5143 \text{ Ом};$$

$$\text{- активний } R_0 = \frac{P_0}{3I_0^2} = \frac{600}{3 \cdot 0,00067^2} = 440,8 \text{ Ом};$$

$$\text{- реактивний } X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{5176^2 - 445^2} = 5124 \text{ Ом}.$$

Побудова графіків залежностей електричних P_e та

магнітних P_M втрат від навантаження

Електричні втрати P_e у трансформаторі – це втрати в обмотках, спричинені їх нагріванням при проходженні струму. Електричні втрати є

змінними, оскільки їх величина залежить від струмів в обмотках. Задаючись значеннями коефіцієнта завантаження $\beta = 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25$, розраховуємо P_e за формулою $P_e = \beta^2 P_K = \beta^2 \cdot 2400$. Результати обчислень зведено у таблицю 1.2, а графік показано на рис. 1.7.

Магнітні втрати P_M у трансформаторі – це втрати у сталі осердя. Ці втрати залежать від напруги живлення U_1 . Якщо $U_1 = const$, то при зміні навантаження втрати P_M залишаються практично незмінними і приблизно рівними втратам P_0 у режимі неробочого ходу (рис. 1.7).

Таблиця 1.2

β	0,1	0,25	0,5	0,75	1	1,25
P_e , Вт	24	150	600	1350	2400	3750
P_M , Вт	600	600	600	600	600	600
η	0,923	0,961	0,969	0,966	0,962	0,956

Побудова графіка залежності ККД від навантаження для заданого коефіцієнта потужності $\cos \varphi_2 = 0,75$.

Розрахунок ККД проводимо за формулою (1.32):

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K} = \frac{\beta \cdot 75}{\beta \cdot 75 + 0,6 + \beta^2 \cdot 2,4}$$

Результати обчислень η для значень коефіцієнта завантаження $\beta = 0,1 \div 1,25$ занесені у таблицю 1.2, а графік залежності $\eta = f(\beta)$ показано на рис. 1.8.

Побудова графіка залежності ККД від коефіцієнта потужності навантаження $\eta = f(\cos \varphi_2)$ при номінальному струмі, тобто при

$$\beta = I_2 / I_{2\text{НОМ}} = 1.$$

Коли коефіцієнт завантаження $\beta = 1$, формула для розрахунку ККД набуває вигляду:

$$\eta = \frac{S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2}{S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 + P_0 + P_K} = \frac{10^5 \cdot \cos \varphi_2}{10^5 \cdot \cos \varphi_2 + 0,006 \cdot 10^5 + 0,024 \cdot 10^5} = \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_2 + 0,03}.$$

Результати розрахунків приведено в таблиці 1.3, а графік $\eta = f(\cos \varphi_2)$ показано на рис. 1.9.

Таблиця 1.3

$\cos \varphi_2$	0,2	0,4	0,6	0,8	1
η	0,985	0,993	0,995	0,996	0,997

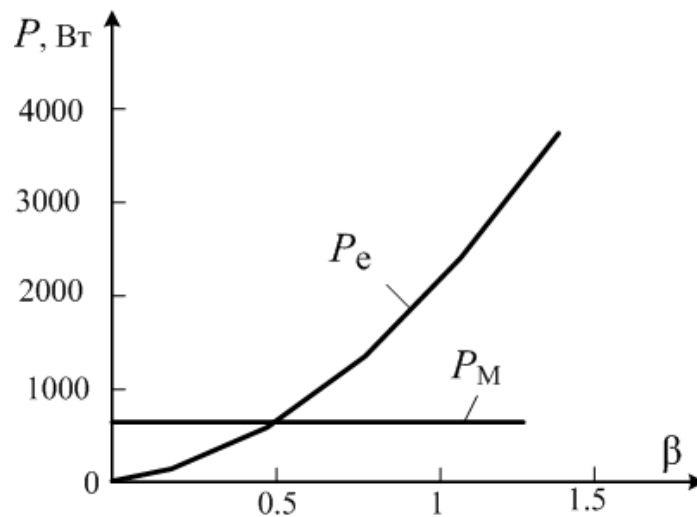


Рис. 1.7

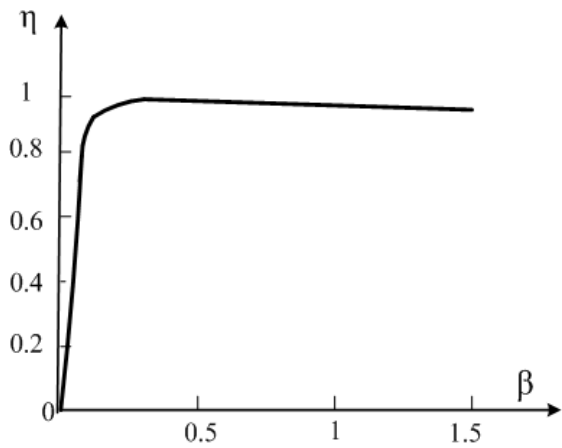


Рис. 1.8

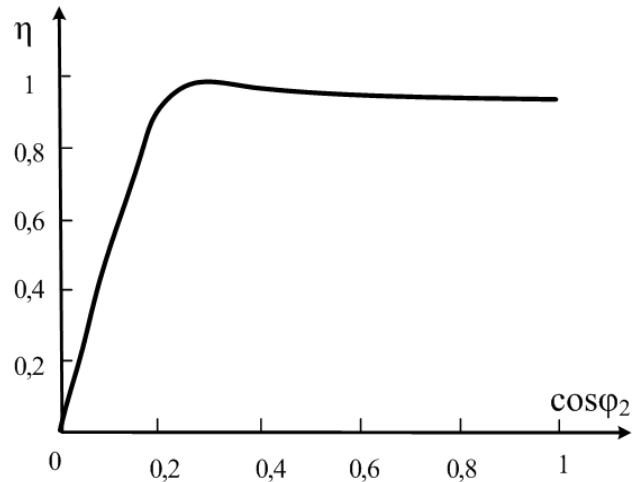


Рис. 1.9

Побудова векторної діаграми

для режиму $\beta = 0,8$ і $\cos \varphi_2 = 0,75$.

Для побудови векторної діаграми (рис. 1.10) необхідно визначити фазну напругу U_2 на вторинній обмотці трансформатора в указаному режимі. Спочатку обчислюємо відсоткову активну $u_{ка}$ і реактивну $u_{кр}$ складові напруги короткого замикання u_K % (1.12):

$$u_{ка} \% = \frac{P_K}{S_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{2,4}{100000} \cdot 100\% = 2,4\% ,$$

$$u_{кр} \% = \sqrt{(u_K \%)^2 - (u_{ка} \%)^2} = 4,95\% .$$

Відсотковий спад напруги у вторинній обмотці Δu_2 % розраховуємо за формулою

$$\begin{aligned} \Delta u_2 \% &= \beta (u_{ка} \% \cos \varphi_2 + u_{кр} \% \sin \varphi_2) = \\ &= 0,8 (2,4 \cdot 0,75 + 4,95 \cdot 0,66) = 4,17\% . \end{aligned}$$

Лінійна напруга на вторинній обмотці у заданому режимі

$$U_{2Л} = \left(1 - \frac{\Delta u_2 \%}{100}\right) U_{2НОМ} = (1 - 0,04) U_{2НОМ} = 383,315 \text{ В},$$

фазна напруга $U_2 = U_{2Л} / \sqrt{3} = 384 / 1,73 = 221,3 \text{ В},$

зведена фазна напруга $U'_2 = U_2 \cdot n^2 = 222 \cdot 15 = 3320 \text{ В}.$

Порядок побудови векторної діаграми, показаної на рис. 1.10.

1. Відкладаємо у масштабі напруг вектор \dot{U}'_2 .

2. Будуємо у масштабі струмів вектор струму \dot{I}'_2 , величину якого для $\beta = 0,8$ розраховуємо за формулами (1.4), (1.14):

$$I_2 = \beta I_{2НОМ} = \beta \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3} U_{2НОМ}} = \frac{0,8 \cdot 100 \cdot 1000}{1,73 \cdot 400} = 115,47 \text{ А},$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{n} = \frac{115,6}{15} = 7,7 \text{ А}.$$

На діаграмі вектор струму \dot{I}'_2 відстає за фазою від вектора напруги \dot{U}'_2 на заданий кут $\varphi_2 = \arccos 0,75 = 37,3^\circ$.

3. З кінця вектора \dot{U}'_2 паралельно вектору струму \dot{I}'_2 будуємо вектор напруги на активному опорі зведеної вторинної обмотки:

$$R'_2 I'_2 = 4,35 \cdot 7,7 = 33,25 \text{ В}.$$

З кінця цього вектора під кутом 90° до вектора струму \dot{I}'_2 відкладаємо вектор напруги на зведеному реактивному опорі вторинної обмотки:

$$X'_{2\sigma} I'_2 = 8,95 \cdot 7,7 = 68,57 \text{ В}.$$

4. Електрорушійну силу \dot{E}'_2 у вторинній обмотці знаходимо з рівняння електричного стану цієї обмотки:

$$\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + R'_2 \cdot \dot{I}'_2 + jX'_{2\sigma} \cdot \dot{I}'_2.$$

5. Вектор магнітного потоку $\dot{\Phi}_m$ випереджає вектор \dot{E}'_2 на кут 90° .

6. Вектор струму неробочого ходу \dot{I}_0 випереджає вектор $\dot{\Phi}_m$ на кут магнітних втрат $\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi_0$, де φ_0 - кут зсуву фаз між фазною напругою і струмом первинної обмотки у режимі неробочого ходу $\varphi_0 = \arccos \frac{R_0}{Z_0} = 85^\circ$, тоді $\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi_0 = 5^\circ$.

7. Вектор струму первинної обмотки \dot{I}_1 отримуємо з рівняння струмів трансформатора:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2 = \dot{I}_0 + \left(-\dot{I}'_2 \right).$$

Значення струму \dot{I}_1 можна визначити або за діаграмою або знехтувати малим струмом неробочого ходу \dot{I}_0 і вважати $\dot{I}_1 \approx \dot{I}'_2$. За діаграмою $I_1 = 8,25$ А.

8. Вектор напруги первинної обмотки трансформатора \dot{U}_1 отримуємо з рівняння електричного стану первинної обмотки:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \cdot \dot{I}_1 + jX_{1\sigma} \cdot \dot{I}_1,$$

де $R_1 I_1 = 4,35 \cdot 7,76 = 35,65$ В – напруга на активному опорі первинної обмотки; вектор цієї напруги відкладаємо з кінця вектора $(-\dot{E}_1)$ паралельно вектору струму \dot{I}_1 ; $X_{1\sigma} I_1 = 8,95 \cdot 7,76 = 73,5$ В – напруга на реактивному опорі первинної обмотки; вектор цієї напруги будемо з кінця вектора $R_1 \dot{I}_1$ перпендикулярно до вектора \dot{I}_1 .

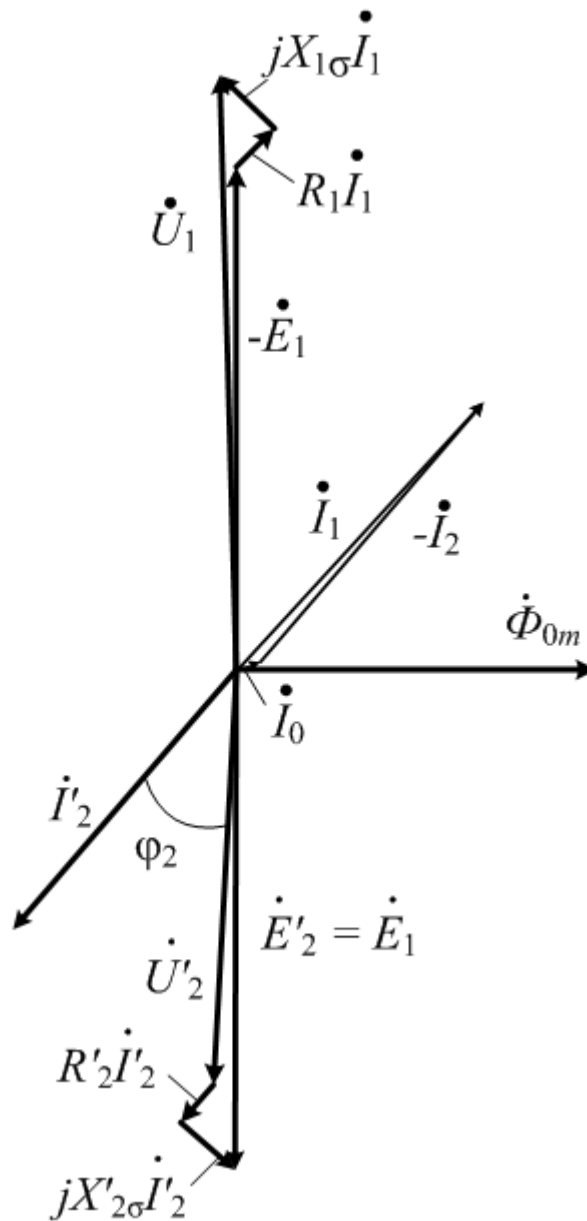


Рис. 1.10

1.1.4. Задачі для самостійного розв'язання

1.8. Однофазний трансформатор номінальна потужність якого $S_{\text{НОМ}} = 1600 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ввімкнений у мережу змінного струму з напругою 6300 В. Кількість витків первинної обмотки $W_1 = 2193$, вторинної $W_2 = 232$. Переріз сталі осердя $s = 530 \text{ см}^2$. Напруга короткого замикання $u_{\text{К}} = 5,5\%$, втрати короткого замикання $P_{\text{К}} = 18 \text{ кВт}$, втрати неробочого ходу $P_0 = 3,3 \text{ кВт}$. Обчислити Е.Р.С., що наводиться у вторинній обмотці, магнітну індукцію в осерді трансформатора, а також активну і реактивну складові напруги короткого замикання.

1.9. Визначити номінальну потужність трансформатора, ввімкненого у мережу змінного струму з напругою 3000 В, якщо номінальний струм вторинної обмотки $I_{2\text{НОМ}} = 23 \text{ А}$, коефіцієнт трансформації $n = 13$, ККД $\eta = 0,94$.

1.10. Трансформатор має номінальну потужність $S_{\text{НОМ}} = 25 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. Втрати у режимі неробочого ходу трансформатора $P_0 = 450 \text{ Вт}$, втрати у режимі короткого замикання $P_{\text{К}} = 800 \text{ Вт}$. Знайти коефіцієнт навантаження β , якщо коефіцієнт потужності $\cos \varphi_2 = 0,9$, а ККД $\eta = 94,5\%$.

1.11. Трансформатор працює у номінальному режимі 12 годин на добу, а в інший час – у режимі неробочого ходу. Його номінальна потужність $S_{\text{НОМ}} = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, втрати неробочого ходу $P_0 = 1,2 \text{ кВт}$, втрати короткого замикання $P_{\text{К}} = 3,5 \text{ кВт}$. Визначити середнє значення ККД трансформатора за добу.

1.12. Трансформатор з номіальною потужністю $S_{\text{НОМ}} = 1,5 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ має втрати неробочого ходу $P_0 = 60 \text{ Вт}$ і втрати короткого замикання $P_K = 100 \text{ Вт}$. Знайти потужність, споживану навантаженням у режимі, в якому коефіцієнт потужності $\cos \varphi_2 = 0,85$ і ККД має максимальне значення. Обчислити номінальний ККД.

1.13. Трансформатор має такі дані: номіальна потужність $S_{\text{НОМ}} = 160 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; номіальні напруги обмоток $U_{\text{ІНОМ}} = 10 \text{ кВ}$, $U_{\text{2НОМ}} = 400 \text{ В}$, втрати неробочого ходу $P_0 = 540 \text{ Вт}$, струм неробочого ходу $i_0 = 2,4\%$, втрати короткого замикання $P_K = 2650 \text{ Вт}$, напруга короткого замикання $u_K = 4,5\%$. Визначити: коефіцієнт трансформації; номіальні струми в обмотках; абсолютне значення струму неробочого ходу; ККД і відсоткову зміну напруги на вторинній обмотці трансформатора у двох режимах: $\beta = 1$ і $\beta = 0,5$. В обох випадках $\cos \varphi_2 = 0,8$.

1.14. У однофазного трансформатора з номіальною потужністю $S_{\text{НОМ}} = 1600 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ при короткому замиканні напруга $u_K = 6,5\%$ і втрати $P_K = 18 \text{ кВт}$. Визначити відсоткову зміну напруги на вторинній обмотці трансформатора при номіальних значеннях активного навантаження ($\cos \varphi_2 = 1$), активно - індуктивного навантаження ($\cos \varphi_2 = 0,8$) і активно - ємнісного навантаження ($\cos \varphi_2 = 0,8$).

1.15. Для визначення параметрів однофазного трансформатора потужністю $S_{\text{НОМ}} = 6,5 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ були проведені досліді неробочого ходу і короткого замикання. З досліді неробочого ходу відомі: напруги на обмотках $U_{10} = 220 \text{ В}$, $U_{20} = 13,75 \text{ В}$, струм $I_0 = 3 \text{ А}$, втрати

$P_0 = 70$ Вт. З досліду короткого замикання відомі: напруга $U_{1К} = 4$ В і струм $I_{1К} = 60$ А. Обчислити: коефіцієнт трансформації n ; коефіцієнт потужності $\cos \varphi_1$ трансформатора у режимі неробочого ходу і короткого замикання; активний, реактивний і повний опір у разі короткого замикання; ККД при активному номінальному навантаженні.

1.16. Однофазний трансформатор має номінальну потужність $S_{НОМ} = 100$ кВ·А, номінальні напруги на обмотках $U_{1НОМ} = 6$ кВ, $U_{2НОМ} = 380$ В. При короткому замиканні потужність втрат $P_K = 1970$ Вт, напруга $u_K = 4,5\%$. Обчислити відсоткову зміну напруги на вторинній обмотці трансформатора за номінального активно - індуктивного та активно - ємнісного навантаження у трьох режимах: $\cos \varphi_2 = 1; 0,8; 0,6$.

1.17. Для однофазного трансформатора відомі такі дані: номінальна потужність $S_{НОМ} = 4000$ кВ·А; номінальні напруги обмоток $U_{1НОМ} = 6$ кВ, $U_{2НОМ} = 400$ В; напруга короткого замикання $u_K = 7,5\%$; втрати короткого замикання $P_K = 33500$ Вт, втрати неробочого ходу $P_0 = 6700$ Вт; частота напруги живлення $f = 50$ Гц. Визначити зміну напруги на вторинній обмотці трансформатора при номінальному струмі, що проходить через індуктивне та ємнісне навантаження. Коефіцієнт потужності $\cos \varphi_2 = 0,8$.

1.18. Два однофазних трансформатори з однаковими номінальними потужностями $S_{НОМ} = 63$ кВ·А, але з різними напругами короткого замикання ($u_{1К} = 4,5\%$, $u_{2К} = 6\%$) ввімкнені паралельно. Як розподілиться навантаження між ними?

1.19. Два однофазних трансформатори мають наступні дані: $S_{1\text{НОМ}} = 63 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $u_{1\text{К}} = 4,5 \%$, $S_{2\text{НОМ}} = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $u_{2\text{К}} = 5\%$. Як розподілиться між ними загальна потужність $P = 150 \text{ кВт}$. Наскільки завантажений кожний трансформатор, якщо вони ввімкнені паралельно?

1.20. Два однофазних трансформатори працюють паралельно на одне навантаження. Дані першого трансформатора: $S_{1\text{НОМ}} = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $u_{1\text{К}} = 10 \%$, другого $S_{2\text{НОМ}} = 200 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $u_{2\text{К}} = 5\%$. Яку потужність можна отримати від спільної роботи трансформаторів?

1.21. Трифазний трансформатор має число витків на фазу в первинній обмотці $W_1 = 2080$, вторинній $W_2 = 80$. Первинна лінійна напруга $U_{1\text{Л}} = 10 \text{ кВ}$. Визначити коефіцієнти трансформації та напругу на вторинній обмотці для таких схем з'єднань обмоток: Y/Y ; Y/Δ ; Δ/Y ; Δ/Δ .

1.22. До вторинного кола трифазного трансформатора з номінальною потужністю $S_{\text{НОМ}} = 75 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ підключене симетричне навантаження $R = 2 \text{ Ом}$, $X_L = 1,5 \text{ Ом}$. Фазна напруга вторинної обмотки $U_{2\text{Ф}} = 400 \text{ В}$. Чи можна підключити до трансформатора ще якесь навантаження або ж трансформатор повністю завантажений?

1.23. Трифазний трансформатор працює на освітлювальну мережу з навантаженням $P_2 = 40 \text{ кВт}$. Вторинна напруга при такому навантаженні $U_2 = 220 \text{ В}$, а первинна $U_1 = 10000 \text{ В}$. Визначити первинний та вторинний струми трансформатора, якщо обмотки з'єднані за схемою Y/Y , а ККД та $\cos \phi$ дорівнюють $0,9$.

1.24. Трифазний масляний трансформатор типу ТМ-10/6, обмотки якого з'єднані за схемою Y/Y має такі паспортні дані: потужність

$S_{\text{НОМ}} = 10 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, напруга первинної обмотки $U_{1\text{НОМ}} = 6000 \text{ В}$, напруга вторинної обмотки $U_{2\text{НОМ}} = 400 \text{ В}$, напруга короткого замикання $u_{\text{К}} = 5,5\%$, струм неробочого ходу $I_0 = 0,01I_{1\text{НОМ}}$, втрати неробочого ходу $P_0 = 105 \text{ Вт}$, втрати короткого замикання $P_{\text{К}} = 335 \text{ Вт}$. Визначити номінальні струми обмоток, а також активний і реактивний опори первинної обмотки.

1.25. Номінальна потужність трансформатора $S_{\text{НОМ}} = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, номінальна напруга первинної обмотки $U_{1\text{НОМ}} = 6 \text{ кВ}$, вторинної $U_{2\text{НОМ}} = 380 \text{ В}$, втрати неробочого ходу $P_0 = 365 \text{ Вт}$, короткого замикання $P_{\text{К}} = 1970 \text{ Вт}$, напруга короткого замикання $u_{\text{К}} = 4,5\%$. Знайти напругу на вторинній обмотці трифазного трансформатора при номінальному індуктивному та ємнісному навантаженні ($\cos \varphi_2 = 0,8$).

1.26. Для вимірювання струму в колі трифазного синхронного генератора з номінальною потужністю $S_{\text{НОМ}} = 2500 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ і лінійною напругою $U_{\text{Л}} = 6000 \text{ В}$ використовується амперметр, розрахований на номінальний струм $I_{\text{НОМ}} = 5 \text{ А}$. Амперметр увімкнений у мережу через вимірювальний трансформатор струму. Знайти коефіцієнт трансформації цього трансформатора.

1.27. Через трансформатор струму $500/5 \text{ А}$ і трансформатор напруги $6000/100 \text{ В}$ до мережі змінного струму підключили амперметр, вольтметр та ватметр. Амперметр показав $I = 4 \text{ А}$, вольтметр – $U = 100 \text{ В}$, а ватметр – $P = 350 \text{ Вт}$. Знайти струм, напругу, активну потужність та коефіцієнт потужності мережі.

1.28. Для визначення потужності P , яка споживається колом, а також коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ кола були використані вимірювальні прилади:

вольтметр, розрахований на 150 В ;

амперметр, розрахований на струм 5 А і шкалою на 100 поділок;

ватметр з межами вимірів 150 В, 5 А і шкалою на 150 поділок.

Амперметр і ватметр увімкнені в мережу через трансформатори струму 50/5 А. Обчислити P і $\cos \varphi$, якщо вольтметр показав $U = 122$ В, стрілка амперметра відхилилась на 76 поділок, а стрілка ватметра – на 80 поділок.

1.29. Автотрансформатор увімкнений у мережу змінного струму з напругою $U = 220$ В. Число витків первинної обмотки $W_1 = 180$. Знайти покази вольтметра, підключеного до вторинної обмотки автотрансформатора, якщо рухомий контакт послідовно встановлюється в положення, коли число витків $W_2 = 25; 50; 100; 180$.

1.30. Обмотка однофазного автотрансформатора має $W = 1730$ витків і увімкнена у мережу з напругою $U = 660$ В. Від якого витка потрібно зробити відвод для вторинної обмотки, щоб напруга на навантаженні в режимі неробочого ходу становила $U_2 = 380$ В?

1.31. Автотрансформатор з числом витків $W = 450$ увімкнений у мережу струму з напругою $U = 220$ В. В яких місцях треба зробити відводи, щоб отримати напруги 10, 50, 75, 100, 127 та 150 В в режимі неробочого ходу.

1.32. Однофазний трансформатор замінили автотрансформатором, з такими ж номінальними напругами $U_1 = 380$ В; $U_2 = 220$ В. В обох

випадках струм вторинної обмотки $I_2 = 9 \text{ A}$. Чому дорівнює коефіцієнт вигідності автотрансформатора?

1.1.5. Завдання на індивідуальну розрахунково-графічну роботу

Для трифазного трансформатора, дані якого наведені в таблиці 1.4,

визначити:

- коефіцієнт потужності неробочого ходу $\cos \varphi_0$;
- опори обмоток трансформатора $R_1, X_{1\sigma}, R_2, X_{2\sigma}$;
- опори гілки намагнічування Z_0, R_0, X_0 ;
- кут магнітних втрат δ .

Накреслити:

- Г-подібну та Т-подібну схему заміщення трансформатора.

Побудувати:

• зовнішню характеристику $U_2 = f(\beta)$ для активного, активно-індуктивного ($\cos \varphi_2 = 0,7$) та активно-ємнісного ($\cos \varphi_2 = -0,7$) навантаження;

• графік залежності ККД від коефіцієнта потужності $\eta = f(\cos \varphi_2)$ при коефіцієнті завантаження $\beta = 0,8$;

• графік залежності ККД від завантаження $\eta = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = 0,7$;

• графік залежності електричних втрат від коефіцієнта завантаження $P_e = f(\beta)$;

• графік залежності магнітних втрат від коефіцієнта завантаження $P_M = f(\beta)$;

• векторну діаграму фази трансформатора при активно-індуктивному навантаженні ($\cos \varphi_2 = 0,7$).

Таблиця 1.4.

№ варі анта	Група з'єднань	$S_{\text{НОМ}}$, кВА	$U_{\text{ІНОМ}}$, В	$U_{\text{2НОМ}}$, В	$u_{\text{К}}$, %	$P_{\text{К}}$, Вт	P_0 , Вт	i_0 , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$Y/Y_0 - 0$	10	6300	400	5,0	335	105	10
2	$Y/\Delta - II$	20	6300	230	5,0	600	180	9,0
3	$Y/Y_0 - 0$	30	10000	400	5,0	850	300	9,0
4	$Y/Y_0 - 0$	50	10000	400	5,0	1325	440	8,0
5	$Y/Y_0 - 0$	75	10000	230	5,0	1875	590	7,5
6	$Y/Y_0 - 0$	100	10000	525	5,0	2400	730	7,5
7	$Y/\Delta - II$	180	10000	525	5,0	4100	1200	7,0
8	$Y/Y_0 - 0$	240	10000	525	5,0	5100	1600	7,0
9	$Y/\Delta - II$	320	35000	10500	6,5	6200	2300	7,5
10	$Y/Y_0 - 0$	420	10000	525	5,5	7000	2100	6,6
11	$Y/Y_0 - 0$	25	6000	230	4,5	600	125	3,0
12	$Y/Y_0 - 0$	25	10000	230	4,7	690	125	3,0
13	$Y/\Delta - II$	25	6000	400	4,5	600	125	3,0
14	$Y/\Delta - II$	25	10000	400	4,7	650	125	3,5
15	$Y/Y_0 - 0$	40	10000	230	4,5	880	180	3,0
16	$Y/Y_0 - 0$	40	6000	250	4,0	880	180	3,0
17	$Y/Y_0 - 0$	40	6000	400	4,7	1000	190	3,5

Продовження таблиці 1.4								
18	$Y/\Delta - II$	40	10000	400	4,0	675	125	3,2
19	$Y/\Delta - II$	63	6000	230	4,5	1280	260	2,8
20	$Y/\Delta - II$	63	6000	400	4,5	1250	290	2,8
21	$Y/\Delta - II$	63	10000	250	4,7	1470	260	2,8
22	$Y/Y_0 - 0$	63	10000	400	4,7	1470	240	3,0
23	$Y/Y_0 - 0$	63	2000	400	4,7	1470	270	2,8
24	$Y/Y_0 - 0$	63	20000	230	4,5	1490	270	2,8
25	$Y/Y_0 - 0$	63	2000	400	4,5	1270	270	2,8
26	$Y/\Delta - II$	100	10000	230	4,7	2270	365	2,6
27	$Y/\Delta - II$	100	10000	400	4,7	2270	365	2,6
28	$Y/\Delta - II$	100	6000	230	4,5	1970	365	2,6
29	$Y/Y_0 - 0$	100	6000	400	4,5	1970	365	2,6
30	$Y/\Delta - II$	100	20000	230	4,7	2270	465	2,6
31	$Y/Y_0 - 0$	100	20000	400	4,5	2250	470	2,6
32	$Y/\Delta - II$	100	35000	230	4,7	2270	465	2,6
33	$Y/Y_0 - 0$	100	3500	400	4,7	2270	465	2,6
34	$Y/\Delta - II$	160	6000	230	4,5	2650	540	2,4
35	$Y/\Delta - II$	160	6000	400	4,5	2650	540	2,4
36	$Y/Y_0 - 0$	160	10000	230	4,5	3100	540	2,4
37	$Y/Y_0 - 0$	160	10000	400	4,5	3100	540	2,4
38	$Y/\Delta - II$	160	6000	690	4,5	2650	540	2,4
39	$Y/\Delta - II$	250	6000	230	4,5	3700	780	2,4
40	$Y/\Delta - II$	250	6000	400	4,5	3700	780	2,6
41	$Y/Y_0 - 0$	250	10000	230	4,7	4200	780	2,6

Продовження таблиці 1.4								
42	$Y/Y_0 - 0$	250	10000	690	4,7	4200	780	2,3
43	$Y/Y_0 - 0$	400	3000	400	4,5	5500	1080	3,2
44	$Y/Y_0 - 0$	400	6000	400	4,5	5500	1080	3,2
45	$Y/Y_0 - 0$	400	6000	690	4,5	5500	1050	3,2
46	$Y/Y_0 - 0$	400	6300	400	4,5	5500	1030	3,2
47	$Y/Y_0 - 0$	400	10000	230	4,5	5500	1025	3,2
48	$Y/Y_0 - 0$	400	10000	400	4,7	5500	1020	3,6
49	$Y/Y_0 - 0$	400	10000	690	4,7	5100	1050	3,2
50	$Y/Y_0 - 0$	630	3000	400	5,0	7600	1600	3,4

1.2. Асинхронні двигуни

1.2.1. Основні теоретичні положення

В інженерній практиці асинхронні машини можуть бути використані у режимі двигуна, генератора та в гальмівному режимі, а також виконувати функції фазорегулятора, індукційного регулятора напруги, тахогенератора, перетворювача частоти. На даний час асинхронну машину найчастіше використовують як двигун.

Асинхронні двигуни поширені у промисловості завдяки їх простій конструкції, надійності в роботі та відносно невисокої вартості.

Враховуючи особливе значення асинхронних двигунів для промисловості, слід добре вивчити фізичну суть їх роботи.

Робота асинхронного двигуна ґрунтується на:

- 1) утворенні обертового магнітного поля;
- 2) одержанні наведеної Е.Р.С. і струму в роторі;
- 3) взаємодії обертового магнітного поля статора і струму в роторі.

У разі живлення трифазної обмотки статора трифазним змінним струмом з частотою f_1 у середині статора виникає обертове магнітне поле. **Під обертовим магнітним полем розуміють таке поле, магнітна вісь якого (напрямок, вдовж якого величина магнітної індукції весь час максимальна) обертається в просторі з постійною кутовою швидкістю, тобто таке магнітне поле, яке можна утворити обертанням з постійною швидкістю системи з p пар постійних магнітів (або електромагнітів) зі змінною полярністю [$N, S, N, S \dots$].**

Швидкість обертання поля статора визначають за формулою

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p},$$

де f_1 - частота струму в обмотці статора.

Кругове обертове магнітне поле існує тільки за умови просторової і часової симетрії, тобто коли обмотки симетрично розміщені на внутрішній поверхні статора, і струми в них утворюють симетричну систему. Отже, всередині 3-фазної обмотки статора (симетрія у просторі), що живиться 3-фазним струмом (симетрія у часі), виникає кругове обертове поле.

Це поле перетинає провідники як статора, так і ротора і наводить в них Е.Р.С. E_1 і E_2 . Е.Р.С. E_2 у замкненій обмотці ротора створює струм I_2 . Напрямок Е.Р.С. і струму в провідниках ротора визначають за правилом правої руки. (Треба пам'ятати, що правило правої руки стосується

провідника, який рухається відносно поля, а не обертового магнітного поля). Струм ротора I_2 , взаємодіючи з обертовим магнітним полем, утворює обертовий момент M , величина якого визначає швидкість обертання ротора n_2 . Напрямок сили взаємодії та моменту M визначають за правилом лівої руки. Під дією моменту ротор обертається в той самий бік, в який обертається поле статора.

Швидкість обертання ротора відносно швидкості обертання магнітного поля статора характеризується величиною, яку називають ковзанням

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \text{ або у відсотках } s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\% .$$

Коли обмотку ротора розімкнено, то, не дивлячись на максимальну Е.Р.С. $E_2 = E_{20}$ і частоту $f_2 = f_1$, струм ротора I_2 , момент M і швидкість ротора n_2 дорівнюватимуть нулю – ротор буде нерухомим.

Мінімальне значення Е.Р.С. $E_2 = 0$ було б без перетинання полем витків обмотки ротора, тобто за синхронної швидкості ротора, коли $n_2 = n_1$ і $f_2 = 0$. У такому випадку струм I_2 та обертовий момент M знову б дорівнювали нулю, і рух ротора зі синхронною швидкістю був би неможливий.

Ротор двигуна може обертатися тільки зі швидкістю n_2 , меншою за n_1 , тобто з несинхронною або асинхронною швидкістю. Ось чому двигун називають асинхронним. Напрямок обертання ротора збігається з напрямом обертання поля статора.

Різниця між швидкістю поля статора n_1 і ротора n_2 визначає швидкість $(n_1 - n_2)$ перетинання ротора полем статора, що призводить до

наведення в роторі Е.Р.С. E_2 і струму I_2 . Поява трифазного струму в роторі спричинює утворення обертового магнітного поля ротора, швидкість якого відповідає швидкості перетинання $(n_1 - n_2)$. Оскільки ротор обертається зі швидкістю n_2 , то загальна швидкість обертового поля ротора

$$n'_2 = (n_1 - n_2) + n_2 = n_1,$$

тобто дорівнює швидкості поля статора. Отже, поля статора і ротора взаємно нерухомі, що дозволяє векторно скласти їх магнітні потоки і отримати основний магнітний потік машини:

$$\overline{\Phi}_{\text{СТ}} + \overline{\Phi}_{\text{РОТ}} = \overline{\Phi}.$$

В асинхронному двигуні основний магнітний потік Φ зв'язує системи статора і ротора подібно до того, як у трансформаторі магнітний потік в осерді зв'язує нерухомі обмотки. Основний магнітний потік Φ наводить в обмотках статора і ротора Е.Р.С.

$$E_1 = 4,44k_{01}W_1f_1\Phi, \quad E_2 = 4,44k_{02}W_2f_2\Phi.$$

де k_{01} і k_{02} – коефіцієнти обмоток, які менші за одиницю. (У трансформаторах вони дорівнюють одиниці, тому що Е.Р.С. окремих витків обмотки трансформатора складаються не геометрично, а алгебраїчно).

Взаємна нерухомість полів (відповідно намагнічувальних сил статора і ротора) є одним із загальних законів для електричних машин. На цю особливість слід звернути увагу, оскільки завдяки їй можна відображати вектори намагнічувальних сил статора і приведенного ротора на одній діаграмі й застосовувати до асинхронного двигуна ряд висновків теорії трансформаторів.

Для полегшення розрахунків режими асинхронної машини, що обертається, зводять до еквівалентних режимів машини із загальмованим ротором. При такому зведенні механічна потужність, яку розвиває двигун у разі рухомого ротора, дорівнюватиме тепловій потужності, яка поглинається у введеному в коло нерухомого ротора умовному опорі

$$R = \frac{R_2}{s} - R_2.$$

У машині створюється режим, аналогічний трансформаторному, що дає змогу використати схему заміщення і векторну діаграму трансформатора при активному навантаженні. Параметри схеми заміщення є одночасно і параметрами асинхронного двигуна. Їх можна визначити як шляхом розрахунків, так і експериментально.

Найбільш наочно властивості машини відображуються її характеристиками, які треба вміти будувати і аналізувати. Для оцінки роботи асинхронного двигуна використовують залежність обертового моменту від ковзання $M = f(s)$ і відповідну механічну характеристику $M = f(n_2)$. Тому слід твердо засвоїти рівняння обертового моменту M , що має (без обмежень) такий вигляд:

$$M = \frac{m_1 U_1^2 R_2'}{\Omega_1 s \left[(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}.$$

Надаючи різні значення ковзанню s , за відомими параметрами двигуна можна визначити M і побудувати графіки залежностей $M = f(s)$ і $M = f(n_2)$ (рис. 1.11).

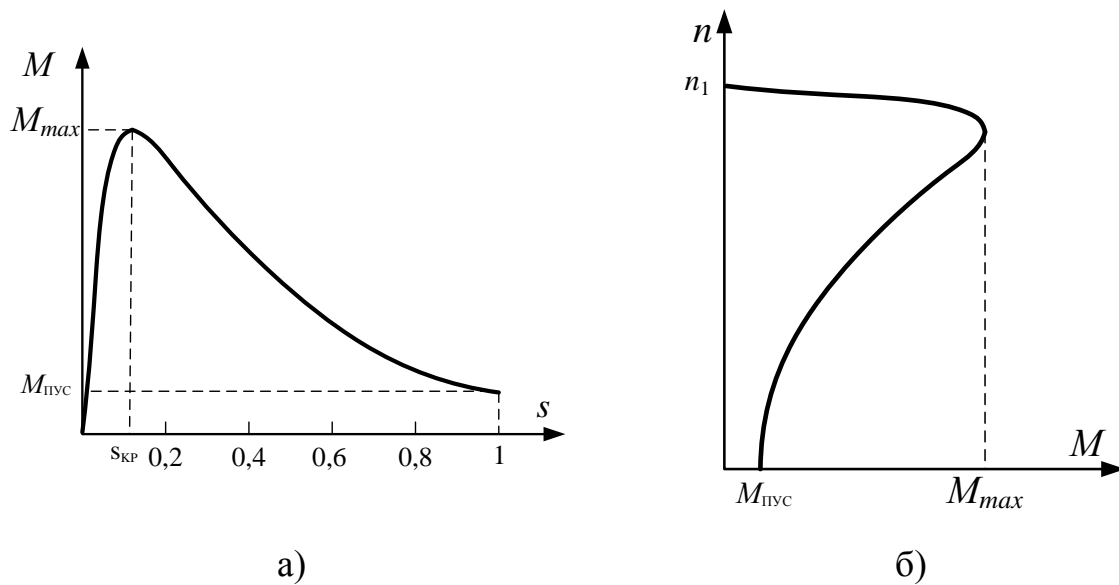


Рис. 1.11

При певному ковзанні, яке називають критичним $s_{\text{КР}}$, момент набуває максимального значення M_{max} . Значення $s_{\text{КР}}$ обчислюють з рівняння $\frac{dM}{ds} = 0$. З достатньою для практики точністю вважають, що $s_{\text{КР}} = R'_2 / (X_1 + X'_2)$. Слід звернути увагу на те, що $s_{\text{КР}}$ не залежить від напруги живлення і визначається параметрами самого двигуна, в основному активним опором R_2 в колі ротора. Для двигунів загального використання критичне ковзання становить $s_{\text{КР}} = 0,1 \div 0,2$. Підставивши вираз для $s_{\text{КР}}$ у рівняння обертового моменту і нехтуючи величиною R_1 , отримають формулу для максимального моменту

$$M_{\text{max}} = \frac{m_1 U_1^2}{2\Omega_1 (X_1 + X'_2)},$$

з якої видно, що M_{max} визначається насамперед величиною напруги живлення і не залежить від активного опору кола ротора. Зазвичай перевантажувальна здатність двигуна $\lambda = M_{max}/M_{НОМ} = 1,7 \div 3$.

Вираз пускового моменту $M_{ПУС}$, який розвиває двигун на валу нерухомого ротора впливає з рівняння обертового моменту при $s = 1$

$$M_{ПУС} = \frac{m_1 U_1^2 R'_2}{\Omega_1 \left[(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}.$$

Для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором кратність пускового моменту $M_{ПУС}/M_{НОМ} = 0,7 \div 1,8$, а кратність пускового струму $I_{ПУС}/I_{НОМ}$ повинна знаходитись в межах $5 \div 7$.

На практиці для побудови механічної характеристики широко використовують наближену формулу

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

Цю формулу вперше застосував М.Клосс, тому її часто називають формулою Клосса. Вона дає можливість побудувати механічну характеристику за даними двигуна, взятими з каталогу ($M_{max}, \lambda = M_{max}/M_{НОМ}$). Спочатку визначають критичне ковзання

$$s_{КР} = s_{НОМ} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right),$$

потім, задаючись різними значеннями s , обчислюють за формулою Клосса відповідні значення M . Зазвичай, розрахунки проводять для таких величин s :

$$s = s_{НОМ}; s_{КР}; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1.$$

Аналізуючи характеристики $M = f(s)$ і $M = f(n_2)$ слід звернути увагу на те, що вони складаються з двох ділянок. Перша ділянка ($0 < s < s_{кр}$, $M < M_{max}$) практично прямолінійна; фізично це пояснюється тим, що за малих ковзань, тобто при великій швидкості обертання n_2 , індуктивний опір ротора стає дуже малим, і в рівнянні обертового моменту ним можна знехтувати. Друга ділянка ($s > s_{кр}$, $M > M_{max}$) має вигляд гіперболи, тому що при пуску і малій швидкості обертання n_2 активний опір ротора значно менший, ніж індуктивний.

Для правильної експлуатації двигуна потрібно розуміти, що його стійка робота в усталеному режимі можлива за такої швидкості обертання ротора, коли електромагнітний момент двигуна M врівноважує момент M_0 статичного опору $M = M_0$. Якщо $M > M_0$, то швидкість ротора зростатиме, а при $M < M_0$ - спадатиме. Стійкість роботи залежить від форми механічних характеристик двигуна і робочого механізму, який він приводить у рух. Критерієм стійкості роботи є виконання умови

$$\frac{dM}{dn_2} < \frac{dM_0}{dn_2}.$$

Ця умова виконується тільки в межах першої ділянки механічної характеристики асинхронного двигуна (АД). Отже, асинхронний двигун при роботі на прямолінійній частині характеристики має властивість внутрішнього саморегулювання, завдяки якій обертовий момент автоматично регулюється так, що $M = M_0$. Друга ділянка характеристики є неробочою.

Вивчаючи асинхронний двигун, необхідно приділити увагу його робочим характеристикам, під якими розуміють залежності від потужності

на валу P_2 при $U_1 = const$ таких величин: 1) швидкості обертання n_2 ; 2) моменту на валу M_2 ; 3) струму статора I_1 ; 4) споживаної потужності P_1 ; 5) коефіцієнта потужності $\cos \varphi_1$; 6) ККД. Робочі характеристики дають можливість визначити всі величини, що описують режим роботи двигуна при різних навантаженнях.

Основний напрям під час вивчення електричних машин – це практика їх правильного вибору та експлуатації в різних режимах. Зазвичай вимоги до двигунів такі: простота конструкції та експлуатації; високі коефіцієнти корисної дії та потужності; великий пусковий момент $M_{\text{ПУС}}$; невеликий пусковий струм $I_{\text{ПУС}}$. Ці вимоги можуть дещо суперечити одна одній, тому слід чітко уявляти суть асинхронного обертання ротора, розуміти механізм саморегулювання та причини великих кратностей пускового струму. Для правильної експлуатації двигуна важливо знати вплив опору ротора на величини η , $\cos \varphi$, $I_{\text{ПУС}}$, $M_{\text{ПУС}}$. Шляхом увімкнення додаткового реостата з опором R_d в коло фазного ротора можна зменшити пусковий струм $I_{\text{ПУС}}$, збільшити пусковий момент до максимального значення M_{max} , підвищити коефіцієнт потужності $\cos \varphi$. У той же час збільшення опору кола ротора спричинює суттєве зниження ККД двигуна. Якщо реостат R_d вводити тільки під час пуску, то зменшення ККД буде незначним. Тривале увімкнення додаткового реостату R_d у коло ротора пов'язане з режимами регулювання швидкості обертання. Кожному значенню R_d при заданому моменті опору на валу відповідає своя швидкість обертання, а також певне значення ККД. Важливо пам'ятати, що увімкнення додаткового реостату в

коло ротора можливо тільки у випадку фазного виконання ротора, оскільки конструкція короткозамкненого ротора не дозволяє підключень зовні.

Технологічні процеси багатьох виробництв передбачають примусову зміну швидкості обертового або поступального руху виробничих механізмів шляхом зміни швидкості обертання двигунів. При вивченні способів регулювання швидкості асинхронного двигуна слід особливу увагу приділити найбільш перспективному на даний час: живлення двигуна відбувається від інвертора, величина напруги і частота якого змінюються керуючими сигналами, що подаються на інвертор від мікропроцесорного контролера.

За умови правильного вибору потужності асинхронного двигуна його істотним недоліком є відносно низький коефіцієнт потужності $\cos \varphi$. Зазвичай виникає необхідність збільшити коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ всієї установки, до складу якої входить асинхронний двигун. Якщо зважати тільки на економічність роботи генераторів станцій і електричних мереж, то підвищення $\cos \varphi$ установки можна досягти, не збільшуючи $\cos \varphi$ самого двигуна. Достатньо паралельно двигуну підключити батарею конденсаторів, які будуть працювати як місцевий генератор реактивної потужності. Цей захід розвантажить мережу живлення від реактивних струмів, внаслідок чого зменшиться повний струм мережі.

Реактивну потужність батареї конденсаторів, розраховану на кожну фазу двигуна, визначають формулою

$$Q_C = P(tg \varphi_1 - tg \varphi_2),$$

де φ_1 – кут зсуву фаз до поліпшення $\cos \varphi_1$;

φ_2 – кут зсуву фаз після поліпшення.

Знаючи потужність конденсаторів $Q_C = U^2 \omega C$ та напругу мережі, можна знайти їх ємність. Практично безпосереднє поліпшення $\cos \varphi$ кожного окремого двигуна за допомогою конденсаторів не економічно. Доцільно поліпшувати $\cos \varphi$, вмикаючи конденсатори на боці високої напруги мережі живлення.

Технічні дані асинхронних двигунів.

У каталозі та паспорті двигуна вказані такі дані:

тип двигуна;

- номінальна потужність $P_{\text{НОМ}}$;
- номінальна напруга $U_{\text{НОМ}}$;
- номінальний струм $I_{\text{НОМ}}$;
- номінальна швидкість обертання $n_{\text{НОМ}}$;
- номінальний ККД $\eta_{\text{НОМ}}$;
- номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{НОМ}}$;
- кратність максимального моменту (перевантажувальна здатність)

$$\lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}}.$$

Для двигуна з короткозамкненим ротором додатково вказують відношення

пускового моменту до номінального $\frac{M_{\text{ПУС}}}{M_{\text{НОМ}}}$ і відношення пускового

струму до номінального $\frac{I_{\text{ПУС}}}{I_{\text{НОМ}}}$; для двигуна з фазним ротором – напругу

між кільцями нерухомого розімкненого ротора $U_{2\text{К}} = E_{2\text{К}}$ і номінальний струм ротора $I_{2\text{НОМ}}$.

Літери та цифри у позначенні типу двигуна дають уяву про призначення двигуна, типорозмір, число пар полюсів.

Номінальною потужністю $P_{\text{НОМ}}$ двигуна загального призначення називають потужність, яку двигун може розвивати протягом тривалого часу роботи, нагріваючись до температури, припустимої класом ізоляції обмоток. Якщо температура двигуна певний час перевищує припустиму, то погіршується механічна та електрична міцність ізоляції, змінюється її структура. Це може спричинити пробій ізоляції, внаслідок чого двигун вийде з ладу. Чи можливо навантажити двигун потужністю більшою ніж номінальна? Можливо, але короткочасно за умови, що перед тим двигун працював у режимі недовантаження і його температура була нижче припустимої. Тривалість і ступінь перевантаження у сукупності не повинні приводити до перегріву двигуна.

У каталозі та паспорті двигуна зазвичай вказують два значення номінальної напруги, наприклад, 380/220. Це означає, що даний двигун розрахований для роботи з напругою на фазі обмотки 220 В. Для ввімкнення двигуна в мережу з лінійною напругою 380 В його обмотки з'єднують зіркою, а в мережу з лінійною напругою 220 В – трикутником. Відповідно вказують значення лінійного номінального струму обмотки статора для з'єднання зіркою і трикутником. Слід пам'ятати, що тривала робота двигуна у разі підвищеної або зниженої напруги неприпустима, особливо за номінального навантаження на валу. В обох випадках струм обмоток перевищує номінальний, двигун перегрівається і може вийти з ладу. Підвищення напруги спричинює пропорційне збільшення магнітного потоку $(U_{1\Phi} \approx E_1 = 4,44W_1f_1\Phi k_{01})$, що, у свою чергу, призводить до суттєвого зростання струму намагнічування. Відповідно зростає струм I_1 обмотки статора. У разі зниження напруги потік Φ зменшується. З

формули $M = c_M \Phi I_2 \cos \psi_2$ видно, що при зменшенні Φ обертовий момент M буде врівноважувати гальмівний момент навантаження за рахунок зростання струму ротора I_2 ($\cos \psi_2$ змінюється незначно). Відповідно зростає струм I_1 статора. Зниження напруги веде до суттєвого зменшення усіх моментів (включно пусковий) двигуна. Наприклад, у разі зниження напруги на 10% усі моменти зменшаться до значення $0,9^2 M = 0,81M$. Може статися, що обертовий момент навіть за критичного ковзання не буде достатнім для врівноваження опору номінального навантаження, тоді двигун перейде на нестійку частину механічної характеристики і зупиниться. Робота двигуна припустима за коливання напруги мережі в межах $\pm 5\%$.

1.2.2. Основні розрахункові співвідношення

Швидкість обертання магнітного поля

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (1.37)$$

де f_1 – частота струму мережі живлення; p – число пар полюсів обмотки статора.

Кутова швидкість обертання магнітного поля

$$\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi f_1}{p}. \quad (1.38)$$

Швидкість обертання ротора

$$n_2 = n_1 (1 - s) = \frac{60 f_1}{p} (1 - s), \quad (1.39)$$

де s – ковзання.

Кутова швидкість обертання ротора

$$\Omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60}. \quad (1.40)$$

Ковзання s – це різниця між швидкостями обертання магнітного поля n_1 і ротора n_2 , віднесена до швидкості обертання магнітного поля,

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}; \quad s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%. \quad (1.41)$$

Критичне ковзання – це ковзання, за якого асинхронна машина розвиває максимальний обертовий момент,

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{НОМ}} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} \approx \frac{R'_2}{X_K}, \quad (1.42)$$

де $\lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}}$ – коефіцієнт, який визначає перевантажувальну здатність

двигуна; $s_{\text{НОМ}}$ – ковзання за номінального навантаження;

R_1, X_1 – активний та реактивний опори фази обмотки статора;

R'_2, X'_2 – зведені активний та реактивний опори фази обмотки ротора;

$$X_K = X_1 + X'_2.$$

Частота Е.Р.С. і струму, індукованих в обмотці ротора,

$$f_2 = sf_1 = s \frac{pn_1}{60}. \quad (1.43)$$

Діюче значення Е.Р.С., індукованої у фазі обмотки статора,

$$E_1 = 4,44W_1f_1\Phi_m k_{01}, \quad (1.44)$$

де W_1 – число витків однієї фази статора; Φ_m – амплітудне значення обертового магнітного потоку; k_{01} – коефіцієнт обмотки статора.

Діюче значення Е.Р.С., індукованої у фазі обмотки нерухомого ротора,

$$E_2 = 4,44W_2f_2\Phi_mk_{02}, \quad (1.45)$$

де $f_2 = f_1$ – частота Е.Р.С., індукованої у провідниках ротора; W_2 – число витків однієї фази ротора; k_{02} – коефіцієнт обмотки ротора.

Діюче значення Е.Р.С., індукованої у фазі обмотки рухомого ротора,

$$E_{2s} = sE_2, \quad (1.46)$$

де E_2 – Е.Р.С. у фазі обмотки нерухомого ротора.

Коефіцієнт трансформації Е.Р.С. асинхронного двигуна

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{01}W_1}{k_{02}W_2}. \quad (1.47)$$

Потужності двигуна

Активна потужність, що споживається з мережі,

$$P_1 = 3U_{1\Phi}I_{1\Phi} \cos \varphi = \sqrt{3}U_{1Л}I_{1Л} \cos \varphi = \frac{P_2}{\eta}, \quad (1.48)$$

де $U_{1\Phi}$, $I_{1\Phi}$ – фазні напруга та струм обмотки статора;

$U_{1Л}$, $I_{1Л}$ – лінійні напруга та струм обмотки статора;

P_2 – корисна потужність на валу;

η – ККД,

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності.

Реактивна потужність, що споживається з мережі,

$$Q = 3U_{1\Phi}I_{1\Phi} \sin \varphi = \sqrt{3}U_{1Л}I_{1Л} \sin \varphi. \quad (1.49)$$

Електромагнітна потужність

$$P_{eM} = P_1 - (P_{1e} + P_{1M}) = \frac{P_{2e}}{s} = \frac{3R_2I_2^2}{s} = M\Omega_1, \quad (1.50)$$

де $P_{1e} = 3R_1 I_{1\Phi}^2$ – електричні втрати в обмотці статора;

P_{1M} – магнітні втрати в осерді статора;

$P_{2e} = 3R_2 I_{2\Phi}^2$ – електричні втрати в обмотці ротора;

M – електромагнітний момент.

Корисна потужність на валу

$$P_2 = P_1 - \sum P_{\text{ВТР}} = P_{\text{ем}} (1-s) = M\Omega_2 = \frac{Mn_2}{9,55} = P_1\eta, \quad (1.51)$$

де $\sum P_{\text{ВТР}}$ – сума втрат асинхронного двигуна;

$$\sum P_{\text{ВТР}} = P_{1e} + P_{1M} + P_{2e} + P_{2M} + P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{Д}},$$

P_{1e}, P_{1M} – електричні та магнітні втрати у статорі;

P_{2e}, P_{2M} – електричні та магнітні втрати у роторі;

$P_{\text{МЕХ}}, P_{\text{Д}}$ – механічні і додаткові втрати у роторі;

M – обертовий момент на валу.

Магнітними втратами у роторі нехтують, оскільки частота струму у роторі мала.

Електромагнітний (обертовий) момент

При розрахунках вважають, що електромагнітний момент дорівнює моменту, який розвиває двигун на валу $M_{\text{ем}} = M$.

$$M = \frac{P_{\text{ем}}}{\Omega_1} = \frac{P_{2e}}{\Omega_1 s} = \frac{3R_2 I_2^2}{\Omega_1 s} = \frac{9,55 P_2}{n_2} = \frac{3E_2 I_2 \cos \varphi_2}{\Omega_1} = C_1 U_1^2, \quad (1.52)$$

де C_1 – стала, яка залежить від конструктивних даних двигуна.

Максимальний обертовий момент

$$M_{max} = \frac{3U_{1\Phi}^2}{2\Omega_1(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_K^2})} \approx \frac{3U_{1\Phi}^2}{2\Omega_1 X_K}, \quad (1.53)$$

де $X_K = X_1 + X_2'$;

R_1, X_1 – активний та реактивний опори фази обмотки статора;

X_2' – зведений реактивний опір фази обмотки ротора.

Струм у фазі обмотки ротора:

нерухомого
$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}},$$

рухомого
$$I_{2s} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}. \quad (1.54)$$

де R_2, X_2, Z_2 – відповідно активний, індуктивний та повний електричні опори фази обмотки нерухомого ротора.

Наближена формула активного опору фази ротора

$$R_2 = \frac{M_{\text{НОМ}}(n_1 - n_2)}{9,55m_2 I_{2\text{НОМ}}^2} = \frac{M_{\text{НОМ}}\Omega_1 s_{\text{НОМ}}}{3I_{2\text{НОМ}}^2} = \frac{E_2 s_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}I_{2\text{НОМ}}}, \quad (1.55)$$

де $M_{\text{НОМ}}$ – номінальний обертовий момент;

m_2 – число фаз ротора;

$I_{2\text{НОМ}}$ – номінальний струм ротора.

Індуктивний опір фази обмотки рухомого ротора

$$X_{2s} = sX_2, \quad (1.56)$$

де X_2 – індуктивний опір нерухомого ротора.

Опір регулювального реостата двигуна з фазним ротором

$$R_P = R_2 \left(\frac{s}{s_{\text{НОМ}}} - 1 \right). \quad (1.57)$$

Кратність пускового струму

$$K_I = \frac{I_{\text{ПУС}}}{I_{\text{НОМ}}}, \quad (1.58)$$

де $I_{\text{ПУС}}$ - пусковий струм двигуна.

Кратність пускового моменту

$$K_M = \frac{M_{\text{ПУС}}}{M_{\text{НОМ}}}, \quad (1.59)$$

де $M_{\text{ПУС}}$ - пусковий момент двигуна.

Кратність максимального моменту (перевантажувальна здатність)

$$\lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}}, \quad (1.60)$$

де M_{max} - максимальний обертовий момент двигуна.

ККД асинхронного двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P_{\text{ВТР}}}{P_1} = 1 - \frac{\sum P_{\text{ВТР}}}{P_1}. \quad (1.61)$$

Найпростіший вираз механічної характеристики $M = f(s)$ (формула Клосса):

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s}{s_{\text{КР}}} + \frac{s_{\text{КР}}}{s}}. \quad (1.62)$$

Механічну характеристику $n_2 = f(M)$ отримують з характеристики $M = f(s)$, враховуючи, що $n_2 = n_1(1 - s)$.

1.2.3 Типові розв'язані задачі

Задача 1.33. Асинхронний трифазний двигун з короткозамкненим ротором марки А02-82-6 має наступні паспортні дані: напруга $U_{\text{НОМ}} = 220/380$ В, номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 40$ кВт, швидкість обертання ротора $n_{2\text{НОМ}} = 980$ об/хв, $\eta_{\text{НОМ}} = 91,5\%$, коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,91$, кратність пускового струму $K_I = 5$, кратність пускового моменту $K_M = 1,1$, кратність максимального моменту $\lambda = 1,8$.

Визначити:

кількість пар полюсів;

номінальне ковзання;

номінальний, максимальний і пусковий обертові моменти;

номінальний і пусковий струми двигуна у разі з'єднання обмотки статора в «трикутник» і «зірку».

Чи можливий пуск навантаженого двигуна, якщо підведена напруга на 10% нижче номінальної і пуск здійснюється перемиканням обмоток статора із «зірки» на «трикутник» від мережі з напругою $U = 220$ В?

Розв'язання. Для визначення числа пар полюсів можна скористатися маркуванням двигуна, а також частотою обертання магнітного поля або ротора. Якщо відоме маркування, то останнє число в марці двигуна – 6 означає кількість полюсів. Даний двигун має шість полюсів, отже три пари. У випадку, коли марка двигуна невідома, але задана швидкість обертання магнітного поля, визначаємо число пар полюсів скориставшись формулою (1.37). За цією ж формулою визначаємо число пар полюсів, якщо відома швидкість обертання ротора. У такому випадку отриманий

результат округлюємо до найближчого цілого числа. Наприклад, для заданих умов

$$p = \frac{60 f_1}{n_2} = \frac{3000}{980} = 3,06;$$

відкинувши соті долі, отримуємо число пар полюсів двигуна – 3.

Швидкість обертання магнітного поля (1.37)

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{3000}{3} = 1000 \text{ об/хв.}$$

Номинальне значення ковзання (1.41)

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1000 - 980}{1000} = 0,02.$$

Потужність, що споживається двигуном, (1.61)

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{40000}{0,915} = 43715 \text{ Вт.}$$

Номинальний обертовий момент двигуна (1.52)

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_2}{n_2} = 9,55 \frac{40000}{980} = 389,8 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Максимальний момент (1.60)

$$M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_{\text{НОМ}} = 1,8 \cdot 389,8 = 701,6 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Пусковий момент (1.59)

$$M_{\text{ПУС}} = K_M \cdot M_{\text{НОМ}} = 1,1 \cdot 389,8 = 428,7 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Для визначення фазних, лінійних і пускових струмів (фазними називають струми в обмотках статора, лінійними – струми у проводах) потрібно врахувати наступне: якщо двигун призначений для роботи від мережі змінного струму з напругою 220/380 В, це означає, що кожна фаза обмотки статора розрахована на напругу 220 В. Обмотку статора необхідно

з'єднати за схемою «трикутник», якщо в мережі лінійна напруга $U = 220 \text{ В}$, і за схемою «зірка», якщо в мережі лінійна напруга $U = 380 \text{ В}$. Визначаємо фазний, лінійний і пусковий струми у разі лінійної напруги $U = 220 \text{ В}$ і з'єднання обмоток статора за схемою «трикутник»:

$$I_{\Phi} = \frac{P_1}{3U_{\Phi} \cos \varphi} = \frac{43715,8}{3 \cdot 220 \cdot 0,91} = 72,8 \text{ А};$$

$$I_{\text{Л}} = \sqrt{3}I_{\Phi} = 1,73 \cdot 72,8 = 125,9 \text{ А};$$

$$I_{\text{ПВС}} = K_I I_{\text{Л}} = 5 \cdot 125,9 = 629,5 \text{ А}.$$

Обчислимо значення фазних, лінійних і пускових струмів, якщо обмотки статора з'єднані за схемою «зірка» і підключені до мережі з лінійною напругою $U = 380 \text{ В}$.

Величину лінійного струму знайдемо з формули для активної потужності

$$P_1 = \sqrt{3}U_{\text{Л}}I_{\text{Л}} \cos \varphi, \text{ звідки}$$

$$I_{\text{Л}} = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_{\text{Л}} \cos \varphi} = \frac{43715,8}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,91} = 73 \text{ А}.$$

У разі з'єднання обмоток зіркою $I_{\text{Ф}} = I_{\text{Л}} = 73 \text{ А}$.

Знаходимо пусковий струм за формулою (1.58):

$$I_{\text{ПВС}} = K_I I_{\text{Л}} = 5 \cdot 73 = 365 \text{ А}.$$

Із співставлення фазних, лінійних і пускових струмів за різних з'єднань обмоток статора можна помітити, що фазні струми виявилися практично однаковими, а лінійні і пускові – різними.

Для визначення можливості пуску двигуна, що знаходиться під номінальним навантаженням і зниженою напругою, необхідно визначити пусковий обертовий момент у разі зниження напруги.

Обертовий момент двигуна пропорційний квадрату підведеної напруги. Внаслідок зниження напруги на 10% обертовий момент

$$M' = (0,9U_{\text{НОМ}})^2 = 0,81M_{\text{НОМ}} = 0,81 \cdot 389,8 = 315,74 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Відповідний пусковий момент

$$M'_{\text{ПУС}} = K_M M' = 1,1 \cdot 315,74 = 347,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

менший за гальмівний момент на валу на $389,8 - 347,3 = 42,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$, отже пуск неможливий.

Для зменшення пускових струмів часто пуск асинхронних двигунів здійснюють за зниженої напруги. Двигуни, що мають працювати зі з'єднаними у «трикутник» обмотками статора, пускають без навантаження шляхом перемикання обмоток із «зірки» на «трикутник». Обчислюємо пусковий момент двигуна у такому випадку.

У момент пуску обмотки статора знаходяться під напругою

$$U_{\Phi} = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{1,73} = 127 \text{ В},$$

що складає $57,8\%U_{\text{НОМ}}$. Пусковий момент при перемиканні обмоток

$$M_{\text{ПУС}} = (0,578U_{\text{НОМ}})^2 = 129 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

тобто в три рази менше номінального значення.

Задача 1.34. Номінальна потужність трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором $P_{\text{НОМ}} = 10 \text{ кВт}$, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 380 \text{ В}$, номінальна швидкість обертання ротора $n_{\text{НОМ}} = 1420 \text{ об/хв}$, номінальний ККД $\eta_{\text{НОМ}} = 0,84$, номінальний

коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,85$. Кратність пускового струму $I_{\text{ПУС}}/I_{\text{НОМ}} = 6,5$, кратність максимального моменту $\lambda = 1,8$.

Визначити:

номінальну потужність, що споживається двигуном;

номінальний та максимальний обертовий момент;

пусковий струм;

номінальне та критичне ковзання.

Побудувати механічні характеристики $M = f(s)$ і $n_2 = f(M)$.

Розв'язання. Номінальна потужність, що споживається двигуном,

$$P_{\text{ІНОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{10}{0,84} = 11,9 \text{ кВт.}$$

Номінальний і максимальний обертові моменти (1.52), (1.60):

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \frac{10000}{1420} = 67,2 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_{\text{НОМ}} = 1,8 \cdot 67,3 = 121 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Номінальний і пусковий струми (1.48), (1.58):

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{ІНОМ}}}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}}} = \frac{11,9 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,85} = 21,3 \text{ А};$$

$$I_{\text{ПУС}} = 6,5 I_{\text{НОМ}} = 6,5 \cdot 21,3 = 138 \text{ А.}$$

Номінальне та критичне ковзання (1.41), (1.42):

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{n_1 - n_{\text{НОМ}}}{n_1} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,053,$$

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{НОМ}} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,053(1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1}) = 0,175.$$

Механічну характеристику $M = f(s)$ будемо за рівнянням

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s_{KP}}{s} + \frac{s}{s_{KP}}} = \frac{2 \cdot 121}{\frac{0,175}{s} + \frac{s}{0,175}}$$

Швидкість обертання ротора n_2 визначаємо за формулою (1.39):

$$n_2 = n_1(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s) = \frac{3000}{2}(1-s) = 1500(1-s) \text{ об/хв.}$$

Результати обчислень M , n_2 , для значень s від 0 до 1 зведено у таблицю 1.5; графіки $M = f(s)$ і $n_2 = f(M)$ показано на рис. 1.12 і рис. 1.13 відповідно.

Таблиця 1.5

s	M , Н·м	n_2 , об/хв	s	M , Н·м	n_2 , об/хв
0,053	67,3	1420	0,5	75,5	750
0,1	104,3	1350	0,6	65,2	600
0,175	121	1238	0,7	57	450
0,2	120,5	1200	0,8	50,5	300
0,3	105,3	1050	0,9	45,5	150
0,4	88,8	900	1	41	0

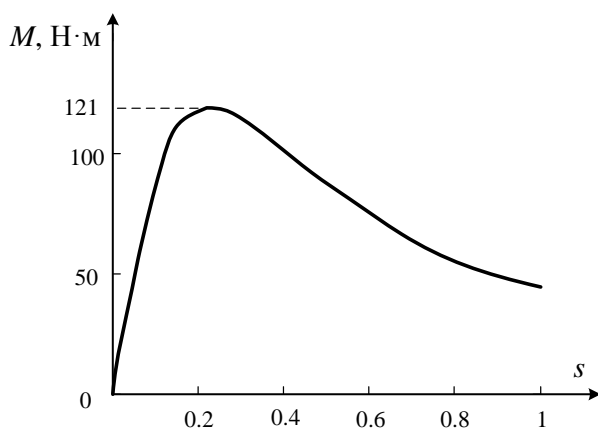


Рис. 1.12

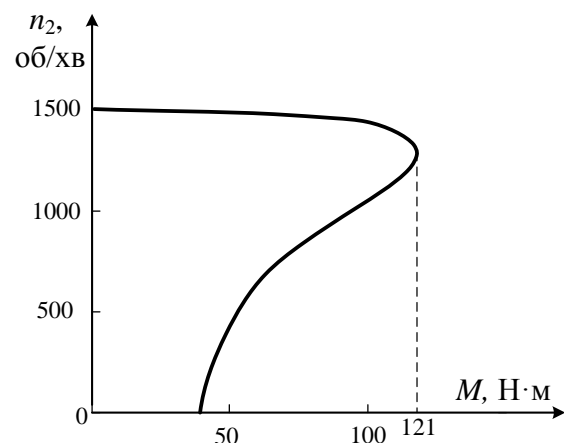


Рис. 1.13

Задача 1.35. Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором і обмотками, з'єднаними у трикутник, живиться від мережі з напругою $U = 220$ В і частотою $f = 50$ Гц. Число пар полюсів $p = 3$. Кількість витків на фазу обмоток $W_1 = 187$, $W_2 = 36$. Опори фаз обмоток $R_1 = 0,46$ Ом, $R_2 = 0,02$ Ом, $X_1 = 2,24$ Ом, $X_2 = 0,08$ Ом.

Визначити:

пускові струми статора і ротора;

пусковий обертовий момент;

коефіцієнт потужності у разі пуску двигуна із замкненим накоротко ротором;

струми статора, ротора та обертовий момент у режимі з ковзанням $s = 0,03$;

критичне ковзання та максимальний обертовий момент;

величину опору пускового реостата для отримання максимального пускового моменту, а також пускові струми статора і ротора у такому випадку.

Розв'язання. Визначаємо коефіцієнт трансформації двигуна:

$$n = \frac{W_1}{W_2} = \frac{187}{36} = 5,2.$$

Обчислюємо зведені значення опорів роторної обмотки:

$$R'_2 = R_2 \cdot n^2 = 0,02 \cdot 5,2^2 = 0,54 \text{ Ом};$$

$$X'_2 = X_2 \cdot n^2 = 0,08 \cdot 5,2^2 = 2,16 \text{ Ом}.$$

Знаходимо опори короткого замикання:

$$R_K = R_1 + R'_2 = 0,46 + 0,54 = 1 \text{ Ом},$$

$$X_K = X_1 + X'_2 = 2,24 + 2,16 = 4,4 \text{ Ом},$$

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = 4,51 \text{ Ом.}$$

Розраховуємо струми статора, ротора, пусковий момент і коефіцієнт потужності у разі пуску двигуна із замкненим накоротко ротором:

$$I_{\text{Пус}} = \frac{U_{\Phi}}{Z_K} = \frac{220}{4,51} = 48,8 \text{ А;}$$

$$I_{2\text{Пус}} = n \cdot I_{\text{Пус}} = 5,2 \cdot 48,8 = 254 \text{ А.}$$

$$P_{2e} = 3R_2 I_{2\text{Пус}}^2 = 3 \cdot 0,02 \cdot 254^2 = 3871 \text{ Вт;}$$

$$\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{3000}{3} = 104,6 \text{ рад/с.}$$

З формули (1.52) $M_{\text{Пус}} = \frac{P_{2e}}{\Omega_1} = \frac{3871}{104,6} = 37 \text{ Н}\cdot\text{м;}$

$$\cos \varphi_{\text{Пус}} = \frac{R_K}{Z_K} = \frac{1}{4,51} = 0,22.$$

Обчислюємо струми і обертовий момент двигуна, якщо ковзання $s = 0,03$.

Спочатку знаходимо повний опір фази:

$$Z = \sqrt{\left(R_1^2 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2} = \sqrt{\left(0,46 + \frac{0,54}{0,03}\right)^2 + 4,4^2} = 18,9 \text{ Ом,}$$

тоді

$$I_1 = \frac{U_{\Phi}}{Z} = \frac{220}{18,9} = 11,6 \text{ А;}$$

$$I_2 = nI_1 = 5,2 \cdot 11,6 = 60,3 \text{ А;}$$

$$M = \frac{P_{2e}}{\Omega_1 s} = \frac{3871}{104,6 \cdot 0,03} = 69,5 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Визначаємо критичне ковзання і відповідний максимальний обертовий момент (1.42), (1.53):

$$s_{\text{КР}} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} = \frac{0,54}{\sqrt{0,46^2 + 4,4^2}} = 0,122;$$

$$M_{\text{max}} = \frac{3U_{\Phi}^2}{2\Omega_1 \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_K^2} \right)} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,6 \cdot (0,46 + 4,4)} = 142 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Розраховуємо опір фази пускового реостата, який забезпечує $M_{\text{ПУС}} = M_{\text{max}}$. Пусковий обертовий момент досягає максимального значення за умови

$$s_{\text{КР}} = \frac{R'_2 + R'_{\text{ПУС}}}{X_{\text{КР}}} = 1,$$

де $R'_{\text{ПУС}}$ - зведене значення опору пускового реостату;

$$R'_{\text{ПУС}} = X_{\text{КР}} - R'_2 = 4,4 - 0,54 = 3,86 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{ПУС}} = \frac{R'_{\text{ПУС}}}{n^2} = \frac{3,86}{5,2^2} = 0,143 \text{ Ом}.$$

Пускові струми у разі пуску двигуна з реостатом:

$$Z_{\text{ПУС}} = \sqrt{(R_K + R'_{\text{ПУС}})^2 + X_K^2} = \sqrt{(1 + 3,86)^2 + 4,4^2} = 6,55 \text{ Ом},$$

$$I_{\text{ПУС}} = \frac{U_{\Phi}}{Z_{\text{ПУС}}} = \frac{220}{6,55} = 33,6 \text{ А},$$

$$I_{2\text{ПУС}} = n \cdot I_{\text{ПУС}} = 5,2 \cdot 33,6 = 174,7 \text{ А}.$$

Задача 1.36. Асинхронний трифазний двигун з короткозамкненим ротором марки А02-92-6 має такі технічні характеристики: номінальна потужність на валу $P_{\text{НОМ}} = 75$ кВт, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 220/380$ В; номінальне ковзання $s_{\text{НОМ}} = 0,015$; ККД $\eta = 0,925$; коефіцієнт

потужності за номінального навантаження $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,92$, за неробочого ходу $\cos \varphi_0 = 0,2$; кратність пускового струму $K_I = 6$; кратність пускового моменту $K_M = 1,1$; кратність максимального моменту $\lambda = 1,8$.

Визначити:

номінальний, максимальний і пусковий обертові моменти;

фазний, лінійний і пусковий струми за номінального навантаження;

струм неробочого ходу;

втрати енергії у роторі;

повний, активний та індуктивний опори фази при номінальному навантаженні;

частоту обертання ротора при максимальному навантаженні;

частоту струму ротора при номінальному і максимальному навантаженні.

Розв'язання. Визначаємо швидкість обертання магнітного поля. Число полюсів двигуна вказано у марці—6; відповідне число пар $p = 3$. Для єдиної серії А2 частота струму живлення $f_1 = 50$ Гц, тоді

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.}$$

Число обертів ротора за номінального навантаження і відомого ковзання

$$n_{\text{НОМ}} = n_1 (1 - s_{\text{НОМ}}) = 1000 (1 - 0,015) = 985 \text{ об/хв.}$$

Обертові моменти (1.52), (1.59), (1.60):

$$\text{номінальний } M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \cdot \frac{75000}{985} = 727 \text{ Н}\cdot\text{м,}$$

максимальний $M_{max} = \lambda M_{НОМ} = 1,8 \cdot 727 = 1308,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$;

пусковий $M_{ПВС} = K_M M_{НОМ} = 1,1 \cdot 727 = 799,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Потужність, яка споживається двигуном з мережі,

$$P_1 = \frac{P_{НОМ}}{\eta} = \frac{75000}{0,925} = 81081 \text{ Вт.}$$

З формули потужності $P_1 = 3U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi$ знаходимо номінальний фазний струм в обмотках статора у разі з'єднання трикутником:

$$I_{\Phi НОМ} = \frac{P_1}{3U_{\Phi НОМ} \cos \varphi_{НОМ}} = \frac{81081}{3 \cdot 220 \cdot 0,92} = 133,5 \text{ А.}$$

Лінійний номінальний струм

$$I_{ЛНОМ} = \sqrt{3} I_{\Phi НОМ} = 1,73 \cdot 133,5 = 231 \text{ А.}$$

Пусковий струм

$$I_{ПВС} = K_I I_{ЛНОМ} = 6 \cdot 231 = 1386 \text{ А.}$$

Загальні втрати двигуна – це різниця між споживаною та номінальною потужністю $\sum P = P_1 - P_{НОМ} = 81081 - 75000 = 6081 \text{ Вт}$.

Струм неробочого ходу знаходимо з формули потужності неробочого ходу

$$P_0 = \sqrt{3} U_{НОМ} I_0 \cos \varphi_0,$$

звідки

$$I_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_{НОМ} \cos \varphi_0} = \frac{6081}{1,73 \cdot 220 \cdot 0,2} = 79,9 \text{ А.}$$

Електромагнітну потужність, тобто потужність, яка передається електромагнітним шляхом із статора в ротор, визначаємо за формулою (1.50):

$$P_{\text{ем}} = M_{\text{НОМ}} \Omega_1 = M_{\text{НОМ}} \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{M_{\text{НОМ}} n_1}{9,55} = \frac{727 \cdot 1000}{9,55} = 76125 \text{ Вт.}$$

Втрати енергії в статорі $P_C = P_1 - P_{\text{ем}} = 81081 - 76125 = 4956 \text{ Вт.}$

Втрати енергії в роторі $P_P = \sum P - P_C = 6081 - 4956 = 1125 \text{ Вт.}$

Опори фази за номінального навантаження:

повний

$$Z_{\Phi} = \frac{U_{\Phi \text{НОМ}}}{I_{\Phi \text{НОМ}}} = \frac{220}{133,5} = 1,65 \text{ Ом;}$$

активний

$$R_{\Phi} = Z_{\Phi} \cos \varphi = 1,65 \cdot 0,92 = 1,5 \text{ Ом;}$$

індуктивний

$$X_{\Phi} = \sqrt{Z_{\Phi}^2 - R_{\Phi}^2} = \sqrt{1,65^2 - 1,5^2} = 0,68 \text{ Ом.}$$

Критичне ковзання обчислюємо за формулою (1.42):

$$s_{\text{КР}} = s_{\text{НОМ}} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,015 (1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1}) = 0,049.$$

Частота обертання ротора у разі максимального навантаження

$$n_{2\text{КР}} = n_1 (1 - s_{\text{КР}}) = 1000 (1 - 0,049) = 951 \text{ об/хв.}$$

Частота струму ротора за номінального навантаження

$$f_{2\text{НОМ}} = f_1 s_{\text{НОМ}} = 50 \cdot 0,015 = 0,75 \text{ Гц.}$$

Частота струму ротора за максимального навантаження

$$f_{2\text{max}} = f_1 s_{\text{КР}} = 50 \cdot 0,049 = 2,45 \text{ Гц.}$$

Задача 1.37. Трифазний шестиполосний асинхронний двигун з фазним ротором має такі паспортні дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 5$ кВт, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 220/380$ В, частота струму $f = 50$ Гц, номінальна частота обертання $n_{2\text{НОМ}} = 940$ об/хв, номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,68$, номінальний ККД $\eta_{\text{НОМ}} = 74,5\%$.

Знайти:

потужність P_1 , яку споживає двигун у номінальному режимі;

струми двигуна при з'єднанні обмоток статора трикутником та зіркою;

обертовий момент $M_{\text{НОМ}}$ і ковзання $S_{\text{НОМ}}$.

Розрахувати опір регулювального реостата, ввімкненого у коло ротора для зниження частоти обертання валу двигуна до $n_2 = 750$ об/хв, якщо обмотки з'єднані зіркою, а обертовий момент на валу має номінальне значення.

Розв'язання. Активну потужність, яку споживає двигун у номінальному режимі, знаходимо за формулою

$$P_1 = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{5000}{0,745} = 6711 \text{ Вт.}$$

Струми двигуна у разі з'єднання обмоток статора (1.48):

зіркою

$$I_Y = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1 \cos \varphi} = \frac{6711}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,68} = 15 \text{ А;}$$

трикутником

$$I_{\Delta} = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1 \cos \varphi} = \frac{6711}{1,73 \cdot 220 \cdot 0,68} = 25,9 \text{ А.}$$

Обертний момент двигуна за номінального навантаження (1.52)

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \frac{5000}{940} = 50,8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Ковзання за номінального навантаження (1.41)

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{n_1 - n_{2\text{НОМ}}}{n_1} = \frac{1000 - 940}{1000} = 0,06,$$

де $n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000$ об/хв, (відповідна кутова швидкість

обертання $\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = 104,6$ рад/с).

Ковзання у разі $n_2 = 750$ об/хв

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1000 - 750}{1000} = 0,25.$$

Для визначення опору регульовального реостата скористаємося формулою (1.57). Спочатку з формули (1.55) знаходимо активний опір фази ротора R_2

$$R_2 = \frac{M_{\text{НОМ}} \Omega_1 s_{\text{НОМ}}}{3I_{2\text{НОМ}}^2} = \frac{50,8 \cdot 0,06 \cdot 104,6}{3 \cdot 152} = 0,7 \text{ Ом},$$

тоді опір регульовального реостата

$$R_p = R_2 \left[\frac{s}{s_{\text{НОМ}}} - 1 \right] = 0,7 \left[\frac{0,25}{0,06} - 1 \right] = 2,2 \text{ Ом}.$$

Задача 1.38. Паспортні дані трифазного асинхронного двигуна такі:

$P_{\text{НОМ}} = 20$ кВт, $n_{\text{НОМ}} = 1420$ об/хв, $U_{\text{НОМ}} = 380 / 220$ В, $I_{2\text{НОМ}} = 68$ А,

$\eta_{\text{НОМ}} = 87\%$, кратність максимального моменту $\lambda = 2,4$. Розрахувати

опір додаткового реостата, який необхідно підключити у коло ротора, щоб пусковий момент дорівнював 0,9 максимального значення; обчислити пусковий струм ротора у даному випадку.

Розв'язання. Знаходимо номінальний і максимальний обертові моменти двигуна (1.52), (1.60):

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \frac{20 \cdot 1000}{1420} = 135 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_{\text{НОМ}} = 2,4 \cdot 135 = 324 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Визначаємо номінальне та критичне ковзання (1.41), (1.42):

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{n_1 - n_{\text{НОМ}}}{n_1} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,053;$$

$$s_{\text{КР}} = s_{\text{НОМ}} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,053 (2,4 + \sqrt{2,4^2 - 1}) = 0,242.$$

Розрахуємо обертовий момент і струм ротора у разі пуску двигуна без пускового реостата (1.62):

$$M_{\text{ПУС}} = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s_{\text{КР}}}{1} + \frac{1}{s_{\text{КР}}}} = \frac{2 \cdot 324}{0,242 + 4,132} = 148 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Із співвідношення $P_{\text{ЕМ}} = M \Omega_1 = \frac{3R_2 I_2^2}{s}$ можна отримати вираз струму

$I_{2\text{ПУС}}$, враховуючи, що в момент пуску $s = 1$:

$$I_{2\text{ПУС}} = \sqrt{\frac{M_{\text{ПУС}} \cdot \Omega_1}{3R_2}},$$

де $\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi \cdot 1500}{60} = 157 \text{ рад/с}.$

Активний опір фази ротора знаходимо за наближеною формулою (1.55):

$$R_2 = \frac{M_{\text{НОМ}} \Omega_1 s_{\text{НОМ}}}{3I_{2\text{НОМ}}^2} = \frac{135 \cdot 157 \cdot 0,0532}{3 \cdot 68^2} = 0,08 \text{ Ом},$$

тоді $I_{2\text{ПУС}} = \sqrt{\frac{148 \cdot 157}{3 \cdot 0,08}} = 306 \text{ А}.$

Визначаємо критичне ковзання $s_{\text{КРШ}}$, яке відповідає пуску двигуна із заданим пусковим моментом $0,9M_{\text{max}}$, скориставшись рівнянням механічної характеристики (2.26) :

$$0,9M_{\text{max}} = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s_{\text{КРШ}}}{1} + \frac{1}{s_{\text{КРШ}}}},$$

звідки

$$\begin{aligned} s_{\text{КРШ}} &= \frac{M_{\text{max}}}{0,9M_{\text{max}}} + \sqrt{\left(\frac{M_{\text{max}}}{0,9M_{\text{max}}}\right)^2 - 1} = \\ &= \frac{324}{0,9 \cdot 324} + \sqrt{\left(\frac{324}{0,9 \cdot 324}\right)^2 - 1} = 1,57. \end{aligned}$$

Опір пускового реостата розраховуємо з таких міркувань: критичне ковзання за відсутності пускового реостату (1.42)

$$s_{\text{КР}} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} \approx \frac{R'_2}{X_K^2},$$

за наявності пускового реостату

$$s_{\text{КРШ}} = \frac{R'_2 + R'_{\text{ПУС}}}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} \approx \frac{R'_2 + R'_{\text{ПУС}}}{X_K^2},$$

тоді $\frac{s_{\text{КР}}}{s_{\text{КРШ}}} = \frac{R'_2}{R'_2 + R'_{\text{ПУС}}} = \frac{R_2}{R_2 + R_{\text{ПУС}}},$

$$\text{звідки } R_{\text{ПУС}} = R_2 \left[\frac{s_{\text{КРШ}}}{s_{\text{КР}}} - 1 \right] = 0,08 \left[\frac{1,57}{0,242} - 1 \right] = 0,44 \text{ Ом.}$$

Пусковий струм ротора можна визначити, скориставшись формулою (1.50):

$$0,9M_{\text{max}} \cdot \Omega_1 = \frac{P_{2e}}{s} = \frac{3(R_2 + R_{\text{ПУС}})I_{2\text{ПУС}}^2}{1},$$

звідки

$$I_{2\text{ПУС}} = \sqrt{\frac{0,9M_{\text{max}} \cdot \Omega_1}{3(R_2 + R_{\text{ПУС}})}} = \sqrt{\frac{0,9 \cdot 324 \cdot 157}{3(0,08 + 0,44)}} = 171 \text{ А.}$$

Задача 1.39. Паспортні дані асинхронного двигуна з фазним ротором такі:

$$P_{\text{НОМ}} = 60 \text{ кВт}; \quad n_{\text{НОМ}} = 720 \text{ об/хв}; \quad \lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}} = 2,2; \quad E_2 = 175 \text{ В};$$

$$I_{2\text{НОМ}} = 216 \text{ А.}$$

Побудувати природні механічні характеристики $M = f(s)$, $n_2 = f(M)$ і графік залежності струму ротора від ковзання $I_2 = f(s)$. Побудувати штучні механічні характеристики $M = f(s)$, $n_2 = f(M)$ і графік $I_2 = f(s)$, якщо у коло ротора підключений додатковий реостат з опором $R_d = 0,08 \text{ Ом}$.

Розв'язання. Обчислюємо номінальний та максимальний обертові моменти двигуна (1.52), (1.60):

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \frac{60 \cdot 1000}{720} = 800 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_{\text{НОМ}} = 2,2 \cdot 800 = 1760 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Визначаємо номінальне та критичне ковзання (1.41), (1.42):

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{n_1 - n_{\text{НОМ}}}{n_1} = \frac{750 - 720}{750} = 0,04;$$

$$s_{\text{КР}} = s_{\text{НОМ}} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,04 (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,166.$$

Для побудови природньої механічної характеристики $M(s)$ використовуємо рівняння

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s_{\text{КР}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{КР}}}};$$

для побудови природньої механічної характеристики $n_2(M)$ використовуємо формулу

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s) = 750 \cdot (1 - s).$$

Задаючись рядом значень s від 0 до 1, розраховуємо відповідний обертовий момент M , а потім і частоту обертання ротора n_2 .

Результати обчислень зведені у таблицю 1.6

Таблиця 1.6

s	0	0,02	0,04	0,1	0,166	0,2	0,4	0,6	0,8	1
M , Н·м	0	416	800	1550	1760	1715	1250	906	700	570
n_2 , об/хв	750	735	720	675	625	600	450	300	150	0
I_2 , А	0	108	216	466	640	692	840	875	886	895

Для побудови графіка $I_2(s)$ спочатку знаходимо опір фази обмотки ротора, скориставшись формулою (1.55):

$$R_2 = \frac{E_2 \cdot s_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} I_{2\text{НОМ}}} = \frac{175 \cdot 0,04}{1,73 \cdot 216} = 0,0187 \text{ Ом.}$$

Обчислюємо кутову швидкість обертання магнітного поля (1.38):

$$\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 750}{60} = 78,5 \text{ рад/с.}$$

Залежність струму ротора I_2 від ковзання s знаходимо, скориставшись формулою:

$$I_2 = \sqrt{\frac{M \cdot \Omega_1 \cdot s}{3R_2}} = \sqrt{\frac{M \cdot 78,5 \cdot s}{3 \cdot 0,0187}} = 37,5 \sqrt{M \cdot s}.$$

Підставляючи в останнє рівняння значення s і M , взяті з таблиці 1.6, визначаємо струм ротора.

Розрахунки для побудови штучних характеристик виконуємо за тими ж формулами, враховуючи, що опір кола ротора дорівнює $(R_2 + R_{\text{д}})$ і

$$\frac{s}{s_{\text{ш}}} = \frac{R_2}{R_2 + R_{\text{д}}};$$

критичне ковзання

$$s_{\text{крш}} = s_{\text{кр}} \cdot \frac{R_2 + R_{\text{д}}}{R_2} = 0,166 \cdot \frac{0,0187 + 0,08}{0,0187} = 0,88;$$

рівняння штучної механічної характеристики

$$M_{\text{ш}} = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s_{\text{крш}}}{s_{\text{ш}}} + \frac{s_{\text{ш}}}{s_{\text{крш}}}};$$

рівняння для визначення $n_{2\text{ш}}$:

$$n_{2\text{III}} = n_1 \cdot (1 - s_{\text{III}});$$

рівняння для визначення струму ротора

$$I_{2\text{III}} = \sqrt{\frac{M_{\text{III}} \cdot \Omega_1 \cdot s_{\text{III}}}{3(R_2 + R_{\text{д}})}} = \sqrt{\frac{M_{\text{III}} \cdot 78,5 \cdot s_{\text{III}}}{3 \cdot (0,0187 + 0,08)}} = 16,3 \sqrt{M_{\text{III}} \cdot s_{\text{III}}}.$$

Результати обчислень зведені у таблицю 1.7

Таблиця 1.7

s_{III}	0	0,02	0,04	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$M_{\text{III}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	0	80	160	400	760	1350	1630	1750	1740
$n_2, \text{об/хв}$	750	735	720	675	600	450	300	90	0
$I_{2\text{III}}, \text{А}$	0	20,5	41	103	200	385	510	645	678

За результатами розрахунків побудовані графіки, зображені на рис.1.15 – 1.17.

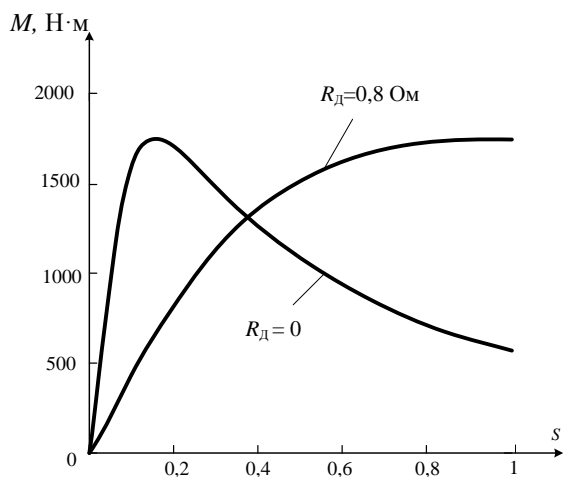


Рис. 1.15

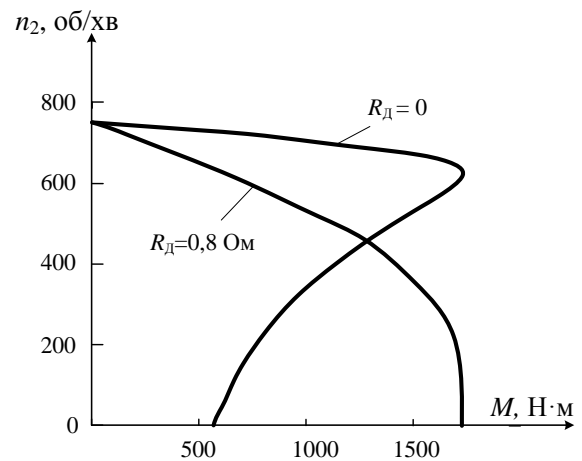


Рис. 1.16

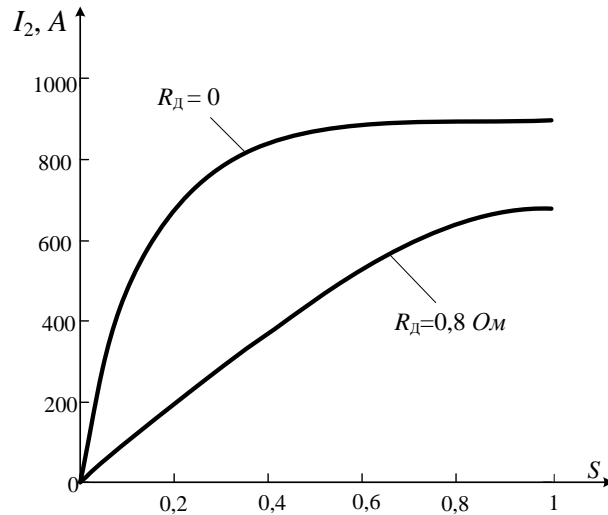


Рис. 1.17

Задача 1.40. Паспортні дані трифазного асинхронного двигуна такі:

$$P_{\text{НОМ}} = 22 \text{ кВт}, U_{\text{НОМ}} = 380 / 220 \text{ В}, n_{\text{НОМ}} = 723 \text{ об/хв}, \lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}} = 3,$$

$I_{2\text{НОМ}} = 70,5 \text{ А}$. Визначити опір регулювального реостата, який потрібно підключити у коло ротора, щоб двигун працював з обертовим моментом на валу $M = 200 \text{ Н} \cdot \text{м}$ і частотою обертання $n_2 = 650 \text{ об/хв}$.

Розв'язання. Обчислюємо номінальний і максимальний обертовий моменти двигуна (1.52), (1.60):

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \frac{22 \cdot 1000}{723} = 291 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_{\text{НОМ}} = 3 \cdot 291 = 873 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Розраховуємо номінальне, критичне, а також ковзання s_{III} , яке відповідає заданій частоті обертання $n_2 = 650 \text{ об/хв}$ (1.41), (1.42):

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{n_1 - n_{\text{НОМ}}}{n_1} = \frac{750 - 723}{750} = 0,036;$$

$$s_{\text{КР}} = s_{\text{НОМ}} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,036(3 + \sqrt{3^2 - 1}) = 0,21;$$

$$s_{\text{Ш}} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{750 - 650}{750} = 0,133.$$

Відомі значення $M_{\text{Ш}}$, M_{max} , $s_{\text{Ш}}$, $s_{\text{КР}}$ підставляємо у рівняння штучної механічної характеристики (1.62):

$$M_{\text{Ш}} = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s_{\text{КРШ}}}{s_{\text{Ш}}} + \frac{s_{\text{Ш}}}{s_{\text{КРШ}}}}, \quad 200 = \frac{2 \cdot 873M_{\text{max}}}{\frac{s_{\text{КРШ}}}{0,133} + \frac{0,133}{s_{\text{КРШ}}}},$$

звідки $s_{\text{КРШ}} = 1,15$.

Для визначення опору R_p регулювального реостата скористаємося формулою (1.57), обчисливши перед тим активний опір фази ротора за формулою (1.55):

$$R_2 = \frac{M_{\text{НОМ}} \cdot \Omega_1 \cdot s_{\text{НОМ}}}{3I_{2\text{НОМ}}^2} = \frac{291 \cdot 78,5 \cdot 0,036}{3 \cdot 70,5^2} = 0,06 \text{ Ом},$$

тоді

$$R_p = R_2 \left[\frac{s_{\text{КРШ}}}{s_{\text{КР}}} - 1 \right] = 0,06 \left[\frac{1,15}{0,21} - 1 \right] = 0,27 \text{ Ом}.$$

Задача 1.41. Паспортні дані трифазного асинхронного двигуна такі:

$$P_{\text{НОМ}} = 60 \text{ кВт}, \quad n_{\text{НОМ}} = 720 \text{ об/хв}, \quad \lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}} = 2,2, \quad E_2 = 175 \text{ В},$$

$I_{2\text{НОМ}} = 216$ А. Визначити опір додаткового реостата, який потрібно ввімкнути у коло ротора, щоб двигун працював у гальмівному режимі противключення зі швидкістю обертання $n_2 = 375$ об/хв і створював гальмівний момент $M_{\Gamma} = 700$ Н·м. Розрахувати та побудувати механічні характеристики $M = f(s)$ і $n_2 = f(M)$, які відповідають такому опору.

Розв'язання. Обчислимо номінальний і максимальний обертові моменти двигуна (1.52), (1.60):

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \frac{60 \cdot 1000}{723} = 800 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_{\text{НОМ}} = 2,2 \cdot 800 = 1760 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Розрахуємо номінальне та критичне ковзання (1.41), (1.42):

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{n_1 - n_{\text{НОМ}}}{n_1} = \frac{750 - 720}{750} = 0,04;$$

$$s_{\text{КР}} = s_{\text{НОМ}}(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,04(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,166.$$

Знаходимо ковзання $s_{\text{Ш}}$ у гальмівному режимі противключення:

$$s_{\text{Ш}} = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1} = \frac{750 + 375}{750} = 1,5.$$

Для визначення критичного ковзання $s_{\text{КРШ}}$ штучної механічної характеристики, яка відповідає шуканому $R_{\text{Д}}$, скористаємося рівнянням

$$M_{\text{Ш}} = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s_{\text{КРШ}}}{s_{\text{Ш}}} + \frac{s_{\text{Ш}}}{s_{\text{КРШ}}}},$$

яке вирішуємо відносно $s_{\text{КРШ}}$:

$$s_{\text{КРШ}} = s_{\text{Ш}} \left[\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{Ш}}} + \sqrt{\left(\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{Ш}}} \right)^2 - 1} \right].$$

В останнє рівняння підставляємо значення $M_{\text{Ш}} = M_{\Gamma} = 700 \text{ Н}\cdot\text{м}$, задане в умові задачі, і розраховане значення $s_{\text{Ш}}$:

$$s_{\text{КРШ}} = 1,5 \left[\frac{1760}{700} + \sqrt{\left(\frac{1760}{700} \right)^2 - 1} \right] = 7,25.$$

Знаходимо активний опір фази ротора за формулою (1.55):

$$R_2 = \frac{E_{2\text{К}} \cdot s_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} I_{2\text{НОМ}}} = \frac{175 \cdot 0,04}{1,73 \cdot 216} = 0,0187 \text{ Ом.}$$

Шуканий опір додаткового реостата (1.57):

$$R_{\text{д}} = R_2 \left[\frac{s_{\text{КРШ}}}{s_{\text{КР}}} - 1 \right] = 0,0187 \left[\frac{7,25}{0,166} - 1 \right] = 0,63 \text{ Ом.}$$

Розрахунок штучних механічних характеристик виконуємо за формулами:

$$M_{\text{Ш}} = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s_{\text{КРШ}}}{s_{\text{Ш}}} + \frac{s_{\text{Ш}}}{s_{\text{КРШ}}}} = \frac{2 \cdot 1760}{\frac{7,25}{s_{\text{Ш}}} + \frac{s_{\text{Ш}}}{7,25}}, \quad n_2 = n_1(1 - s).$$

Результати розрахунків зведені у таблицю 1.8, графіки показані на рис. 1.18 – 1.19.

Таблиця 1.8

$s_{\text{Ш}}$	0	0,5	1	1,5	2
M , Н·м	0	242	478	700	906
n_2 , об/хв	750	375	0	-375	-750

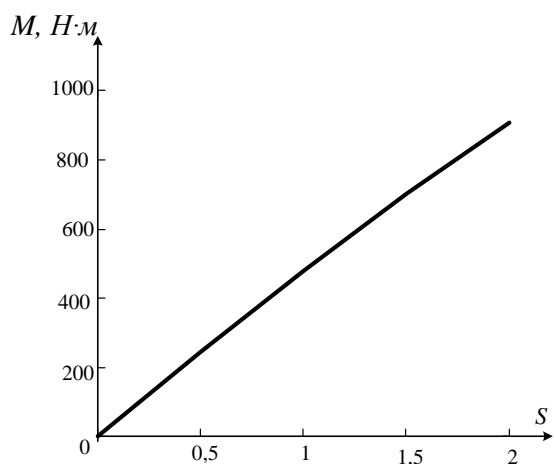


Рис. 1.18

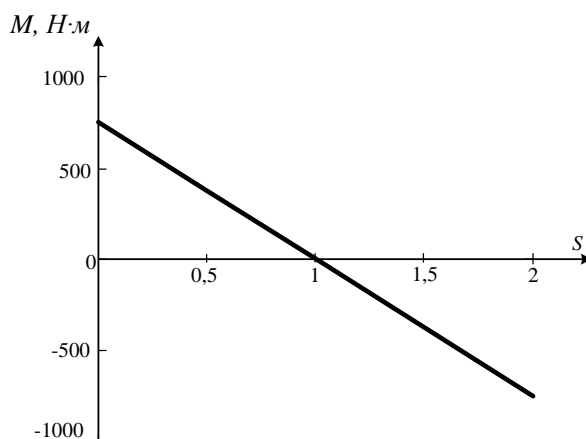


Рис. 1.19

1.2.4. Задачі для самостійного розв'язання

1.42. Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором має такі паспортні дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 30$ кВт, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 220/380$ В, номінальна швидкість обертання $n_2 = 725$ об/хв, номінальний ККД $\eta_{\text{НОМ}} = 0,86$, номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,74$, кратність максимального моменту $\lambda = 3$. Знайти повну потужність, яку споживає двигун; номінальний обертовий момент; номінальне та критичне ковзання.

1.43. Трифазний шестиполосний асинхронний двигун з фазним ротором ввімкнений у мережу змінного струму з напругою $U = 660$ В. При корисному моменті на валу $M_2 = 390$ Н·м, швидкість обертання $n_2 = 980$ об/хв, фазний струм $I_{\phi} = 26$ А, коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 0,91$. Визначити потужність на валу двигуна, ККД і ковзання.

1.44. Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором потужністю $P_2 = 55$ кВт ввімкнений у мережу з напругою $U = 380$ В. Обмотки статора з'єднані зіркою. За номінального навантаження швидкість обертання $n_2 = 740$ об/хв, $\cos \varphi = 0,9$, $\eta = 0,925$. Відношення пускового струму до номінального $K_I = 5$. Визначити номінальний обертовий момент; номінальний та пусковий струми двигуна.

1.45. Трифазний шестиполосний асинхронний двигун підключений до мережі з напругою $U = 380$ В і споживає потужність $P_1 = 6,7$ кВт при струмі $I_1 = 15$ А. Корисний обертовий момент на валу $M_2 = 49,2$ Н·м, ковзання $3,0\%$. Визначити швидкість обертання ротора n_2 ; потужність P_2 на валу двигуна; коефіцієнт потужності $\cos \varphi$, ККД.

1.46. Трифазний десятиполосний асинхронний двигун з фазним ротором має такі паспортні дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 45$ кВт, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 220 / 380$ В, номінальна швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 574$ об/хв, номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,74$, номінальний ККД $\eta_{\text{НОМ}} = 0,86$, частота струму $f = 50$ Гц. Обчислити потужність P_1 , яку споживає двигун з мережі; струми у разі з'єднання обмоток статора трикутником та зіркою; обертовий момент M та ковзання s при номінальному навантаженні.

1.47. Короткозамкнений трифазний асинхронний двигун має такі паспортні дані: $P_{\text{НОМ}} = 7,5$ кВт, $U_{\text{НОМ}} = 380 / 660$ В, $n_{\text{НОМ}} = 660$ об/хв, $I_{\text{НОМ}} = 230 / 13,3$ А, $K_I = 6,5$, $\eta = 71\%$. Визначити число пар полюсів двигуна; ковзання і пусковий струм у разі з'єднання обмоток статора

трикутником та зіркою; номінальний обертовий момент; потужність, яку споживає двигун.

1.48. Асинхронний трифазний двигун з фазним ротором має такі паспортні дані: потужність $P_{\text{НОМ}} = 22$ кВт, напруга $U_{\text{НОМ}} = 380/220$ В, швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 960$ об/хв, коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,73$, кратність максимального моменту $\lambda = 2,8$. Знайти критичне ковзання; номінальний і максимальний обертові моменти; швидкість обертання у разі максимального моменту.

1.49. Асинхронний двигун, обмотки якого з'єднані трикутником, ввімкнений у мережу з напругою $U = 220$ В і частотою $f = 50$ Гц. Відомі такі паспортні дані двигуна: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 4$ кВт, $\eta_{\text{НОМ}} = 85,5\%$, $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,89$, $n_{\text{НОМ}} = 2880$ об/хв. Визначити потужність, яку споживає двигун; лінійний струм; сумарні втрати; обертовий момент на валу; ковзання.

1.50. Трифазний асинхронний двигун марки АО2-82-6 ввімкнений у мережу змінного струму з напругою $U = 380$ В і споживає потужність $P_1 = 43716$ Вт. Коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 0,91$. Сумарні втрати потужності $\sum P = 3716$ Вт. Ковзання $s = 2\%$. Знайти потужність на валу; ККД; лінійний струм; швидкість обертання магнітного поля і ротора.

1.51. Асинхронний трифазний двигун марки АОЛ2-32-6 ввімкнений у мережу змінного струму з напругою $U = 220$ В. Обмотки статора з'єднані трикутником. Швидкість обертання ротора $n_2 = 950$ об/хв, $\eta = 81\%$, $\cos \varphi = 0,77$. Визначити потужність, яку споживає двигун; потужність на валу; сумарні втрати; обертовий момент; швидкість обертання магнітного поля.

1.52. Асинхронний трифазний двигун АОЛ2-42-6 за номінального обертового моменту $M_{\text{НОМ}} = 39,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$, швидкості обертання $n_{\text{НОМ}} = 960 \text{ об/хв}$ та $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,79$ споживає потужність $P_1 = 4820 \text{ Вт}$. Обмотки статора з'єднані трикутником і підключені до мережі змінного струму з напругою $U = 220 \text{ В}$. Знайти потужність на валу; сумарні втрати; ККД; струм, який споживає двигун; ковзання; частоту струму ротора.

1.53. Асинхронний трифазний двигун з короткозамкненим ротором живиться від мережі змінного струму з напругою $U = 220 \text{ В}$ і споживає струм $I_1 = 3,3 \text{ А}$. Обмотка двигуна з'єднана трикутником. Швидкість обертання магнітного поля статора $n_1 = 1000 \text{ об/хв}$, $\cos \varphi = 0,68$, $\eta = 70\%$, ковзання $s = 8,5\%$. Розрахувати споживану потужність P_1 ; корисну потужність на валу P_2 ; сумарні втрати; обертовий момент; швидкість обертання ротора; частоту струму ротора.

1.54. Асинхронний трифазний двигун з короткозамкненим ротором ввімкнений у мережу змінного струму з напругою $U = 380 \text{ В}$. Обмотки статора з'єднані зіркою. За номінального моменту на валу $M_{\text{НОМ}} = 653 \text{ Н}\cdot\text{м}$ і $\cos \varphi = 0,82$ ротор обертається зі швидкістю $n_2 = 585 \text{ об/хв}$. Сумарні втрати потужності $\sum P = 4,2 \text{ кВт}$. Визначити номінальний лінійний струм; частоту струму ротора; ККД.

1.55. Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором ввімкнений у мережу змінного струму з напругою $U = 220 \text{ В}$ і споживає струм $I_1 = 27 \text{ А}$. Обмотки статора з'єднанні трикутником. Швидкість обертання ротора $n_2 = 970 \text{ об/хв}$, $\eta = 87\%$, $\cos \varphi = 0,82$. Обчислити обертовий момент; ковзання; суму втрат; число пар полюсів.

1.56. Шестиполосний асинхронний двигун, обмотки якого з'єднані зіркою, живиться від мережі змінного струму з напругою $U = 380$ В. За номінального обертового моменту $M = 216,6$ Н·м, швидкість обертання ротора $n_2 = 970$ об/хв, $\cos \varphi = 0,9$, сумарні втрати $\Sigma P = 2,3$ кВт. Розрахувати обертовий момент на валу та частоту струму ротора.

1.57. Шестиполосний трифазний асинхронний двигун, обмотки якого з'єднані трикутником, ввімкнений у мережу змінного струму з напругою $U = 220$ В. Двигун споживає струм $I_1 = 43,5$ А при $\eta = 88\%$, $\cos \varphi = 0,89$ і ковзанні $s = 3\%$. Визначити обертовий момент на валу та сумарні втрати потужності.

1.58. Асинхронний трифазний двигун з короткозамкненим ротором марки АОЛ-22-2 ввімкнений у мережу змінного струму з напругою $U = 380$ В. Обмотки двигуна з'єднані трикутником. За номінального обертового моменту на валу $M_{\text{НОМ}} = 7,34$ Н·м, швидкість обертання ротора $n_2 = 2860$ об/хв. Номінальний ККД $\eta_{\text{НОМ}} = 83\%$, коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,89$. Обчислити споживану потужність; корисну потужність на валу; лінійний струм; ковзання; сумарні втрати.

1.59. Трифазний асинхронний двигун, обмотки якого з'єднані трикутником, живиться від мережі змінного струму з напругою $U_{\phi} = 220$ В і споживає струм $I_1 = 14$ А. Швидкість обертання магнітного поля $n_1 = 750$ об/хв, частота обертання ротора $n_2 = 720$ об/хв, $\eta = 80\%$, $\cos \varphi = 0,8$. Розрахувати обертовий момент на валу; ковзання; сумарні втрати.

1.60. Трифазний асинхронний двигун, обмотки якого з'єднані зіркою, працює від мережі змінного струму з напругою $U = 380$ В. Число полюсів обмотки 8. За номінальної потужності на валу $P_{2\text{НОМ}} = 5500$ Вт,

обертового моменту $M = 72,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $\cos \varphi = 0,72$ сумарні втрати складають 970 Вт . Обчислити споживаний струм, ККД та ковзання s .

1.61. Для асинхронного двигуна с фазним ротором відомі: активний опір ротора $R_2 = 0,02 \text{ Ом}$, номінальне ковзання $s_{\text{НОМ}} = 0,04$, критичне ковзання $s_{\text{КР}} = 0,22$. Розрахувати опір пускового реостату, який необхідно підключити у коло ротора, щоб забезпечити максимальний пусковий момент.

1.62. Асинхронний двигун з фазним ротором має такі дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 70 \text{ кВт}$, номінальна швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 955 \text{ об/хв}$, критичне ковзання $s = 12\%$, опір фази ротора $R_2 = 0,06 \text{ Ом}$. Визначити опір пускового реостату, який потрібно підключити у коло ротора, щоб початковий пусковий момент дорівнював $780 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

1.63. Асинхронний двигун з фазним ротором типу МТ-42-8 має такі паспортні данні: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 16 \text{ кВт}$, номінальна швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 720 \text{ об/хв}$, $\eta = 82,5\%$, кратність максимального моменту $\lambda = 3$, номінальний струм ротора $I_{2\text{НОМ}} = 46,3 \text{ А}$, опір фази ротора $R_2 = 0,123 \text{ Ом}$. Розрахувати опір реостата, який потрібно підключити у коло ротора, щоб за номінального обертового моменту на валу двигун працював з ковзанням $s = 0,6$.

1.64. Для асинхронного двигуна з фазним ротором відомі номінальна швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 950 \text{ об/хв}$ і опір обмотки ротора $R_2 = 0,08 \text{ Ом}$. Обчислити опір реостата, ввімкненого у коло ротора, якщо за номінального моменту на валу ротор обертається зі швидкістю $n_2 = 700 \text{ об/хв}$.

1.65. У асинхронного двигуна з фазним ротором число пар полюсів $p = 3$, номінальне ковзання $s_{\text{НОМ}} = 10\%$, опір фази обмотки ротора $R_2 = 0,15$ Ом. У коло ротора ввімкнено додатковий реостат з опором $R_{\text{д}} = 0,45$ Ом. Визначити швидкість обертання ротора, якщо на вал діє номінальний обертовий момент.

1.66. Трифазний асинхронний двигун, обмотки якого з'єднані зіркою, живиться від мережі змінного струму з напругою $U = 380$ В. Відомі номінальні дані двигуна: потужність $P_{\text{НОМ}} = 30$ кВт, швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 720$ об/хв, ККД $\eta_{\text{НОМ}} = 0,875$, коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,79$, струм у фазі ротора $I_{2\text{НОМ}} = 150$ А, критичне ковзання $s_{\text{кр}} = 0,14$, кратність максимального моменту $\lambda = 1,72$, опори фаз обмотки статора $R_1 = 0,11$ Ом, ротора $R_2 = 0,015$ Ом. Розрахувати у номінальному режимі роботи двигуна струм статора; потужність втрат; опір реостата для регулювання частоти обертання у межах $600 \div 720$ об/хв.

1.2.5. Завдання на індивідуальну розрахунково-графічну роботу

Завдання 1 (варіанти 0-25)

Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором потужністю $P_{\text{НОМ}}$ ввімкнений у мережу з напругою $U = U_{\text{НОМ}}$ і частотою $f = 50$ Гц. Обмотки статора з'єднані зіркою.

Обчислити:

- номінальний $I_{\text{НОМ}}$ і пусковий $I_{\text{пус}}$ струми;

- номінальний $M_{\text{НОМ}}$, пусковий $M_{\text{ПУС}}$, максимальний M_{max} моменти;
- загальні втрати у двигуні за номінального навантаження.

Визначити:

- як зміниться пусковий момент двигуна у разі зниження напруги живлення на 15%;
- чи можливий пуск двигуна з номінальним навантаженням, якщо напруга знижена на 15%?

Побудувати механічну характеристику двигуна.

Дані для розрахунків наведені у таблиці 1.9.

Завдання 2 (варіанти 26-50)

Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором потужністю $P_{\text{НОМ}}$ ввімкнений у мережу з напругою $U = U_{\text{НОМ}}$ і частотою $f = 50$ Гц. Обмотки двигуна з'єднані трикутником. Відоме число витків на фазу обмотки статора W_1 і обмотки ротора W_2 ; опори фаз обмоток R_1, R_2, X_1, X_2 ; кількість пар полюсів p .

Обчислити у випадку пуску двигуна без пускового реостату:

- пускові струми статора $I_{1\text{ПУС}}$ і ротора $I_{2\text{ПУС}}$;
- пусковий обертовий момент $M_{\text{ПУС}}$;
- коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{ПУС}}$.

Визначити у випадку реостатного пуску двигуна:

- опір пускового реостату $R_{\text{ПУС}}$, який забезпечує максимальний пусковий момент;
- величину максимального пускового моменту $M_{\text{ПУС}} = M_{\text{max}}$;

- коефіцієнт потужності двигуна $\cos \varphi_{\text{ПВС}}$.

Побудувати природну та штучну механічні характеристики двигуна.

Дані для розрахунків наведені у таблиці 1.10.

Таблиця 1.9

№ варіанту	Дані для варіанту								
	$U_{\text{НОМ}}$, В	$P_{\text{НОМ}}$, кВт	$s_{\text{НОМ}}$, %	$\eta_{\text{НОМ}}$	$\cos \varphi_{\text{НОМ}}$	p	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}}$	$\frac{M_{\text{ПВС}}}{M_{\text{НОМ}}}$	$\frac{I_{\text{ПВС}}}{I_{\text{НОМ}}}$
1	220	0,8	3	0,78	0,86	1	2,2	1,9	7
2	220	0,1	3	0,795	0,87	1	2,2	1,9	7
3	220	1,5	4	0,805	0,88	1	2,2	1,8	7
4	220	20,2	4,5	0,83	0,89	1	2,2	1,8	7
5	220	3	3,5	0,845	0,89	1	2,2	1,7	7
6	220	4	2	0,855	0,89	1	2,2	1,7	7
7	220	5,5	3	0,86	0,89	1	2,2	1,7	7
8	220	7,5	3,5	0,87	0,89	1	2,2	1,6	7
9	220	10	4	0,88	0,89	1	2,2	1,5	7
10	220	13	3,5	0,88	0,89	1	2,2	1,5	7
11	220	17	3,5	0,88	0,9	1	2,2	1,2	7
12	220	22	3,5	0,88	0,9	1	2,2	1,1	7
13	220	30	3	0,89	0,9	1	2,2	1,1	7
14	220	40	3	0,89	0,91	1	2,2	1	7
15	220	55	3	0,9	0,92	1	2,2	1	7
16	220	75	3	0,9	0,92	1	2,2	1	7
17	220	100	2,5	0,92	0,92	1	2,2	1	7
18	380	10	3	0,89	0,87	2	2	1,4	7
19	380	13	3	0,89	0,89	2	2	1,3	7
20	380	17	3	0,89	0,89	2	2	1,3	7
21	380	22	3	0,9	0,9	2	2	1,2	7
22	380	30	3	0,91	0,91	2	2	1,2	7
23	380	40	3	0,93	0,92	2	2	1,1	7
24	380	55	3	0,93	0,92	2	2	1,1	7
25	380	75	3	0,93	0,92	2	2	1,1	7

Таблиця 1.10

№ варіанту	Дані для розрахунків								
	$U_{\text{НОМ}},$ В	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$X_1,$ Ом	$X_2,$ Ом	W_1	W_2	p	$s_{\text{НОМ}},\%$
26	220	0,46	0,07	1,52	0,22	190	64	2	3
27	220	0,58	0,06	2,32	0,35	260	82	2	3,5
28	380	0,62	0,04	1,84	0,42	362	72	2	3,5
29	380	0,74	0,07	0,052	0,37	216	48	3	2,5
30	380	0,78	0,06	4,12	0,62	424	74	3	2,5
31	220	0,36	0,045	3,62	0,48	358	62	3	4
32	220	0,42	0,05	2,82	0,34	184	42	2	4,5
33	220	0,64	0,06	3,12	0,65	412	82	2	5
34	220	0,82	0,07	3,82	0,48	362	65	2	5
35	380	0,84	0,06	4,24	0,52	254	46	3	3
36	380	0,78	0,04	3,64	0,48	228	42	3	3
37	380	0,86	0,05	3,48	0,78	316	54	2	2,5
38	380	0,76	0,065	2,24	0,54	272	78	2	2,5
39	220	0,48	0,03	3,48	0,62	458	92	2	5,5
40	220	0,52	0,055	2,94	0,36	162	43	2	3
41	220	0,56	0,045	4,42	0,64	288	54	3	3
42	380	0,62	0,06	3,54	0,46	204	62	3	3
43	380	0,76	0,045	3,72	0,54	356	72	3	5
44	380	0,66	0,05	2,92	0,64	384	68	2	5
45	220	0,58	0,035	2,56	0,48	452	82	2	5
46	220	0,6	0,055	2,64	0,56	412	68	2	2
47	220	0,68	0,075	3,48	0,32	282	54	3	2
48	380	0,42	0,065	1,82	0,45	368	48	3	4
49	380	0,82	0,07	2,52	0,64	180	45	2	4
50	220	0,54	0,045	2,38	0,45	254	48	2	3
51	220	0,42	0,03	3,68	0,32	322	58	2	3

1.3. Синхронні машини

1.3.1 Основні теоретичні положення

Синхронна машина – це машина змінного струму, у якій магнітне поле, що бере участь у процесі перетворення енергії, і ротор обертаються з однаковою кутовою швидкістю, причому швидкість обертання n не залежить від навантаження і визначається лише частотою f напруги живлення і кількістю пар полюсів p ротора $n = 60f / p$.

Синхронній машині притаманні складність електромагнітних процесів і розрахунків.

Обертове магнітне поле ротора утворюється внаслідок механічного обертання системи полюсів ротора, що змінюються по черзі (N, S, N, S). Поле цих полюсів утворюється постійним струмом збудження, називається основним і характеризується магнітним потоком Φ_0 .

Внаслідок обертання поля ротора у фазах трифазної обмотки статора індуються синусоїдні Е.Р.С., які мають однакову частоту і амплітуду та зсунуті за фазою одна від одної на кут 120° , тобто утворюють трифазну систему. У теорії електричних машин обмотку, в якій основний магнітний потік індукує Е.Р.С., прийнято називати обмоткою якоря; отже, в синхронній машині обмотка статора – це обмотка якоря. При навантаженні машини в обмотці якоря проходить трифазний струм, який створює обертове магнітне поле $\Phi_{\text{я}}$. Трифазна обмотка якоря синхронних машин виготовляється так, що збуджене її струмом обертове магнітне поле завжди має таку ж кількість пар полюсів, як і ротор. Тому магнітні поля Φ_0 і $\Phi_{\text{я}}$ обертаються з однаковою швидкістю і взаємно нерухомі. Цей фактор разом з допущенням, що магнітна система машини ненасичена, дає

можливість векторно складати магніторушійні сили якоря і ротора $\overline{F}_0 + \overline{F}_я = \overline{F}_{РЕЗ}$, а також ввести поняття результуючого магнітного поля машини при навантаженні: $\overline{\Phi}_0 + \overline{\Phi}_я = \overline{\Phi}_{РЕЗ}$.

Взаємодія полів результуючого і ротора визначає режим роботи синхронної машини. Якщо поле ротора випереджає результуюче поле (полнос ротора видається вперед і «тягне» за собою полнос результуючого поля), то синхронна машина працює як генератор. Для здійснення цього треба збільшити обертовий момент первинного двигуна, тобто механічну потужність його обертання. Ця додаткова механічна потужність перетворюється в електричну; перетворення такого роду властиве генератору. У генераторному режимі машини поле ротора є ведучим.

Якщо поле ротора відстає від результуючого, то синхронна машина працює в режимі двигуна. У такому випадку ведучим є результуюче поле машини. Для здійснення переходу в цей режим треба, щоб мережа живилася від інших генераторів, тобто мережа була джерелом енергії для даної синхронної машини.

Слід мати на увазі, що регулювання величини обертового моменту змінює практично тільки активну складову струму та активну потужність синхронної машини, а регулювання струму збудження змінює реактивну складову струму та реактивну потужність синхронної машини.

У разі нормального збудження в струмі машини немає реактивної складової, тому він мінімальний за величиною і активний за характером. Перезбудженій та недозбудженій машині притаманне збільшення струму (через появу реактивної складової) і наявність реактивної потужності ємнісного або індуктивного характеру. Всі ці особливості наочно відображає специфічна для синхронних машин U -подібна характеристика.

Особливістю синхронних машин є рівність швидкості обертового магнітного поля машини і швидкості ротора. Зміна навантаження синхронної машини веде до зміни гнучкого зв'язку між результуючим полем і полем ротора, тобто до зміни просторового кута розбіжності θ між магнітними осями цих полів. Для успішного засвоєння процесів у синхронній машині доцільно проаналізувати за допомогою векторних діаграм зміну кута розбіжності θ при переході машини від генераторного до двигунного режиму через режим неробочого ходу. Залежність електромагнітного моменту синхронної машини від кута розбіжності $M = f(\theta)$ – кутлова характеристика – відповідає рівнянню $M = M_{max} \sin \theta$. Як правило, у генераторному режимі синхронна машина працює при $\theta = 12 \div 14^\circ$, у режимі двигуна – при $\theta = 20 \div 30^\circ$. у генератора кут θ вважають додатнім, у двигуна – від'ємним.

Для кількісного аналізу роботи синхронної машини використовують частину її математичної моделі – рівняння електричного стану фази статора. На підставі цього рівняння будують схему заміщення і векторну діаграму синхронної машини, яка дозволяє зручно і наочно дослідити режими машини і визначати її експлуатаційні характеристики. Для генераторного режиму спрощене рівняння електричного стану фази статора має вигляд

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + jX_C \dot{I}.$$

З рівняння випливає, що синхронний генератор (СГ) – це джерело Е.Р.С. E_0 , внутрішній опір якого має індуктивний характер.

Опрацьовуючи процеси у синхронному генераторі, слід насамперед з'ясувати зміст поняття «реакція якоря». При неробочому ході в СГ існує тільки магнітне поле Φ_0 , створене магніторушійною силою обмотки

збудження. У режимі навантаження магнітне поле машини створюється одночасною дією магніторушійних сил обмотки якоря і обмотки ротора $\bar{\Phi}_{\text{РЕЗ}} = \bar{\Phi}_0 + \bar{\Phi}_\text{я}$ і відрізняється від поля $\bar{\Phi}_0$ при неробочому ході (відповідно Е.Р.С. якоря при навантаженні відрізняється від Е.Р.С. E_0).

Вплив магнітного потоку якоря $\Phi_\text{я}$ на основний потік Φ_0 називають реакцією якоря. Вона залежить від взаємного розміщення у просторі магнітних осей потоків Φ_0 і $\Phi_\text{я}$. Магнітна вісь основного потоку Φ_0 завжди збігається з віссю полюса ротора, яку називають поздовжньою (перпендикулярну до неї – поперечною). Орієнтація у просторі магнітної осі потоку $\Phi_\text{я}$ залежить від кута зсуву фаз ψ між Е.Р.С. і струмом у фазі статора, тобто від характеру навантаження. Кут ψ може змінюватись від $+90^\circ$ до -90° . Для кращого засвоєння процесів доцільно проаналізувати за допомогою векторних діаграм вплив реакції якоря на роботу СГ при різних типах навантаження. Векторні діаграми наочно показують, що при суто реактивному навантаженні генератора реакція якоря поздовжня, внаслідок чого магнітне поле не спотворюється порівняно з неробочим ходом, електромагнітний момент не виникає, але змінюється величина потоку та індукована ним у фазах якоря Е.Р.С. (при C -навантаженні $\Phi_{\text{РЕЗ}} > \Phi_0$, $E > E_0$ - реакція намагнічувальна; при L -навантаженні $\Phi_{\text{РЕЗ}} < \Phi_0$, $E < E_0$ - реакція розмагнічувальна). Якщо навантаження активне ($\psi = 0$), то виникає поперечна реакція якоря, що призводить до спотворення магнітного поля порівняно з неробочим ходом та появи електромагнітного гальмівного моменту, який діє на ротор. Величина $\Phi_{\text{РЕЗ}}$ дещо зменшується відносно Φ_0 через неоднорідність магнітного стану ділянки осердя статора під полюсом ротора.

Оцінку робочим властивостям СГ дають на підставі характеристик, які можна побудувати за розрахунковими даними, за допомогою векторних діаграм або за результатами дослідів. Крім кутової та U-подібної характеристик, притаманних синхронним машинам у будь-якому режимі, синхронний генератор при роботі на автономне навантаження має ряд окремих характеристик: неробочого ходу; трифазного короткого замикання; індукційну навантажувальну; зовнішню; регульовальну. За навчальною програмою опрацюванню підлягають три з них, вказані нижче.

1. Характеристика неробочого ходу $E_0 = f(I_3)$ при $I = 0$, яка дозволяє оцінити магнітне поле машини. Крім того, її використовують для побудови векторних діаграм та інших характеристик. 2. Зовнішня характеристика $U = f(I)$ при $I_3 = const$, яка показує зміну напруги U на виході генератора при зміні струму навантаження. Для кращого засвоєння матеріалу корисно дослідити вплив на зовнішню характеристику коефіцієнта потужності навантаження $\cos\phi$. 3. Регульовальна характеристика $I_3 = f(I)$ при $U = const$, за допомогою якої при зміні навантаження можна підтримувати незмінною напругу на виході генератора шляхом регулювання струму збудження.

У сучасній практиці СГ зазвичай працює на загальну мережу. Потужні електромережі складаються з багатьох ввімкнених паралельно електростанцій, завдяки чому підвищується надійність, економічність виробництва та розподілу електроенергії. Оскільки на кожній електростанції встановлені декілька генераторів, то в енергосистемі на паралельну роботу можуть бути ввімкнені сотні машин. Бажано набути загальну уяву про ввімкнення генератора на паралельну роботу; цей процес називають синхронізацією. Синхронізація може бути точною або грубою. При точній синхронізації, щоб уникнути аварійних стрибків

струму в статорі і механічних поштовхів на валу, забезпечують виконання ряду умов: рівності частот, амплітуд і початкових фаз Е.Р.С. генератора і напруги мережі; однаковості чергування їх фаз. Точна синхронізація досягається зміною струму збудження, швидкості обертання ротора та перевіряється за допомогою спеціальних пристроїв – синхроноскопів. При такому способі ввімкнення СГ у мережу проходить непомітно – без стрибка струму і моменту під час перехідного процесу. Оскільки процес точної синхронізації є досить тривалим, на електростанціях часто використовують грубу або самосинхронізацію. Вона полягає у тому, що ротор незбудженого генератора розганяють майже до синхронної швидкості обертання, потім генератор вмикають у мережу і подають струм в обмотку збудження. Таке вмикання супроводжується стрибком струму в обмотці статора і виникненням механічних зусиль на валу, однак практика показала, що ці негативні явища не створюють загрози для машини. Такий метод увімкнення СГ значно спрощує процес синхронізації, легко підлягає автоматизації і має велике значення при ліквідації аварії, коли у мережі відбуваються коливання напруги і частоти і потрібне швидке підключення генератора. Після ввімкнення машина перебуває в стані синхронізму (швидкість обертання ротора строго незмінна) і працює в режимі неробочого ходу, тобто не віддає і не споживає електричної енергії. Щоб перевести на ввімкнений генератор частину активної потужності, яку мережа віддає споживачам, збільшують обертовий момент на валу; для завантаження генератора реактивною потужністю змінюють струм збудження. Якщо в обмотку збудження поданий струм $I_3 > I_{3\text{ном}}$ (перезбудження) у струмі статора є реактивна складова, яка відстає за фазою від напруги мережі на кут 90° ; такий режим відповідає роботі генератора з активно-індуктивним навантаженням. У випадку $I_3 < I_{3\text{ном}}$

(недозбудження) у струмі статора є реактивна складова, яка випереджає за фазою напругу мережі на кут 90° , що відповідає активно-ємнісному навантаженню генератора.

Синхронний двигун (СД) живиться від загальної мережі, і його можна уявити як генератор, що працює паралельно з мережею при зміні фази Е.Р.С. E_0 на 180° . Хоч схема заміщення СД складається з таких самих елементів, як схема заміщення СГ, її зміст інший: синхронний двигун – це споживач, що має проти-Е.Р.С. і внутрішній індуктивний синхронний опір X_C . У СД умовно-додатній напрям струму збігається з напрямом напруги мережі U , тому рівняння електричного стану фази обмотки статора записують так: $\dot{U} = \dot{E}_0 + jX_C \dot{I}$. На векторних діаграмах двигуна вектор Е.Р.С. збудження E_0 , який зв'язується з положенням полюсів ротора, у навантажувальних режимах відстає на кут θ від вектора напруги мережі U , з яким зв'язано положення полюсів результуючого магнітного поля. Різниця $\dot{U} - \dot{E}_0 = jX_C \dot{I}$ є напругою на внутрішньому опорі фази машини.

Властивості двигуна описують рядом характеристик: кутовою, U -подібною, робочими. Кутова характеристика СД має такий самий вигляд, як у генератора: $M = M_{max} \sin \theta$, де амплітуда $M_{max} = 3E_0U / X_C \Omega$. Різниця полягає в тому, що для двигуна кут θ вважається від'ємним, а електромагнітний момент M є рушійним і врівноважує гальмівний момент навантаження. У двигунах кут θ більший, тому перевантажувальна спроможність менша, ніж у генератора, оскільки робота останнього є більш відповідальною. Амплітуда кутової характеристики визначає перевантажувальну здатність СД (границю його

статичної стійкості в синхронізмі). Вона залежить від напруги мережі U і Е.Р.С. збудження E_0 (тобто від струму збудження). Таким чином, перевантажувальну здатність двигуна легко регулювати струмом збудження. Номінальний момент двигуна відповідає куту розбіжності $\theta < 30^\circ$, тому перевантажувальна здатність СД $\lambda \equiv 1/\sin \theta$ завжди більше двох. Як усі електродвигуни, СД має властивість саморегулювання: при зміні моменту навантаження на валу змінюється кут розбіжності θ і обертовий момент стає рівним моменту навантаження. При цьому змінюються активна потужність і струм статора двигуна, але швидкість обертання залишається незмінною. На кутовій характеристиці стійка робота СД можлива у межах $0 < \theta < 90^\circ$.

Слід звернути увагу на суттєву перевагу синхронного двигуна: його електромагнітний момент пропорційний першій степені напруги мережі (у асинхронних двигунів – квадрату напруги). Крім того, шляхом зміни струму збудження (зміни E_0) можна скомпенсувати зменшення максимального обертового моменту у разі зменшення напруги мережі.

U -подібна характеристика СД має такий самий вигляд, як у генератора. Недозбуджений двигун споживає з мережі реактивну потужність, тому відносно мережі він аналогічний котушці індуктивності. При перезбудженні СД віддає реактивну потужність, тобто відносно мережі він аналогічний конденсатору. Зазвичай СД працюють у режимі перезбудження при $\cos \varphi = -0,8$. Ємнісні складові струмів статорів СД компенсують в лінії індуктивні складові струмів трансформаторів, асинхронних двигунів та інших індуктивних споживачів, зменшуючи струми і втрати енергії в лініях. Здатність ввідавати реактивну потужність вигідно відрізняє синхронні двигуни від асинхронних, які тільки споживають реактивну потужність. Слід звернути увагу на ще одну

важливу перевагу СД – можливість регулювання коефіцієнта потужності. Пояснюється це тим, що сталість напруги мережі обумовлює сталість в СД результуючого потокозчеплення, і регулювання струму збудження при електромагнітному моменті $M = const$ призводить до зміни величини і фази струму статора.

Для аналізу роботи двигуна у різних навантажувальних режимах дуже важливі його робочі характеристики: залежність від активної потужності на валу P_2 при $I_3 = const$ (або $\cos \varphi = const$) таких величин: обертового моменту M ; струму статора I ; споживаної з мережі потужності P_1 ; коефіцієнта корисної дії η . Якщо робочі характеристики визначені при $I_3 = const$, то в перелік входить залежність $\cos \varphi = f(P_2)$; якщо $\cos \varphi = const$, то до робочих характеристик відносять характеристику $I_3 = f(P_2)$.

У багатьох випадках при виборі двигуна вирішальне значення має зручність регулювання швидкості обертання. Тому доцільно з'ясувати можливості регулювання швидкості обертання ротора СД. З формули $n = 60f/p$ видно, що регулювати швидкість n можна шляхом зміни частоти напруги живлення f або числа полюсів p . В останньому випадку необхідно змінювати число полюсів і на статорі, і на роторі, що унеможлиблює такий спосіб. Практично використовують лише зміну частоти напруги живлення. Однак у чистому вигляді частотне регулювання швидкості обертання СД застосовують в окремих випадках, коли приводний механізм має малу інерційність. Для СД в поширених електроприводах використовують метод частотного регулювання з самосинхронізацією, при якому двигун не може випасти із синхронізму. Збереження синхронного стану двигуна досягають тим, що керування

перетворювачами частоти здійснюють від системи давачів положення ротора, і напругу на кожну фазу двигуна подають при куті $\theta < 90^\circ$ ($0 < \theta < 90^\circ$ - область стійкої роботи СД на кутовій характеристиці).

Вивчаючи процеси в синхронному двигуні, треба усвідомити чому він не має пускового моменту і ознайомитись з можливими способами його пуску. Суттєва особливість синхронного двигуна полягає в тому, що на відміну від асинхронного, обертовий момент у нього виникає, коли швидкість обертання ротора збігається зі швидкістю обертання магнітного поля машини. Пояснюється це тим, що струм в обмотці збудження синхронного двигуна з'являється не в результаті електромагнітної індукції (як в обмотці ротора асинхронного двигуна), а внаслідок її живлення стороннім джерелом постійного струму. Якщо на обмотку збудження нерухомого ротора поданий постійний струм, вона створює основний магнітний потік Φ_0 , який визначає полярність полюсів ротора. При вмиканні обмотки якоря у мережу, його трифазна система струмів утворює магнітне поле $\Phi_{\text{я}}$, яке обертається зі швидкістю $n = 60f/p$; якщо $f = 50$ Гц, $p = 1$, то $n = 3000$ об/хв. За такої швидкості обертання $\Phi_{\text{я}}$ навколо нерухомого ротора сила притягання магнітних полюсів ротора і поля якоря змінюється силою їх відштовхування через кожну 0,01 с, і ротор не встигає зрушити з місця. Електромагнітний момент може заставити ротор подолати інерцію і рухатись за магнітним полем якоря – втягнутися у синхронізм, якщо поле якоря буде переміщатися відносно збудженого ротора достатньо повільно. Такий стан виникає, коли попередньо розігнати ротор до швидкості, яка відрізняється від швидкості обертання поля на декілька процентів. Знайомлячись з поширеними на даний час способами пуску двигуна, слід звернути увагу на те, що всі вони

ґрунтуються на попередньому розгоні двигуна майже до синхронної швидкості, після чого він втягується у синхронізм.

При вивченні синхронних машин слід звернути увагу на їх використання у якості джерел реактивної потужності. Синхронну машину, що виконує функції такого джерела, називають синхронним компенсатором (СК).

Синхронний компенсатор являє собою по суті синхронний двигун, розрахований на роботу з перезбудженням без механічного навантаження і призначений спеціально для поліпшення коефіцієнта потужності. Якщо не враховувати відносно невеликі втрати потужності в синхронному компенсаторі, можна вважати, що він споживає з мережі чисто ємнісний струм і ємнісну потужність. Більшість споживачів електричної енергії змінного струму (асинхронні двигуни, трансформатори, індукційні печі, вентиляльні перетворювачі тощо) споживають з мережі індуктивний реактивний струм. Цей струм створює магнітний потік, без якого неможлива робота зазначених пристроїв. За рахунок індуктивної складової збільшується повний струм споживача $I_{\text{СП}}$, який проходить по лініях електропередачі, і зменшується коефіцієнт потужності споживача $\cos \varphi_{\text{СП}}$. Це призводить до збільшення втрат потужності $R_{\text{Л}} I_{\text{СП}}^2$ і втрат напруги $\Delta U = R_{\text{Л}} I_{\text{СП}} \cos \varphi_{\text{СП}} + X_{\text{Л}} I_{\text{СП}} \sin \varphi_{\text{СП}}$ у лініях передачі. Внаслідок цього знижується економічність електропередачі і виникають значні відхилення напруги на затискачах споживачів.

При підключенні синхронного компенсатора у місці ввімкнення споживачів (рис. 1.20,а) струм у лінії дорівнює сумі струмів споживачів $\dot{I}_{\text{СП}}$ і компенсатора $\dot{I}_{\text{СК}}$: $\dot{I}_{\text{Л}} = \dot{I}_{\text{СП}} + \dot{I}_{\text{СК}}$. З векторної діаграми на рис. 1.20,б видно, що струм у лінії зменшується ($I_{\text{Л}} < I_{\text{СП}}$), а

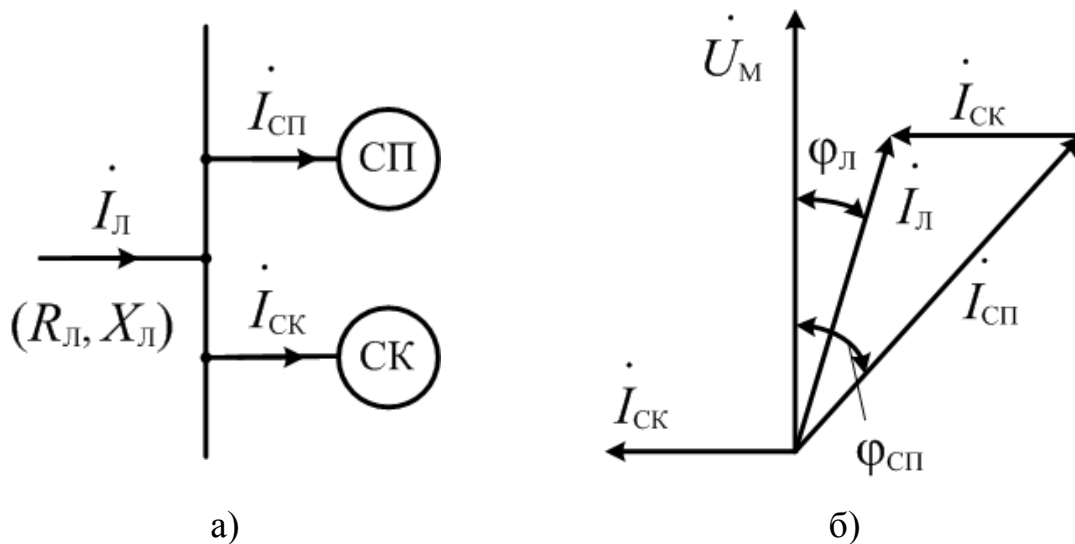


Рис. 1.20

$\cos \varphi_{\text{Л}} > \cos \varphi_{\text{СП}}$, внаслідок зменшуються втрати потужності і напруги у лінії передачі. Таким чином, синхронний компенсатор являє собою місцеве джерело реактивної потужності для споживачів; він звільняє лінії передачі великої дальності від передачі реактивної потужності. Зазвичай синхронні компенсатори встановлюють на електричних підстанціях. Їх номінальні напруги 6,6-20 кВ, частота обертання 750 або 1000 об/хв.

Технічні дані синхронних машин:

- **потужність** $S_{\text{НОМ}}$ (для генераторів), потужність механічної енергії на валу $P_{\text{НОМ}}$ (для двигунів);
- **лінійні напруга** $U_{\text{НОМ}}$ і **струм** $I_{\text{НОМ}}$ статора;
- **коефіцієнт потужності** $\cos \varphi_{\text{НОМ}}$;
- **ККД** $\eta_{\text{НОМ}}$;
- **частота** f ;
- **частота обертання** $n_{\text{НОМ}}$ ротора;
- **напруга** $U_{\text{ЗНОМ}}$ і **струм** $I_{\text{ЗНОМ}}$ обмотки збудження.

Розрахунки та побудова характеристик і векторних діаграм значно спрощуються, якщо користуватися відносними значеннями електричних величин. За базові (одичні) величини приймають номінальну потужність $S_{\text{НОМ}}$; номінальну фазну напругу $U_{\text{НОМ Ф}}$; струм збудження I_{30} , при якому в режимі неробочого ходу індукується Е.Р.С. $E_0 = U_{\text{НОМ Ф}}$.

1.3.2. Основні розрахункові формули і рівняння

Швидкість обертання ротора і магнітного поля

$$n = n_1 = n_2 = \frac{60f}{p}, \quad (1.63)$$

де f – частота струму мережі живлення; p – число пар полюсів обмотки машини.

Кутова швидкість обертання ротора і магнітного поля

$$\Omega = \Omega_1 = \Omega_2 = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi f}{p}. \quad (1.64)$$

Діюче значення Е.Р.С., індукованої у фазі обмотки статора,

$$E_0 = 4,44 f W \Phi_0 k_{\text{об}}, \quad (1.65)$$

де W – число витків; Φ_0 – основний магнітний потік; $k_{\text{об}}$ – коефіцієнт обмотки.

Рівняння електричного стану фази статора генератора

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + R\dot{I} + jX_C\dot{I}, \text{ спрощене } \dot{E}_0 = \dot{U} + jX_C\dot{I}, \quad (1.66)$$

де U , I – напруга та струм фази статора;

R , X_C – активний та реактивний опори фази.

Рівняння електричного стану фази статора двигуна

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + R\dot{I} + jX_C\dot{I}, \text{ спрощене } \dot{U} = \dot{E}_0 + jX_C\dot{I} \quad (1.67)$$

Електромагнітна потужність машини

$$P_{\text{ем}} = \frac{3UE_0}{X_C} \sin \theta, \quad P_{\text{емmax}} = \frac{3UE_0}{X_C}, \quad (1.68)$$

де θ – кут розбіжності між магнітними осями основного та результуючого поля (такий самий кут між векторами E_0 та U на векторних діаграмах).

Електромагнітний момент машини

$$M_{\text{ем}} = \frac{P_{\text{ем}}}{\Omega} = \frac{3UE_0}{\Omega X_C} \sin \theta, \quad M_{\text{емmax}} = \frac{3UE_0}{\Omega X_C}. \quad (1.69)$$

Рівняння кутової характеристики

$$P_{\text{ем}} = \frac{3UE_0}{X_C} \sin \theta, \text{ а також } M_{\text{ем}} = \frac{3UE_0}{\Omega X_C} \sin \theta. \quad (1.70)$$

Потужності генератора

Механічна потужність, яка споживається на валу,

$$P_1 = M\Omega = P_{\text{ем}} + P_0, \quad (1.71)$$

де P_0 – втрати потужності за неробочого ходу;

$$P_0 = P_{\text{мех}} + P_{\text{зб}} + P_{\text{1м}},$$

де $P_{\text{мех}}$ - механічні втрати у роторі;

$P_{\text{зб}}$ - втрати на збудження;

$P_{\text{1м}}$ - магнітні втрати у статорі.

Електромагнітна потужність

$$P_{\text{ем}} = \frac{3UE_0}{X_C} \sin \theta.$$

Активна потужність, яка віддається у навантаження,

$$P_2 = 3UI \cos \varphi = P_{\text{ем}} - P_{\text{1e}} \approx \frac{3UE_0}{X_C} \sin \theta, \quad (1.72)$$

де $P_{\text{1e}} = 3RI^2$ - електричні втрати у статорі.

Реактивна потужність, яка віддається у навантаження,

$$Q_2 = 3UI \sin \varphi \approx \frac{3UE_0}{X_C} \cos \theta. \quad (1.73)$$

Повна потужність

$$S_2 = 3UI = \frac{3UE_0}{X_C}. \quad (1.74)$$

ККД генератора

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum P_{\text{ВТР}}}, \quad (1.75)$$

де $\sum P_{\text{ВТР}} = P_0 + P_{\text{1e}}$.

Потужності двигуна

Активна потужність, яка споживається з мережі,

$$P_1 = 3UI \cos \varphi = P_{\text{ем}} + P_{\text{1e}} \approx \frac{3UE_0}{X_C} \sin \theta. \quad (1.76)$$

Реактивна потужність

$$Q = 3UI \sin \varphi \approx \frac{3UE_0}{X_C} \cos \theta. \quad (1.77)$$

Електромагнітна потужність – формула (1.68)

Корисна потужність на валу

$$P_2 = P_{\text{ем}} - P_0 = P_1 - \sum P_{\text{ВТР}}, \quad (1.78)$$

де P_0 - втрати потужності за неробочого ходу,

$$P_0 = P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{ЗБ}} + P_{\text{ІМ}}, \text{ Вт}; \quad \sum P_{\text{ВТР}} = P_0 + P_{\text{Іе}}, \text{ Вт.}$$

ККД двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P_{\text{ВТР}}}{P_1} = 1 - \frac{\sum P_{\text{ВТР}}}{P_1}. \quad (1.79)$$

$$\text{Кратність пускового струму } K_I = I_{\text{ПУС}} / I_{\text{НОМ}}. \quad (1.80)$$

$$\text{Кратність пускового моменту } K_M = M_{\text{ПУС}} / M_{\text{НОМ}}. \quad (1.81)$$

Кратність максимального моменту (перевантажувальна здатність)

$$\lambda = M_{\text{max}} / M_{\text{НОМ}}. \quad (1.82)$$

1.3.3. Типові розв'язані задачі

Задача 1.67. Синхронний генератор має такі паспортні дані: номінальна потужність $S_{\text{НОМ}} = 100$ МВА, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 15,75$ кВ, номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$, номінальна частота обертання $n_{\text{НОМ}} = 3000$ об/хв, синхронний опір $X_C = 3,1$ Ом. У режимі неробочого ходу при $E_0 = U_{\text{НОМ}}$ струм збудження $I_{30} = 294$ А. Визначити струм, активну і реактивну потужності; коефіцієнт потужності при струмі збудження $I_3 = 500$ А і моменті на валу $M = 150000$ Н·м.

Розв'язання. Вважаємо, що характеристика намагнічування машини лінійна, тому ЕРС збудження E_0 пропорційна струму збудження. У заданому режимі E_0 визначаємо, склавши пропорцію

$$\frac{E_0}{U} = \frac{I_3}{I_{30}},$$

звідки

$$E_0 = \frac{UI_3}{I_{30}} = \frac{U_{\text{НОМ}}I_3}{\sqrt{3}I_{30}} = \frac{15,75 \cdot 500}{\sqrt{3} \cdot 294} = 15,46 \text{ кВ.}$$

Кут розбіжності θ обчислюємо з рівняння кутової характеристики (1.70), розрахувавши спочатку кутову швидкість обертання ротора і номінальну напругу на фазі статора:

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} = 2\pi \cdot \frac{3000}{60} = 314 \text{ рад/с;}$$

$$U = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} = \frac{15,75}{\sqrt{3}} = 9,1 \text{ кВ;}$$

$$\sin \theta = \frac{M\Omega X_C}{3UE_0} = \frac{150 \cdot 10^3 \cdot 314 \cdot 3,1}{3 \cdot 9,1 \cdot 10^3 \cdot 15,46 \cdot 10^3} = 0,346, \text{ звідки } \theta = 20^\circ.$$

Струм у фазі статора знаходимо за допомогою спрощеної векторної діаграми (рис. 1.21), яку будуємо у такій послідовності:

1) вибираємо масштаб напруг і відкладаємо вектор фазної напруги \dot{U} ;

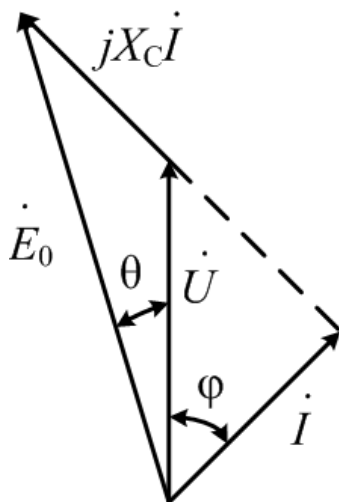


Рис. 1.21

2) під кутом $\theta = 20^\circ$ до вектора \dot{U} будуємо вектор \dot{E}_0 , зберігаючи вибраний масштаб напруг;

3) з'єднавши кінці векторів \dot{U} та \dot{E}_0 , отримуємо вектор напруги $jX_C \dot{I}$.

За відомим масштабом напруг обчислюємо значення $X_C I = 7,5$ кВ.

Розраховуємо струм фази статора:

$$I = \frac{X_C I}{X_C} = \frac{7,5 \cdot 10^3}{3,1} = 2,42 \text{ кА.}$$

Визначаємо електромагнітну потужність генератора (1.69):

$$P_{\text{ем}} = \Omega M = 314 \cdot 150 \cdot 10^3 = 2,42 \text{ кВт.}$$

Нехтуємо малими електричними втратами в обмотках статора і вважаємо, що активна потужність $P_2 = P_{\text{ем}} = 2,42$ кВт. Скориставшись формулою

$P_2 = 3UI \cos \varphi$, знаходимо коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi = \frac{P_2}{3UI} = \frac{47,1 \cdot 10^6}{3 \cdot 9,1 \cdot 2,42 \cdot 10^3} = 0,73, \quad \varphi = 44^\circ.$$

Реактивна потужність генератора

$$Q = 3UI \sin \varphi = 3 \cdot 9,1 \cdot 2,42 \cdot 0,7 = 46,2 \text{ МВАр.}$$

Задача 1.68. Синхронний генератор підключений до шин електростанції з напругою $U_{\text{НОМ}} = 10,5$ кВ і розвиває активну потужність $P_2 = 35 \cdot 10^3$ кВт. Частота обертання ротора $n = 3000$ об/хв, синхронний опір машини $X_C = 3,2$ Ом. Зміною струму збудження коефіцієнт потужності спочатку був встановлений рівним одиниці, а потім 0,7 при індуктивному характері струму статора.

Побудувати векторні діаграми і кутові характеристики для обох режимів роботи. Визначити реактивну потужність, яку генератор віддає у мережу.

Розв'язання. Аналізуємо перший режим, в якому генератор працює з коефіцієнтом потужності $\cos \varphi = 1$.

Струм у фазі статора визначаємо, скориставшись формулою (1.72):

$$I = \frac{P_2}{3U_{\text{Л}} \cos \varphi} = \frac{P_2}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}} \cos \varphi} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 10^3 \cdot 1} = 1,92 \text{ кА.}$$

Значення Е.Р.С. збудження E_0 знаходимо за допомогою векторної діаграми (рис. 1.22,а). Оскільки у цьому режимі напруга і струм збігаються за фазою, то на векторній діаграмі вектори фазної напруги \dot{U} та напруги $jX_C \dot{I}$ взаємно перпендикулярні.

$$U = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} = \frac{10,5}{\sqrt{3}} = 6,06 \text{ кВ}, \quad X_C I = 3,2 \cdot 1,92 = 6,14 \text{ Ом,}$$

$$E_0 = \sqrt{U^2 + (X_C I)^2} = \sqrt{6,06^2 + 6,14^2} = 8,63 \text{ кВ,}$$

$$\sin \theta = \frac{X_C I}{E_0} = \frac{6,14}{8,63} = 0,711, \quad \theta = 45^\circ.$$

Обчислюємо максимальний електромагнітний момент за формулою (1.69), розрахувавши спочатку кутову швидкість обертання ротора:

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} = 2\pi \cdot \frac{3000}{60} = 314^\circ \text{ рад/с;}$$

$$M_{\text{max}} = \frac{3E_0 U}{X_C \Omega} = \frac{3 \cdot 8,63 \cdot 10^3 \cdot 6,06 \cdot 10^3}{3,2 \cdot 314} = 156 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

За відомою амплітудою будемо кутову характеристику $M = 156 \cdot 10^3 \sin \theta$ (рис. 1.23, крива 1), і на ній відмічаємо точку a , для якої $\theta = 45^\circ$. Реактивна потужність Q при $\cos \varphi = 1$ дорівнює нулю.

Розглядаємо режим генератора, коли коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 0,7$ (відповідний кут $\varphi = 45^\circ$).

Обчислюємо струм статора (1.72):

$$I = \frac{P_2}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}} \cos \varphi} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 10^3 \cdot 0,7} = 2,75 \text{ кА.}$$

Для визначення ЕРС E_0 будуємо векторну діаграму (рис. 1.22, б) у такій послідовності:

1) вибираємо масштаб напруг і відкладаємо вектор фазної напруги \dot{U} ($U = 6,06 \text{ кВ}$);

2) вибираємо масштаб струмів і під кутом 45° до вектора \dot{U} у бік відставання будуємо вектор струму \dot{I} ($I = 2,75 \text{ кА}$);

3) до вектора \dot{U} прибудовуємо перпендикулярно вектору \dot{I} вектор $jX_C \dot{I}$ у вибраному масштабі напруг;

4) позначаємо вектор $\dot{E}_0 = \dot{U} + jX_C \dot{I}$.

За відомою довжиною вектора E_0 і масштабом напруг знаходимо величину $E_0 = 13,8 \text{ кВ}$.

Обчислюємо максимальне значення електромагнітного моменту (1.69):

$$M_{\text{max}} = \frac{3UE_0}{\Omega X_C} = \frac{3 \cdot 13,8 \cdot 10^3 \cdot 6,06 \cdot 10^3}{3,2 \cdot 314} = 250 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Будуємо кутову характеристику $M = 250 \cdot 10^3 \sin \theta$ (крива 2 на рис. 1.23). Кут θ можна визначити з векторної діаграми або скориставшись формулою $P_{\text{ем}} = \Omega M$. Нехтуючи малими електричними втратами в

обмотках статора, вважаємо $P_{ем} \approx P_2$, тоді $P_2 = \Omega M_{max} \sin \theta$, звідки

$$\sin \theta = \frac{P_2}{\Omega M_{max}} = \frac{35 \cdot 10^6}{314 \cdot 250 \cdot 10^3} = 0,44, \quad \theta \approx 26,5^\circ.$$

На кутовій характеристиці 2 відмічаємо робочу точку b , яка відповідає $\theta \approx 26,5^\circ$.

Обчислюємо реактивну потужність, яку генератор віддає у мережу:

$$Q = 3UI \sin \varphi = 3 \cdot 6,06 \cdot 10^3 \cdot 2,74 \cdot 10^3 \cdot 0,71 = 35,4 \text{ МВАр.}$$

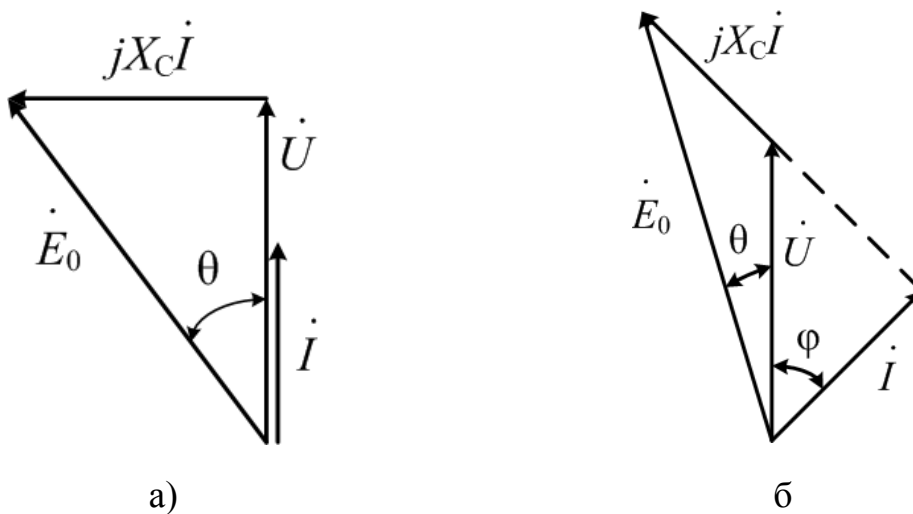


Рис. 1.22

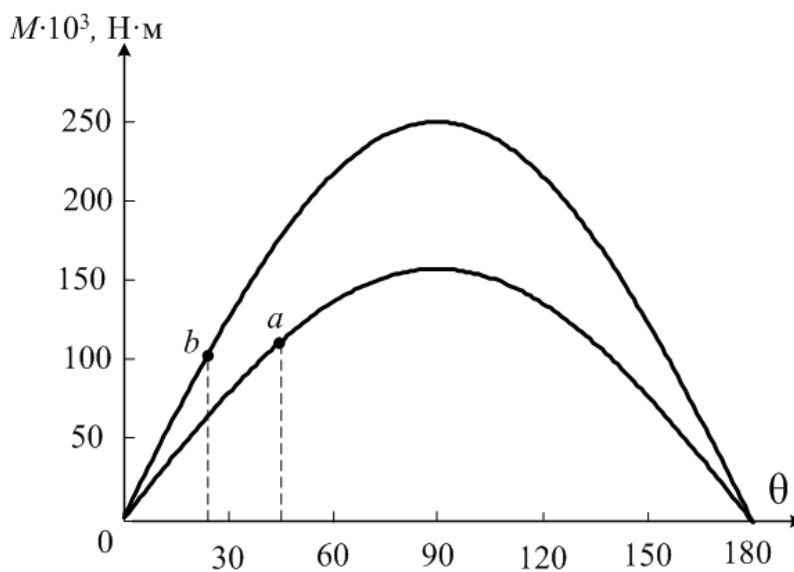


Рис. 1.23

Задача 1.69 Синхронний генератор, який працює паралельно з мережею, має такі номінальні дані: потужність $S_{\text{НОМ}} = 3,75$ МВА, напруга $U_{\text{НОМ}} = 6,3$ кВ, коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,8$, струм збудження у відносних одиницях $I_{\text{ЗНОМ}}^* = 1,94$, синхронний опір $X_C = 16,2$ Ом. Визначити кутову характеристику генератора і кут $\theta_{\text{НОМ}}$. Проаналізувати, як зміниться кут $\theta_{\text{НОМ}}$ у таких випадках: 1) при номінальному струмі збудження обертовий момент на валу генератора зменшиться у два рази; 2) при номінальній потужності струм збудження зменшиться до $I_3^* = 0,75 I_{\text{ЗНОМ}}^*$.

Роз'язання. Номінальна активна потужність, яка віддається генератором у мережу,

$$P_{2\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 3,75 \cdot 0,8 = 3 \text{ МВт.}$$

Номінальна напруга на фазі статора

$$U_{\text{НОМФ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} = 3,64 \text{ кВ.}$$

Для визначення ЕРС збудження $E_{0\text{НОМ}}$ використовуємо спрямлену характеристику неробочого ходу (характеристику намагнічування),

побудовану у відносних одиницях $I_3^* = \frac{I_3}{I_{\text{ЗНОМ}}}$, $E_0^* = \frac{E_0}{U_{\text{НОМФ}}}$ (рис. 1.24).

На вказаній характеристиці струму збудження $I_{\text{ЗНОМ}}^* = 1,94$ відповідає

$E_{0\text{НОМ}}^* = 2,25$ або в абсолютних одиницях

$$E_{0\text{НОМ}} = 2,25 \cdot 3,64 = 8,19 \text{ кВ.}$$

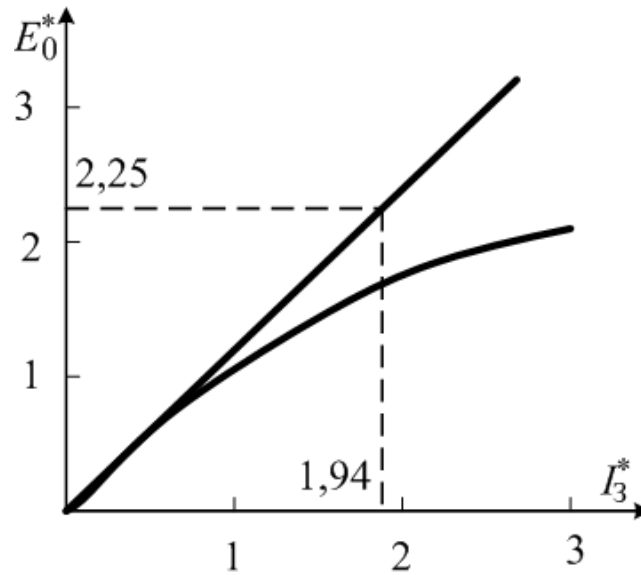


Рис. 1.24

Рівняння кутової характеристики (1.70)

$$P_{\text{емном}} = \frac{3U_{\text{номф}}E_{0\text{ном}}}{X_C} \cdot \sin \theta_{\text{ном}} =$$

$$= \frac{3 \cdot 3,64 \cdot 10^3 \cdot 8,19 \cdot 10^3}{16,2} \cdot \sin \theta_{\text{ном}} = 5,52 \cdot 10^6 \sin \theta_{\text{ном}}.$$

Нехтуючи малими електричними втратами в обмотках статора, вважаємо, що $P_{\text{емном}} = P_{2\text{ном}}$, тоді

$$\sin \theta_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{емном}}}{5,52 \cdot 10^6} = \frac{P_{2\text{ном}}}{5,52 \cdot 10^6} = \frac{3 \cdot 10^6}{5,52 \cdot 10^6} = 0,5434, \quad \theta_{\text{ном}} = 33^\circ.$$

Зменшення вдвічі обертового моменту M на валу генератора призводить до зменшення у два рази механічної потужності P_1 на валу. Якщо не враховувати втрати потужності в машині, то споживана генератором потужність на валу P_1 дорівнює активній потужності P_2 , яку він віддає у мережу. Таким чином, у досліджувальному режимі

$$P_2 = \frac{P_1}{2} = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{2} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Тоді

$$\sin \theta_1 = \frac{1,5 \cdot 10^6}{5,52 \cdot 10^6} = 0,2717, \quad \theta_1 = 15,8^\circ .$$

У разі зменшення струму збудження до значення $I_3^* = 0,75I_{3\text{НОМ}}^*$, відбувається пропорційне зменшення Е.Р.С. збудження до значення $E_0 = 0,75E_{0\text{НОМ}}$. За номінальної потужності $P_{2\text{НОМ}}$

$$\sin \theta_2 = \frac{3 \cdot 10^6}{0,75 \cdot 5,52 \cdot 10^6} = 0,7246, \quad \theta_2 = 46,5^\circ .$$

Задача 1.70. Для шестиполусного синхронного двигуна відомі такі паспортні дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 990$ кВт, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 6$ кВ, частота мережі $f = 50$ Гц, коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,8$ ($\varphi < 0$), синхронний опір $X_C = 42$ Ом, кратність пускового струму $K_I = 6,4$, кратність пускового моменту $K_M = 0,9$, кратність максимального моменту $\lambda = 2,2$.

Визначити:

- номінальну кутову швидкість обертання ротора;
- номінальний, пусковий і максимальний обертовий моменти;
- кут θ у номінальному режимі;
- номінальний і пусковий струми;
- активну та реактивну потужності, які споживає двигун при номінальному навантаженні;
- ККД двигуна у номінальному режимі.

Побудувати кутову характеристику двигуна та спрощену векторну діаграму для номінального режиму без урахування насичення магнітної системи машини.

Розв'язання. Частота обертання магнітного поля і ротора (1.63):

$$n_{\text{НОМ}} = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.}$$

Номінальна кутова швидкість обертання ротора (1.64)

$$\Omega_{\text{НОМ}} = \frac{2\pi n_{\text{НОМ}}}{60} = 105 \text{ рад/с.}$$

Обертові моменти (1.69), (1.80), (1.82):

$$\text{Номінальний } M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\Omega_{\text{НОМ}}} = \frac{990 \cdot 10^3}{105} = 9,43 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$\text{Пусковий } M_{\text{ПУС}} = K_M \cdot M_{\text{НОМ}} = 0,9 \cdot 9,43 \cdot 10^3 = 8,5 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

максимальний

$$M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_{\text{НОМ}} = 2,2 \cdot 9,43 \cdot 10^3 = 20,75 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

За рівнянням $M = M_{\text{max}} \sin \theta = 20,75 \cdot 10^3 \sin \theta$ будемо кутову характеристику (рис. 1.25).

При номінальному навантаженні

$$\sin \theta_{\text{НОМ}} = \frac{M_{\text{НОМ}}}{M_{\text{max}}} = \frac{9,43 \cdot 10^3}{20,75 \cdot 10^3} = 0,45, \quad \theta_{\text{НОМ}} = 27^\circ.$$

Номінальний струм статора визначаємо за допомогою векторної діаграми, яку будемо за рівнянням електричного стану фази статора

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + jX_C \dot{I}.$$

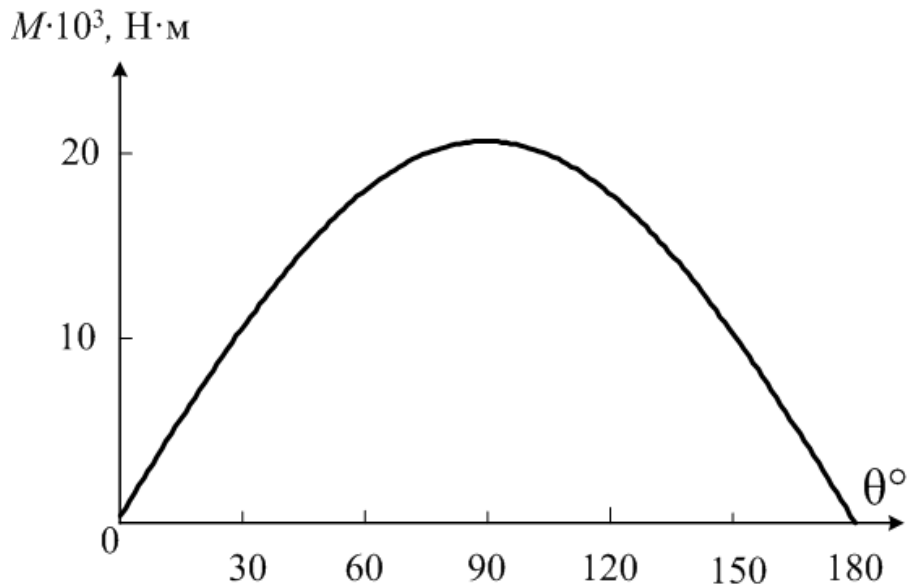


Рис. 1.25

У номінальному режимі напруга на фазі

$$U_{\text{НОМФ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} = \frac{6}{\sqrt{3}} = 3,46 \text{ кВ.}$$

Е.Р.С. збудження E_0 обчислюємо з рівняння кутової характеристики (1.70):

$$E_{0\text{НОМ}} = \frac{M_{\text{НОМ}} \Omega_{\text{НОМ}} X_C}{3U_{\text{НОМФ}} \sin \theta_{\text{НОМ}}} = \frac{9,43 \cdot 10^3 \cdot 105 \cdot 42}{3 \cdot 3,46 \cdot 0,45} = 8,8 \text{ кВ.}$$

За відомими значеннями U , E_0 , θ , $\varphi = \arccos 0,8 = 37^\circ$ будемо векторну діаграму для номінального режиму роботи (рис. 1.26) і знаходимо кут $\theta_{\text{НОМ}} = 27^\circ$.

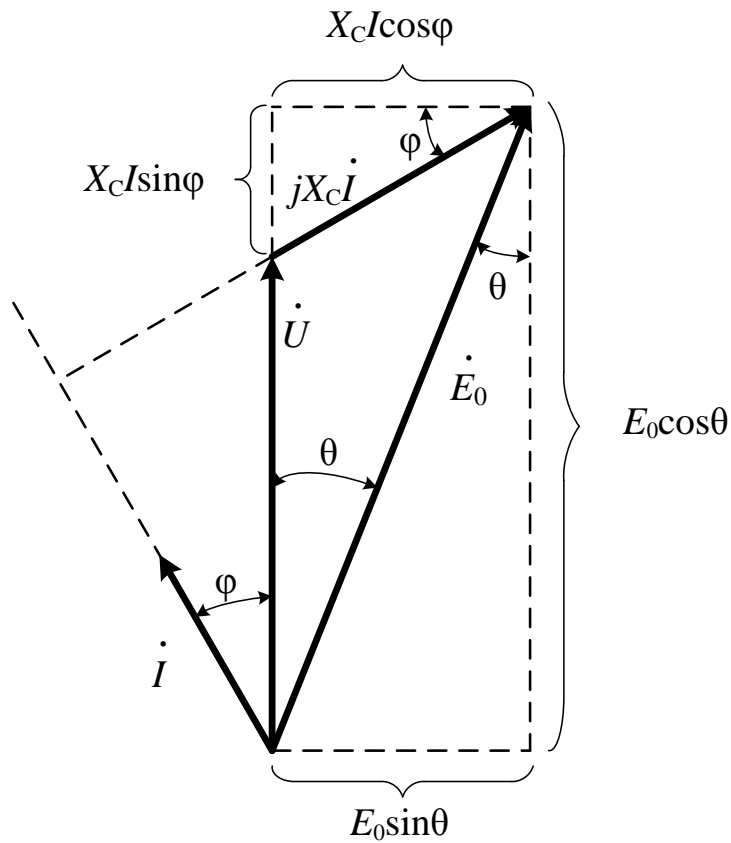


Рис. 1.26

Скориставшись діаграмою, розрахуємо:

$$E_{0\text{НОМ}} \sin \theta_{\text{НОМ}} = 8,8 \cdot 10^3 \cdot 0,45 = 4 \cdot 10^3 \text{ В};$$

$$E_{0\text{НОМ}} \cos \theta_{\text{НОМ}} = 8,8 \cdot 10^3 \cdot 0,89 = 7,83 \cdot 10^3 \text{ В};$$

$$E_{0\text{НОМ}} \cos \theta_{\text{НОМ}} - U_{\text{НОМ}\Phi} = 7,83 \cdot 10^3 - 3,46 \cdot 10^3 = 4,37 \cdot 10^3 \text{ В};$$

$$\begin{aligned} X_C I_{0\text{НОМ}} &= \sqrt{(E_{0\text{НОМ}} \sin \theta_{\text{НОМ}})^2 + (E_{0\text{НОМ}} \cos \theta_{\text{НОМ}} - U_{\text{НОМ}\Phi})^2} = \\ &= 5,94 \cdot 10^3 \text{ В}; \end{aligned}$$

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{X_C I_{0\text{НОМ}}}{X_C} = 141,4 \text{ А.}$$

Пусковой струм

$$I_{\text{ПУС}} = K_I I_{\text{НОМ}} = 6,4 \cdot 141,4 = 905 \text{ А.}$$

Потужності, які споживає двигун при номінальному навантаженні:

активна

$$P_{\text{НОМ}} = 3U_{\text{НОМФ}} I_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 3 \cdot 3,46 \cdot 10^3 \cdot 141,4 \cdot 0,8 = 1176 \text{ кВт};$$

реактивна

$$Q_{\text{НОМ}} = 3U_{\text{НОМФ}} I_{\text{НОМ}} \sin \varphi_{\text{НОМ}} = 3 \cdot 3,46 \cdot 10^3 \cdot 141,4 \cdot 0,6 = 880 \text{ кВАр.}$$

$$\text{ККД } \eta_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{P_{\text{НОМ}}} = \frac{990}{1176} = 0,842.$$

Задача 1.71. Для шестиполусного синхронного двигуна відомі такі паспортні дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 2700$ кВт, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 6$ кВ, номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,8$, номінальний ККД $\eta_{\text{НОМ}} = 0,96$. Синхронний опір фази двигуна $X_C = 16$ Ом. Як зміниться режим роботи двигуна (кут θ , швидкість обертання, струм статора) у випадку зменшення напруги живлення на 25% відносно номінальної напруги?

Розв'язання. Обчислюємо частоту обертання n ротора, лінійний струм I статора, кут θ у випадку, коли напруга живлення відповідає номінальній напрузі двигуна $U_{\text{НОМ}} = 6$ кВ.

$$n = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.}$$

Активна потужність, яку споживає двигун з мережі,

$$P_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{2700}{0,96} = 2812 \text{ кВт.}$$

Номинальна напруга на фазі статора

$$U_{\text{НОМФ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} = \frac{6}{\sqrt{3}} = 3,46 \text{ кВ.}$$

Струм у фазі статора обчислюємо, скориставшись (1.76):

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{3U_{\text{НОМФ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}}} = \frac{2812 \cdot 10^3}{10^3 \cdot 0,8} = 338 \text{ А.}$$

Кут $\theta_{\text{НОМ}}$ визначаємо за допомогою спрощеної векторної діаграми, побудованої для номінальних значень (рис. 1.27), зробивши такі розрахунки:

$$X_C I = 16 \cdot 338 = 5,4 \text{ кВ;}$$

$$X_C I_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 4,32 \text{ кВ;}$$

$$X_C I_{\text{НОМ}} \sin \varphi_{\text{НОМ}} = 3,24 \text{ кВ;}$$

$$E_{\text{ОНОМ}} = \sqrt{(X_C I_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}})^2 + (X_C I_{\text{НОМ}} \sin \varphi_{\text{НОМ}} + U_{\text{НОМ}})^2} = 7,97 \text{ кВ;}$$

$$E_{\text{ОНОМ}} \sin \theta_{\text{НОМ}} = X_C I_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 4,32 \text{ кВ;}$$

$$\sin \theta_{\text{НОМ}} = \frac{X_C I_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}}}{E_{\text{ОНОМ}}} = \frac{4,32}{7,97} = 0,542;$$

$$\theta_{\text{НОМ}} = \arcsin 0,542 = 32,8^\circ.$$

Розглянемо режим роботи двигуна у випадку, коли напруга живлення зменшилася на 25 % і складає $0,75 \cdot 6 = 4,5$ кВ. Відповідно напруга на фазі

обмотки статора $U = \frac{4,5}{\sqrt{3}} = 2,6$ кВ. Швидкість обертання ротора

$n = 1000$ об/хв залишається незмінною. Зберігається також величина

Е.Р.С. E_0 , оскільки вона визначається тільки струмом збудження. Аналізуємо як зміниться кут неузгодженості θ , беручи до уваги, що за незмінної потужності навантаження двигун споживає одну і ту саму потужність $P_1 = 2812$ кВт. Якщо знехтувати малими електричними втратами в обмотках статора, то

$$P_1 \approx P_{\text{ем}} = \frac{3UE_0}{X_C},$$

звідки

$$\sin \theta = \frac{P_1 X_C}{3UE_0} = \frac{2812 \cdot 10^3 \cdot 16}{3 \cdot 7,97 \cdot 10^3 \cdot 2,6 \cdot 10^3} = 0,722;$$

$$\theta_{\text{НОМ}} = \arcsin 0,722 \approx 46^\circ.$$

Скориставшись векторною діаграмою на рис. 1.27, складаємо два рівняння для знаходження φ, I :

$$\begin{cases} X_C I \sin \varphi = E_0 \cos \theta - U; \\ X_C I \cos \varphi = E_0 \sin \theta, \end{cases}$$

звідки

$$\text{tg} \varphi = \frac{E_0 \cos \theta - U}{E_0 \sin \theta} = \frac{7,97 \cdot 10^3 \cdot 0,6947 - 2,6 \cdot 10^3}{7,97 \cdot 10^3 \cdot 0,722} = 0,51;$$

$$\varphi = \arctg 0,51 = 27^\circ;$$

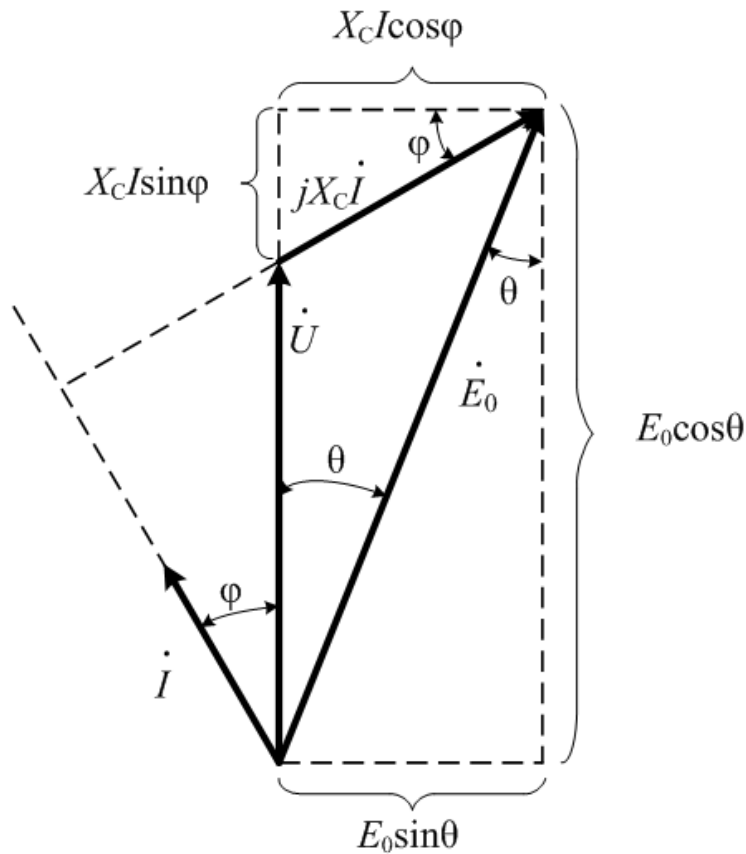


Рис. 1.27

$$I = \frac{E_0 \sin \theta}{X_C \cos \varphi} = \frac{5754,3}{16 \cdot 0,8902} = 404 \text{ А.}$$

Висновок: у разі зниження напруги живлення кут θ і струм ротора I зростають, а кут зсуву фаз φ між струмом статора і вхідною напругою зменшується; відповідно зростає коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ двигуна, але зменшується запас стійкості роботи.

Задача 1.72. Для трифазного синхронного двигуна відомі: номінальна потужність, яку споживає двигун $P_{\text{НОМ}} = 4000$ кВт, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 6$ кВт, номінальний струм $I_{\text{НОМ}} = 443$ А, число полюсів $2p = 2$, синхронний опір $X_C = 9,75$ Ом. При струмі збудження $I_3 = I_{30}$ Е.Р.С.,

індукована у фазі статора, дорівнює напрузі $E_0 = U$. Двигун працює з номінальним моментом $M_{\text{НОМ}}$. Побудувати кутові характеристики та векторні діаграми для двох режимів збудження:

- 1) струм збудження $I_{31} = 1,4I_{30}$;
- 2) струм збудження збільшили і коефіцієнт потужності двигуна став рівним 0,9 при випереджаючому характері струму.

Розв'язання. Кутова швидкість обертання ротора

$$\Omega_{\text{НОМ}} = \frac{2\pi f}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{1} = 314 \text{ рад/с.}$$

Обертний момент за номінального навантаження

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\Omega_{\text{НОМ}}} = \frac{4 \cdot 10^6}{314} = 12,7 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Номінальна напруга на фазі статора

$$U = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} = \frac{6}{\sqrt{3}} = 3,46 \text{ кВ.}$$

Кут розбіжності можна визначити з рівняння кутової характеристики (1.70):

$$\sin \theta = \frac{M\Omega X_c}{3UE_0}.$$

В останній формулі від струму збудження залежить тільки Е.Р.С. E_0 . Якщо знехтувати насиченням і вважати характеристику намагнічування машини лінійною, то величина E_0 пропорційна струму збудження I_3 .

У першому режимі $I_{31} = 1,4I_{30}$, відповідно

$$E_{01} = 1,4U = 1,4 \cdot 3,46 = 4,85 \text{ кВ;}$$

$$\sin \theta_1 = \frac{12,7 \cdot 10^3 \cdot 3,14 \cdot 9,75}{3 \cdot 3,46 \cdot 10^3 \cdot 4,85 \cdot 10^3} = 0,77, \quad \theta_1 = 50,35^\circ.$$

$$M_{max1} = \frac{M_{НОМ}}{\sin \theta_1} = \frac{12,7 \cdot 10^3}{0,77} = 16,5 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Кутова характеристика $M = 16,5 \cdot 10^3 \sin \theta$ розглянутого режиму показана на рис. 1.28 (крива 1). На ній відмічено робочу точку a , яка відповідає заданому моменту навантаження на валу.

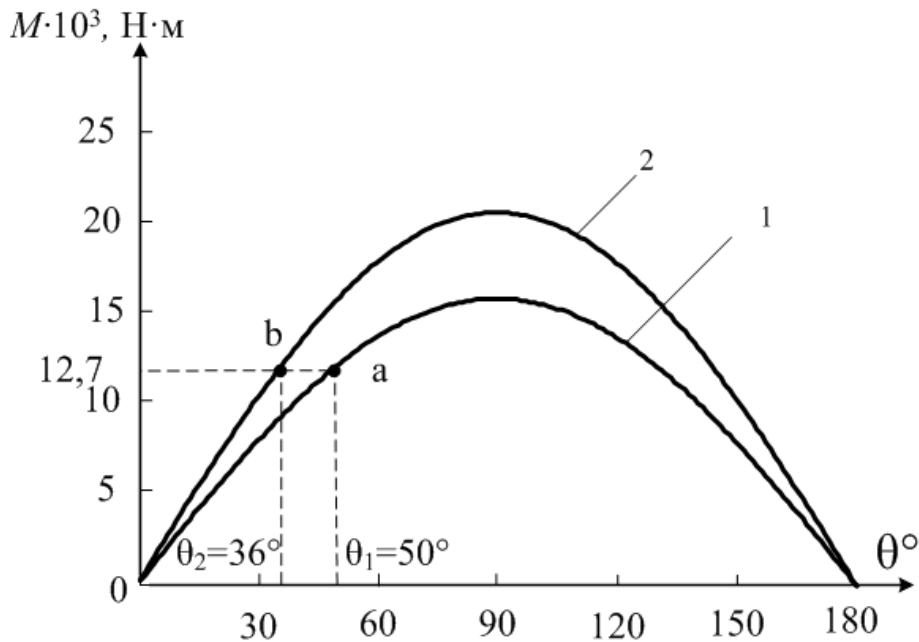


Рис. 1.28

Векторну діаграму (рис. 1.29) будемо у такій послідовності:

- 1) вибираємо масштаб напруг і відкладаємо вертикально вектор напруги \dot{U} на фазі обмотки статора;
- 2) під кутом $\theta_1 = 50^\circ$ до вектора \dot{U} відкладаємо вектор \dot{E}_{01} , зберігаючи вибраний масштаб напруг;

- 3) з'єднавши кінці векторів \dot{U} та \dot{E}_{01} , отримуємо вектор напруги $jX_C \dot{I}_1$;
- 4) оскільки довжина вектора $jX_C \dot{I}_1$ і масштаб напруг відомі, розраховуємо струм в обмотці статора $I_1 = \frac{X_C I}{X_C} = 336 \text{ А}$;
- 5) вибираємо масштаб струмів і відкладаємо вектор струму \dot{I}_1 перпендикулярно до вектора $jX_C \dot{I}_1$.

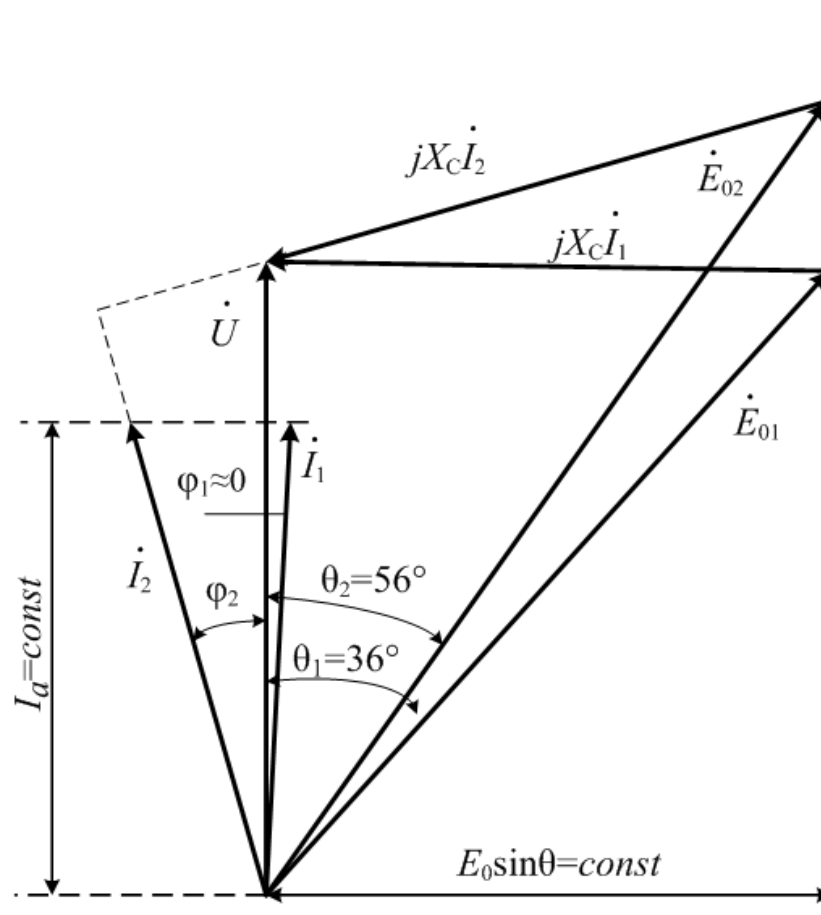


Рис. 1.29

З діаграми видно, що кут $\varphi_1 \approx 0$, а коефіцієнт потужності $\cos \varphi_1 \approx 1$.

У другому режимі збудження $\cos \varphi_2 = 0,9$ (ємн.). За незмінного моменту навантаження активна потужність, споживана двигуном, також постійна $P_1 = P_{\text{НОМ}} = 4000$ кВт. З формули $P_1 = 3UI \cos \varphi$ видно, що у випадку $U = \text{const}$, $P_1 = \text{const}$ зберігається незмінною активна складова струму статора $I_a = I \cos \varphi$, тому

$$I_1 \cos \varphi_1 = I_2 \cos \varphi_2 = \frac{P_1}{3U}.$$

Розраховуємо струм I_2 :

$$I_2 = \frac{P_1}{3U \cos \varphi_2} = \frac{4000 \cdot 10^3}{3 \cdot 3,46 \cdot 10^3 \cdot 0,9} = 428 \text{ А.}$$

Е.Р.С. E_{02} знаходимо за допомогою векторної діаграми (рис. 1.29), порядок побудови якої дещо змінюється:

1) під кутом $\varphi_2 = \arccos 0,9 = 26^\circ$ до вектора \dot{U} відкладаємо вектор струму \dot{I}_2 ;

2) перпендикулярно до вектора \dot{I}_2 проводимо вектор напруги $jX_C \dot{I}_2$, довжина якого у вибраному масштабі дорівнює $9,75 \cdot 426 = 4,173$ кВ;

3) графічно визначаємо $E_{02} = 6,33$ кВ.

Кут θ можна знайти з векторної діаграми, або з рівняння кутової характеристики (1.70):

$$\sin \theta_2 = \frac{M_{\text{НОМ}} \Omega_{\text{НОМ}} X_C}{3UE_0} = \frac{12,7 \cdot 10^3 \cdot 314 \cdot 9,75}{3 \cdot 3,46 \cdot 10^3 \cdot 6,33 \cdot 10^3} = 0,5917, \quad \theta_2 = 36^\circ.$$

Для побудови кутової характеристики у цьому режимі обчислюємо максимальне значення моменту:

$$M_{max2} = \frac{M_{НОМ}}{\sin \theta_2} = \frac{12,7 \cdot 10^3}{0,5917} = 21,46 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Характеристику $M = 21,46 \cdot 10^3 \sin \theta$ зображено на рис. 1.28 (крива 2); точка b на характеристиці відповідає заданому моменту навантаження.

Задача 1.73. На підприємстві встановлені асинхронні двигуни, середню потужність і $\cos \varphi$ яких вказано у таблиці 1.11.

Проектується встановлення ще одного електропривода, для якого передбачається використання синхронного двигуна з такими паспортними даними: номінальна потужність $P_{НОМ} = 160$ кВт, номінальна напруга $U_{НОМ} = 380$ В, номінальна частота обертання ротора $n_{НОМ} = 1000$ об/хв, номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{НОМ} = 0,8$ (випердж). Визначити коефіцієнт потужності та струм, споживаний підприємством до і після підключення синхронного двигуна, який буде працювати у номінальному режимі.

Таблиця 1.11

№	Кількість двигунів	Середня потужність споживана одним двигуном, P , кВт	$\cos \varphi$
1	20	0,95	0,76
2	24	0,82	0,45
3	32	0,45	0,48
4	8	4,0	0,75
5	20	0,6	0,68
6	12	0,59	0,58

7	7	4,85	0,77
---	---	------	------

Розв'язання. Розраховуємо активну та реактивну потужності усіх асинхронних двигунів (табл.1.12)

Таблиця 1.12

N	1	2	3	4	5	6	7	Сумарна P , кВт потужність
P , кВт	19	19,7	14,4	32	12	7,1	19,4	$P_1 = 124$
Q , кВАр	16,2	38,8	26	28,4	13	10	16,1	$Q_1 = 149$

Потужності синхронного двигуна: активна $P_{\text{НОМ}} = 160$ кВт, реактивна

$$Q_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{НОМ}} = 160 \cdot 0,75 = 120 \text{ кВАр.}$$

Сумарна потужність усього навантаження після підключення синхронного двигуна

$$P = 124 + 160 = 284 \text{ кВт; } Q = 149 - 120 = 29 \text{ кВАр.}$$

Коефіцієнт потужності навантаження:

до встановлення синхронного двигуна

$$\cos \varphi_1 = \frac{124}{\sqrt{124^2 + 149^2}} = 0,66;$$

після підключення синхронного двигуна

$$\cos \varphi_2 = \frac{284}{\sqrt{284^2 + 29^2}} = 0,995.$$

Струм навантаження:

до встановлення синхронного двигуна

$$I_1 = \frac{S_1}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}} = \frac{\sqrt{124^2 + 149^2}}{\sqrt{3} \cdot 380} = 294 \text{ А;}$$

після підключення синхронного двигуна

$$I_2 = \frac{\sqrt{284^2 + 29^2}}{\sqrt{3} \cdot 380} = 432 \text{ А.}$$

Висновок: у випадку збільшення активної потужності навантаження у

$\frac{284}{124} = 2,3$ рази струм навантаження збільшиться тільки у

$\frac{432}{294} = 1,47$ разів.

1.3.4. Задачі для самостійного розв'язання

1.74. Синхронний генератор має такі паспортні дані: потужність $S_{\text{НОМ}} = 500$ кВА, напруга $U_{\text{НОМ}} = 6,3$ кВ, коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$, $\eta_{\text{НОМ}} = 92,4\%$. Обчислити активну потужність; сумарні втрати та струм синхронного генератора при номінальному навантаженні.

1.75. Синхронний генератор з номінальною потужністю $S_{\text{НОМ}} = 250$ МВА і номінальною напругою $U_{\text{НОМ}} = 15,75$ кВ вмикається на паралельну роботу з мережею. Синхронний опір фази статора $X_C = 1,94$ Ом. Визначити струм статора в момент ввімкнення, якщо $E_0 = U$, але зсунути за фазою на кут $\alpha = 200^\circ$. При якому зсуві фаз струм статора буде максимальним? Яке значення максимального струму?

1.76. Синхронний генератор з номінальною потужністю $S_{\text{НОМ}} = 31,25$ МВА і напругою $U_{\text{НОМ}} = 10,5$ кВ працює паралельно з мережею при струмі збудження $I_3 = 335$ А. Струм збудження, який відповідає номінальній напрузі у режимі неробочого ходу $I_{30} = 175$ А.

Синхронний опір фази статора $X_C = 15,5$ Ом. Скориставшись нормальною характеристикою неробочого ходу, розрахувати і побудувати кутову характеристику генератора.

1.77. Номінальна потужність синхронного генератора $S_{\text{НОМ}} = 1,25$ МВА, номінальна активна потужність $P_{\text{НОМ}} = 1$ МВт, відносне значення синхронного опору $X_C^* = 1,66$, Е.Р.С. збудження за номінального струму збудження $E_{0\text{НОМ}}^* = 2,4$. Визначити кутову характеристику генератора та кут θ у номінальному режимі.

1.78. Синхронний генератор має такі паспортні дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 500$ МВт, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 15,75$ кВ, $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,85$, $\eta_{\text{НОМ}} = 98,2\%$, швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 938$ об/хв. Обчислити число пар полюсів, обертовий момент, струм генератора.

1.79. Шестиполіусний синхронний двигун має такі паспортні дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 6,3$ МВт, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 6$ кВ, частота $f = 50$ Гц, $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$ ($\varphi < 0$), $\eta_{\text{НОМ}} = 97,1\%$. Розрахувати частоту обертання ротора; номінальний обертовий момент; струм статора; активну та реактивну потужності.

1.80. Для синхронного двигуна відомі такі дані: число полюсів $p = 8$, номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 2$ МВт, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 6$ кВ, $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$ ($\varphi < 0$), частота $f = 50$ Гц, кратність максимального моменту $\lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}} = 2$, синхронний опір фази $X_C = 14,4$ Ом.

Визначити кутову частоту обертання ротора; номінальний і максимальний обертові моменти; кут навантаження у номінальному режимі.

1.81. Синхронний двигун має такі паспортні дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 1$ МВт, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 6$ кВ, номінальний ККД $\eta_{\text{НОМ}} = 95,2\%$, $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$ ($\varphi < 0$), кратність пускового струму $K_I = 6,4$, кратність пускового моменту $K_M = 0,95$, кратність максимального моменту $\lambda = 2$, число пар полюсів $2p = 6$, частота мережі $f = 50$ Гц. Обмотка статора з'єднана зіркою. Обчислити кутову частоту обертання ротора; номінальний і пусковий струми; кут θ ; Е.Р.С. збудження у номінальному режимі. Насиченням магнітної системи машини можна знехтувати.

1.82. Трифазний синхронний двигун, обмотки якого з'єднанні зіркою, ввімкнений у мережу з напругою $U = 11$ кВ і споживає струм $I = 60$ А. Активний опір фази $R = 1$ Ом, синхронний опір $X_C = 1,94$ Ом. Двигун працює з коефіцієнтом потужності $\cos \varphi = 0,8$. Визначити потужність, яку споживає двигун і Е.Р.С. збудження.

1.83. Для синхронного двигуна відомі такі дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 75$ кВт, частота мережі $f = 50$ Гц, кратність максимального моменту $\lambda = 1,65$. Машина має нормальну характеристику неробочого ходу. Розрахувати максимальний обертовий момент за якого двигун утримується у синхронізмі.

1.3.5. Завдання на індивідуальну розрахунково-графічну роботу

Технічні дані синхронних двигунів серії СДН з номінальною напругою $U_{\text{НОМ}} = 6$ кВ та $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$ ($\varphi < 0$) приведено в таблиці 1.13. Частота мережі $f = 50$ Гц, обмотка статора з'єднана зіркою.

Визначити:

- - кутову швидкість обертання ротора;
- - номінальний і пусковий струми статора;
- - номінальний, максимальний і пусковий моменти;
- - повну потужність $S_{\text{НОМ}}$;
- - побудувати векторну діаграму, яка відповідає номінальному режиму;
- - побудувати кутову характеристику і відмітити на ній точку, яка відповідає номінальному навантаженню.

Примітка. В таблиці 1.13 остання цифра в позначенні типу двигуна означає число полюсів машини.

Таблица 1.13

№ з/п	Тип двигателя	$P_{НОМ}$, МВт	$\eta_{НОМ}$, %	$M_{П}$	M_{max}^*	$I_{П}^*$	I_3^*	P_2^*
1	СДН-14-44-10	0,63	93,8	0,8	2,0	5,4	1,2	0,8
2	СДН-14-56-10	0,8	94,4	0,85	2,1	5,7	1,4	0,8
3	СДН-15-39-10	1	94,6	0,8	2,1	5,8	1,5	0,8
4	СДН-15-49-10	1,25	95,1	0,85	2,1	5,8	1,6	0,4
5	СДН-15-64-10	1,6	95,7	0,95	2,1	6,2	1,4	0,8
6	СДН-14-48-8	0,8	84,8	0,75	2,0	5,4	1,7	0,0
7	СДН-14-59-8	1,0	95,4	0,95	2,0	5,6	1,6	0,4
8	СДН-15-39-8	1,25	94,8	0,85	2,0	4,8	1,5	0,4
9	СДН-15-49-8	1,6	95,6	1,10	2,0	5,0	1,4	0,4
10	СДН-15-64-6	2,5	96,4	1,10	2,0	5,8	1,2	0,4
11	СДН-15-76-6	3,2	96,6	1,10	2,0	6,1	1,4	0,0
12	СДН-16-84-6	5,0	96,8	1,0	2,0	6,8	1,7	0,0
13	СДН-15-71-8	3,2	96,4	1,1	2,0	5,9	1,4	0,8
14	СДН-16-86-8	4,0	96,7	1,3	2,0	6,5	1,5	0,8
15	СДН-17-76-8	6,3	96,9	0,8	2,0	6,7	1,5	0,4
16	СДН-14-49-6	1,0	95,2	0,95	2,0	6,4	1,5	0,0
17	СДН-14-59-6	1,25	95,8	1,3	2,0	6,3	1,5	0,4
18	СДН-15-39-6	1,6	95,7	0,95	2,0	4,8	1,5	0,8
19	СДН-15-49-6	2,0	95,9	1,0	2,0	5,5	1,6	0,0
20	СДН-16-69-6	4,0	96,5	0,9	2,0	6,0	1,6	0,4
21	СДН-16-104-6	6,3	97,1	0,95	2,0	6,9	1,6	0,8
22	СДН-14-59-8	1,0	95,4	0,95	2,0	5,6	1,7	0,4
23	СДН-15-39-8	1,25	94,8	0,85	2,0	4,8	1,7	0,8
24	СДН-16-54-8	2,5	95,8	1,3	2,0	5,3	1,5	0,8

1.4. Машини постійного струму

1.4.1. Основні теоретичні положення

Роботу МПС основано на:

- 1) утворенні незмінного у часі нерухомого магнітного поля;
- 2) одержанні Е.Р.С. в провідниках, що рухаються в магнітному полі;
- 3) взаємодії магнітного поля і струму.

Принцип дії МПС описують три основні закони електротехніки: закон повного струму; закон електромагнітної індукції; закон Ампера.

Магнітне поле машини незалежно від режиму роботи створюється на підставі закону повного струму за допомогою електромагнітів постійного струму. Ці електромагніти називають головними полюсами і розміщують на статорі. Магнітна полярність головного полюса залежить від напрямку струму в обмотці збудження і визначається за правилом свердлика. В окремих випадках для малопотужних МПС магнітне поле створюється за допомогою постійних магнітів.

В генераторному режимі в магнітному полі статора під дією первинного двигуна обертається якір, в провідниках обмотки якого згідно з законом електромагнітної індукції виникають електрорушійні сили. Їх напрям визначається за правилом правої руки. Індуковані в провідниках якірної обмотки змінні ЕРС випрямляються колекторно-щітковим вузлом, і на виході машини генерується постійна Е.Р.С. $E_{я}$, що й вимагається від генератора постійного струму (ГПС).

При підключенні до генератора навантаження через провідники якірної обмотки проходить струм i , відповідно до закону Ампера, на них діють електромагнітні сили. Напрямок дії цих сил визначається за правилом лівої руки. Електромагнітні сили створюють на якорі гальмівний

момент, який повинен долати первинний двигун. У такий спосіб відбувається перетворення механічної енергії первинного двигуна в електричну енергію, яку генератор віддає у навантаження.

У режимі двигуна в магнітному полі машини якір обертається під дією електромагнітних сил, які за законом Ампера виникають з появою в обмотці якоря струму при її підключенні до джерела живлення. Напрямок обертання якоря визначається за правилом лівої руки. У такому режимі відбувається перетворення електричної енергії, яку споживає двигун від джерела живлення, в механічну енергію на валу двигуна. При обертанні якоря в кожному провіднику його обмотки індукується змінна ЕРС, напрямлена зустрічно струму. Змінні Е.Р.С., індуковані в якорі, колекторно-щітковий вузол перетворює на постійну Е.Р.С. $E_{\text{я}}$ на затискачах двигуна. Оскільки $E_{\text{я}}$ напрямлена зустрічно напрузі живлення U і обмежує струм в обмотці якоря, то її часто називають проти-Е.Р.С.

Опановуючи принцип дії генератора і двигуна необхідно усвідомити, що в МПС напрямок перетворення енергії може бути змінений на зворотній, тобто МПС є оберненою машиною.

При вивченні машин постійного струму слід звернути увагу на їх характерну особливість – наявність колектора і зрозуміти його призначення у кожному режимі. При обертанні якоря в провідниках його обмотки індукуються змінні Е.Р.С., оскільки кожний провідник по чергово проходить під полюсами різної полярності. Якщо машина працює генератором, то змінна Е.Р.С. обмотки якоря повинна бути випрямлена, що виконується за допомогою колектора і щіток. У двигунах постійного струму до щіток підводять постійний струм. Роль колектора полягає у тому, щоб змінювати напрям струму в провідниках обмотки якоря при їх переході з одного полюсного поділу в інший. Це забезпечує такий розподіл

струму в обмотці якоря, при якому електромагнітні сили усіх провідників напрямлені в один бік і двигун створює найбільший обертовий момент.

Опрацьовуючи процеси в МПС, треба усвідомити сутність реакції якоря та її вплив на розподіл магнітного поля в повітряному зазорі машини. Магнітний потік у машині створюється всіма її обмотками, через які проходить струм. В режимі неробочого ходу в машині існує тільки основний магнітний потік Φ_0 , утворений обмоткою збудження головних полюсів і симетричний відносно їх осі. Тому фізична нейтраль збігається з геометричною. У режимі навантаження через обмотку якоря проходить струм $I_{\text{я}}$, який створює магніторушійну силу $I_{\text{я}}W_{\text{я}}$. Вона, у свою чергу, збуджує магнітний потік $\Phi_{\text{я}}$, напрямлений по лінії розташування щіток. *Вплив магнітного потоку $\Phi_{\text{я}}$ на основний магнітний потік Φ_0 називають реакцією якоря.* Внаслідок реакції якоря результуючий магнітний потік стає несиметричним відносно осі полюсів: під одним краєм полюса він збільшується, під іншим – зменшується. Фізична нейтраль повертається відносно геометричної на деякий кут α . В результаті розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі стає ще більш нерівномірним. Це призводить до зростання різниці потенціалів між сусідніми пластинами колектора. На колекторі може виникнути іскріння і навіть «круговий вогонь». Крім того, реакція якоря призводить до суттєвого зменшення Е.Р.С. якоря, якщо машина працює в області, близької до насичення. Слід звернути увагу на способи зменшення негативного впливу реакції якоря. Насамперед, щітки зсувають з геометричної нейтралі на фізичну. Зсув щіток здійснюють на кут α у генераторах за напрямком обертання якоря, а у двигунах – проти напрямку обертання якоря. Оскільки кут α змінюється при зміні навантаження

(струму $I_{\text{я}}$), то на практиці щітки зазвичай встановлюють на кут, відповідний середньому навантаженню. В машинах середньої та великої потужності використовують спеціальну компенсаційну обмотку, яку розміщують у пазах головних полюсів і вмикають послідовно з обмоткою якоря так, щоб її магнітний потік $\Phi_{\text{к}}$ був напрямлений зустрічно $\Phi_{\text{я}}$. За умови $\Phi_{\text{к}} = \Phi_{\text{я}}$ магнітний потік в машині майже не спотворюється реакцією якоря.

Варто також звернути увагу на призначення додаткових полюсів, які встановлюються в машинах потужністю більше 1 кВт та їх вплив на магнітне поле машини.

Властивості та характеристики МПТ залежать від того, як змінюється магнітний потік машини у разі зміни навантаження. Характер зміни магнітного потоку в свою чергу залежить від числа та способу включення обмоток збудження. За способом збудження розрізняють:

- 1) МПС незалежного збудження (магнітний потік залишається незмінним при зміні навантаження);
- 2) МПС паралельного збудження або шунтові (магнітний потік слабо змінюється при зміні навантаження);
- 3) МПС послідовного збудження або серієсні (магнітний потік змінюється в широких межах при зміні навантаження);
- 4) МПС мішаного збудження або компаундні, які в залежності від того, яка з обмоток є основною, поділяють на МПС з послідовно-паралельним збудженням і МПС з паралельно-послідовним збудженням. Обмотки можуть бути з'єднані узгоджено або зустрічно, що суттєво впливає на характеристики машини.

МПС виконують на потужність від долей вата (у пристроях автоматики) до десяти тисяч кіловат. Їхня швидкість обертання може

знаходиться в діапазоні від одиниць об/хв до 30 тисяч об/хв. На малі та середні потужності МПС випускаються серійно, на великі потужності (сотні кВт і вище) – за спеціальним замовленням. Вітчизняні МПС загальнопромислового призначення пройшли шлях розвитку в рамках серій П - 5П. Окремо стоять МПС для екскаваторів, сухопутних і морських бурових установок, шахтних підйомників, які характеризуються великою потужністю і важкими умовами експлуатації. Існують також спеціалізовані серії, наприклад краново-металургійні, рудникові ДПС. Свою специфіку, пов'язану з жорстко обмеженими установочними розмірами на рухомих засобах, мають тягові ДПС. Найбільшими за потужністю є ДПС головних приводів прокатних станів і криголамів.

Характеристики генераторів постійного струму

Основні рівняння, що характеризують роботу ГПС, справедливі для всіх генераторів незалежно від способу їх збудження:

$$E_{\text{я}} = c_{\text{Е}} n \Phi, \quad U = E - I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad I_{\text{з}} = U_{\text{з}} / R_{\text{з}},$$

де $c_{\text{Е}}$ - конструктивний коефіцієнт, Φ - результуючий магнітний потік, $R_{\text{я}}$ - опір кола якоря, $I_{\text{з}}$, $U_{\text{з}}$, $R_{\text{з}}$ - параметри кола збудження.

В умовах експлуатації важливо знати основні характеристики ГПС, до яких відносяться: 1) характеристика неробочого ходу; 2) зовнішня характеристика; 3) регульовальна характеристика. Спосіб збудження впливає на вигляд тієї чи іншої характеристики ГПС. На їх основі можна вибрати потрібний для роботи тип машини.

Головна особливість і перевага генератора незалежного збудження – це можливість за допомогою струму обмотки збудження регулювати напругу на виході генератора в широких межах, а також змінювати її

полярність. Вказана властивість генератора використовується в поширеній системі генератор-двигун, де за допомогою генератора змінюють частоту і напрямок обертання двигуна. Ще однією особливістю такого генератора є відносно невелика зміна напруги при зміні навантаження. Очевидний недолік генератора незалежного збудження в тому, що він потребує додаткового джерела постійного струму для живлення обмотки збудження. Такі генератори мають обмежене застосування, наприклад, в автономному обладнанні на транспорті, в установках електроживлення ДПС, у системах автоматичного регулювання.

Різновидом генераторів незалежного збудження є тахогенератори постійного струму. Вони являють собою генератори невеликої потужності (зазвичай до декількох ват), які використовують для непрямого вимірювання частоти обертання валів машин і механізмів з метою їх контролю або для автоматизації роботи установок залежно від частоти обертання. Магнітне поле тахогенераторів утворюється обмоткою збудження або постійними магнітами. Відомо, що у генераторів незалежного збудження магнітний потік практично не змінюється $\Phi = const$, тому Е.Р.С., яку він наводить в обмотці якоря, пропорційна частоті обертання $E_{\text{я}} = c_{\text{Е}} n \Phi \approx kn$ і, відповідно, $n = E_{\text{я}} / k \approx U / k$. Таким чином, вимірюючи напругу тахогенератора за допомогою вольтметра, можна непрямым шляхом контролювати частоту обертання.

Генератор паралельного збудження дозволяє отримати напругу без додаткового джерела для кола збудження. Оскільки цей тип генератора найбільш поширений, слід чітко усвідомити процес його самозбудження (появу напруги на виході) і умови, за яких самозбудження можливе. Необхідно звернути увагу на те, що при неправильному ввімкненні обмотки збудження її струм створює магнітний потік, напрямлений

зустрічно магнітному потоку залишкового магнетизму, тому самозбудження не відбувається. У такому випадку слід змінити полярність підключення обмотки збудження до обмотки якоря. Якщо генератор протягом довгого часу не використовувався або перевозився, то магнітний потік залишкового магнетизму може бути недостатнім для самозбудження. Тоді обмотку збудження відключають від обмотки якоря і під'єднують до джерела постійної напруги. Після намагнічення магнітної системи машини обмотку збудження знову підключають паралельно обмотці якоря.

Генератор паралельного збудження дозволяє регулювати напругу шляхом зміни струму збудження у відносно невеликих межах – від $U_{\text{НОМ}}$ до $0,85U_{\text{НОМ}}$. Крім того, у таких генераторів досить складно змінювати полярність вихідної напруги, а її значення суттєво залежить від навантаження.

Генератор мішаного збудження відрізняється від генератора паралельного збудження тільки тим, що завдяки послідовній обмотці напруга на його виході при зміні навантаження змінюється мало. В даний час майже всі генератори забезпечуються послідовною обмоткою збудження з невеликим числом витків, що дає можливість отримувати більш стабільну напругу при зміні навантаження.

Генератори паралельного та мішаного збудження застосовуються для живлення обмоток якорів нереверсивних двигунів постійного струму з невеликим діапазоном регулювання частоти обертання; обмоток збудження синхронних генераторів і двигунів; електричних мереж постійного струму; ванн для гальванічного покриття; агрегатів для зарядки акумуляторів; підйомних електромагнітів тощо.

Генератори послідовного збудження не набули практичного застосування внаслідок значної залежності напруги від струму навантаження.

Як стаціонарні джерела постійного струму і напруги ГПС програють за техніко-економічними показниками напівпровідниковим випрямлячам, що живляться від мереж змінного струму. Там, де допускають технічні умови, генератори постійного струму замінюють напівпровідниковими випрямлячами.

Технічні дані генераторів:

- тип генератора;
- номінальна потужність $P_{\text{НОМ}}$, що віддається у навантаження, кВт;
- номінальна напруга $U_{\text{НОМ}}$, В;
- номінальний струм $I_{\text{НОМ}}$, А;
- номінальна швидкість обертання $n_{\text{НОМ}}$, об/хв;
- номінальний ККД η .

Крім того, у каталогах і довідниках наводиться ряд інших відомостей, зокрема про спосіб збудження. Якщо обмотка збудження розрахована на напругу, яка відрізняється від напруги обмотки якоря, то додатково вказують номінальні значення напруги та струму обмотки збудження.

Характеристики двигунів постійного струму

На практиці склалося так, що МПС використовують переважно як двигуни, хоча вони в загальному парку електродвигунів за сумарною потужністю займають частку, не більшу 5...6%.

Вивчаючи двигуни, слід засвоїти основне рівняння двигуна

$$U = E + I_{\text{я}}R_{\text{я}} = c_{\text{Е}}n\Phi + I_{\text{я}}R_{\text{я}}$$

і похідні від нього для швидкості обертання, струму якоря, моменту

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}R_{\text{я}}}{c_{\text{Е}}\Phi}, \quad I_{\text{я}} = \frac{U - c_{\text{Е}}n\Phi}{R_{\text{я}}}, \quad M = c_{\text{М}}\Phi I_{\text{я}},$$

а також їх варіації для різних типів збудження.

Треба чітко уявляти зміну основних характеристик двигуна – електромеханічної $n = f(I_{\text{я}})$ і механічної $n = f(M)$ - при зміні способу збудження і вміти аналізувати вплив окремих параметрів на роботу двигуна. Важливо зрозуміти зв'язок між способом збудження і жорсткістю характеристики, небезпеку розмикання кола збудження двигуна, що працює з паралельним збудженням, а також раптового розвантаження двигуна з послідовним збудженням.

Для правильної експлуатації двигуна необхідно засвоїти способи його пуску (прямий, реостатний, при зниженій напрузі); вміти оцінювати показники якості пуску (плавність, легкість і зручність, кратність пускового струму і моменту). Корисно знати схему ввімкнення двигуна та конструктивні особливості пускових реостатів.

Особливу увагу слід звернути на регулювання швидкості ДПС. Неможна плутати регулювання як примусову зміну швидкості (внаслідок зміни параметрів) з природною її зміною (через зміну навантаження на валу). При регулюванні швидкості деякі механізми потребують збереження сталості моменту (підйомні крани, лебідки тощо), тоді як інші механізми – сталості потужності (наприклад, токарний верстат).

Згідно з виразом механічної характеристики

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{c_E c_M \Phi^2} M$$

швидкість двигунів можна регулювати трьома способами: 1) зміною опору кола якоря; 2) зміною магнітного потоку (струму збудження); 3) зміною напруги живлення. Вказані способи можуть бути використані для двигуна з будь-яким способом збудженням. Бажано дати порівняльну оцінку методів регулювання швидкості для двигунів.

Для реалізації першого способу в коло якоря послідовно вмикають регулювальний реостат (резистор) $R_{\text{РЕГ}}$, що збільшує спад напруги і призводить до зменшення Е.Р.С. якоря $E_{\text{я}} = U - (R_{\text{я}} + R_{\text{РЕГ}}) I_{\text{я}}$. При $\Phi = \text{const}$ зменшення $E_{\text{я}} = c_E n \Phi$ призводить до зниження швидкості обертання n . Таким чином, резистором $R_{\text{РЕГ}}$ можна регулювати швидкість обертання n в області величин $n < n_{\text{НОМ}}$. Чим більша величина опору $R_{\text{РЕГ}}$, тим крутіше проходить штучна механічна характеристика двигуна, тим ширше діапазон зміни n при зміні навантаження. М'які штучні механічні характеристики ускладнюють отримання потрібної швидкості при різних навантаженнях. Крім того, в реостаті $R_{\text{РЕГ}}$ проходить струм якоря $I_{\text{я}}$, що призводить до значних втрат $R_{\text{РЕГ}} I_{\text{я}}^2$ в колі якоря і зниження ККД. З цієї причини регулювання швидкості двигуна шляхом увімкнення реостата в коло якоря застосовують тільки для двигунів невеликої потужності. У разі регулювання швидкості зміною магнітного потоку (тобто струмом збудження) регулювальний реостат $R_{\text{РЕГ}}$ вмикають у коло збудження (у двигунів з послідовним збудженням обмотку збудження шунтують реостатом $R_{\text{РЕГ}}$). Додатковий опір $R_{\text{РЕГ}}$ спричиняє зменшення струму збудження i , відповідно, магнітного потоку, що при незмінному

навантаженні на валу ($M = const$) призводить до зростання струму якоря $I_{\text{я}} = M/c_E \Phi$ і швидкості обертання. Зміною опору $R_{\text{РЕГ}}$ можна змінювати магнітний потік в діапазоні від $\Phi_{\text{НОМ}}$ при $R_{\text{РЕГ}} = 0$ (мінімальна швидкість обертання) до Φ_{min} (максимальна швидкість обертання). Величина Φ_{min} обмежується механічною міцністю машини і умовами комутації, які погіршуються при зростанні швидкості через перевантаження колектора і якоря по струму. Сучасні двигуни обладнані пристроєм автоматичного захисту, який відключає двигун від мережі при надмірному зменшенні струму збудження. Отже, таким способом можна регулювати швидкість обертання n в області величин $n > n_{\text{НОМ}}$. До переваг цього способу слід віднести досить жорсткі штучні механічні характеристики, що полегшує отримання потрібних швидкостей, бо останні мало залежать від навантаження двигуна. Ще однією суттєвою перевагою такого регулювання є економічність: через відносно малий струм обмотки збудження додаткові втрати в регульовальному реостаті $R_{\text{РЕГ}}$ невеликі. Регулювання швидкості зміною магнітного потоку є на даний час найбільш ефективним способом, тому має широке застосування. Для реалізації третього способу регулювання – зміною напруги на якорі необхідно, щоб двигун отримував живлення від окремого джерела. Як джерело може бути використаний генератор постійного струму незалежного збудження. Систему, що складається із генератора та під'єданого до нього двигуна, називають системою генератор-двигун (Г-Д). Якір генератора з'єднаний з якорем двигуна безпосередньо без будь-яких пускових і регульовальних реостатів. Обмотки збудження генератора і двигуна живляться від окремого джерела. Вал генератора обертається з постійною швидкістю допоміжним двигуном (переважно асинхронним).

Зміну напруги двигуна постійного струму досягають регулюванням струму збудження генератора. Пуск двигуна здійснюють, поступово збільшуючи напругу на його обмотці якоря шляхом збільшення струму збудження генератора. Для зміни напрямку обертання двигуна змінюють полярність напруги на обмотці збудження генератора. Оскільки всі операції керування двигуном проводять у малопотужних колах збудження, то необхідна для цього апаратура легка і компактна. Останнім часом значно поширились системи, в яких генератор замінений напівпровідниковим перетворювачем, що перетворює змінну напругу мережі у регульовану випрямлену напругу. Порівняно з системою Г-Д такі установки мають меншу масу і більший ККД. Для регулювання напруги використовують також системи, в яких незмінна за амплітудою та напрямом напруга періодично передається на якір двигуна у вигляді окремих імпульсів. При такому живленні середнє значення напруги на якорі $U_{\text{СЕР}}$, що визначає швидкість двигуна, $U_{\text{СЕР}} = (t_i/t_{\text{Ц}})U$. Змінюючи співвідношення між тривалістю імпульсу t_i і тривалістю циклу $t_{\text{Ц}}$, можна змінювати величину $U_{\text{СЕР}}$. За рахунок зміни напруги живлення можна отримати діапазон регулювання 10:1. ККД двигуна при такому регулюванні залишається практично незмінним.

Корисно порівняти властивості ДПС і двигунів змінного струму. Двигуни постійного струму мають такі переваги: легко керуються (тобто простими засобами ефективно регулюється частота обертання), можуть розвивати великий пусковий момент. Внаслідок цього ДПС поширені на транспорті, в підйомно-крановому обладнанні, на прокатних станах тощо. Мікродвигуни постійного струму використовують у пристроях автоматичного керування. Розповсюдження ДПС обмежується такими недоліками: у порівнянні з двигунами змінного струму при однаковій потужності ДПС мають більші габарити, масу, ціну, їхня конструкція

складніша, вони менш надійні, бо мають ковзні електричні контакти. Крім того, для ДПС необхідні джерела живлення постійного струму, в той час як всюди поширені електромережі змінного струму.

Доцільно також порівняти властивості та характеристики ДПС з різними способами збудження. Двигуни незалежного та паралельного збудження мають "жорстку" природну механічну характеристику, тому їх використовують у випадках, коли при зміні навантаження у широких межах частота обертання повинна залишатися незмінною. Слід відмітити, що деякі з таких двигунів додатково обладнані послідовною обмоткою збудження, невелика магніторухійна сила якої спрямована зустрічно магніторухійній силі основної обмотки. Наявність послідовної обмотки збільшує "жорсткість" природної механічної характеристики.

Двигуни незалежного і паралельного збудження застосовують також у випадках, коли зовнішній момент буває як гальмівним, так і обертовим. Такі двигуни можуть автоматично переходити з двигунного режиму в гальмівний і навпаки.

Двигуни послідовного збудження мають "м'яку" природну механічну характеристику, яка потрібна для електропривода підйомних пристроїв та електротранспорту: у разі переміщення легких грузів швидкість обертання автоматично зростає, що збільшує продуктивність механізмів. Важлива особливість таких двигунів полягає у тому, що їх не можна запускати без навантаження; крім того, вони не можуть стало працювати при навантаженнях, менших, ніж 25% від номінального.

Двигуни мішаного збудження мають більш "м'яку" природну механічну характеристику, ніж двигуни незалежного чи паралельного збудження, але більш "жорстку" порівняно з двигунами послідовного збудження. На відміну від останніх двигуни мішаного збудження можуть стало працювати при малих навантаженнях та запускатися без навантаження.

Двигуни мішаного і особливо послідовного збудження допускають велике короткочасне перевантаження по моменту в порівнянні з двигунами паралельного збудження. Це дозволяє проводити їх пуск і гальмування в більш стислий час, а за однакового часу вони менш завантажені по струму.

Технічні дані двигунів:

- тип;
- номінальна (механічна) потужність $P_{\text{НОМ}}$, кВт;
- номінальна напруга $U_{\text{НОМ}}$, В;
- номінальна швидкість обертання $n_{\text{НОМ}}$, об/хв;
- номінальний струм $I_{\text{НОМ}}$, А;
- номінальний ККД η ;
- момент інерції ротора J , кг·м².

Якщо обмотки збудження та якоря розраховані на різну напругу, то додатково вказують номінальне значення напруги та струму обмотки збудження. Іноді крім перерахованих відомостей надають ряд інших, наприклад, режим роботи, допустимі короткочасні перевантаження.

1.4.2. Основні розрахункові співвідношення

Електрорушійна сила обмотки якоря МПТ

$$E_{\text{я}} = c_{\text{Е}} n \Phi, \quad (1.83)$$

де $c_{\text{Е}}$ – конструктивний коефіцієнт; n – частота обертання ротора, об/хв;
 Φ – магнітний потік одного полюса, Вб.

Електромагнітний момент МПТ

$$M_{\text{ем}} = c_M I_{\text{я}} \Phi, \quad (1.84)$$

де c_M – конструктивний коефіцієнт; $I_{\text{я}}$ – струм якоря, А; Φ – магнітний потік, Вб.

Конструктивні коефіцієнти c_E, c_M

$$c_E = \frac{pN}{60a}, \quad c_M = \frac{pN}{2\pi a}, \quad (1.85)$$

де p – число пар магнітних полюсів; N – число активних провідників обмотки якоря; a – кількість пар паралельних гілок в обмотці якоря.

Якщо момент M виражений у ньютонно-метрах, то

$$\frac{c_E}{c_M} \approx 0,105; \quad c_M = 9,55c_E.$$

Рівняння напруги генератора незалежно від способу збудження

$$U = E_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}, \quad (1.86)$$

де $R_{\text{я}}$ – опір кола якоря, Ом; $I_{\text{я}}$ – струм якоря, А.

$$I_{\text{я}} = \begin{cases} I + I_{\text{ЗБ}} & \text{— для машин з паралельним та мішаним збудженням,} \\ I & \text{— для машин з незалежним та послідовним збудженням.} \end{cases}$$

Потужності генератора

Підведена механічна потужність

$$P_1 = \Omega \cdot M = P_2 + \Sigma P_{\text{втр}} = \frac{P_2}{\eta}, \quad (1.87)$$

де $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ – кутова швидкість обертання якоря, рад/с; M – обертовий момент на валу первинного двигуна, Н·м; P_2 – корисна електрична потужність на виході генератора, Вт; $\Sigma P_{\text{ВТР}}$ – сумарні втрати, Вт; η – ККД.

Електромагнітна потужність

$$P_{\text{ем}} = E_{\text{я}} I_{\text{я}}. \quad (1.88)$$

Корисна потужність

$$P_2 = UI, \quad (1.89)$$

де U , I – відповідно напруга та струм на виході генератора.

$$I = \begin{cases} I_{\text{я}} + I_{\text{зб}} & \text{— для машин з паралельним та мішаним збудженням,} \\ I_{\text{я}} & \text{— для машин з незалежним та послідовним збудженням.} \end{cases}$$

Рівняння напруги двигуна незалежно від способу збудження

$$U = E_{\text{я}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}}. \quad (1.90)$$

$$I_{\text{я}} = \begin{cases} I + I_{\text{зб}} & \text{— для машин з паралельним та мішаним збудженням,} \\ I & \text{— для машин з незалежним та послідовним збудженням.} \end{cases}$$

Потужності двигуна

Споживана з мережі живлення потужність:

$$P_1 = \begin{cases} UI + P_{\text{зб}} & \text{— для машин з незалежним збудженням,} \\ UI & \text{— для машин з іншими способами збудження.} \end{cases} \quad (1.91)$$

де U , I – відповідно напруга та струм на вході двигуна; $P_{\text{зб}}$ – потужність втрат у колі збудження.

Електромагнітна потужність

$$P_{\text{ем}} = E_{\text{я}} I_{\text{я}} \quad (1.92)$$

Корисна механічна потужність на валу

$$P_2 = \Omega \cdot M_2 = \frac{M_2 n}{9,55} = \Omega \cdot (c_{\text{м}} I_{\text{я}} \Phi - M_0) \quad (1.93)$$

де $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ – кутова швидкість обертання якоря, рад/с; M_2 – корисний

обертовий момент на валу, Н·м; M_0 – момент неробочого ходу, Н·м.

Потужності втрат в МПТ

1. **Електричні** втрати у колі якоря $P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$;
2. **Електричні** втрати у колі збудження $P_{\text{зб}} = U_{\text{зб}} I_{\text{зб}} = I_{\text{зб}}^2 R_{\text{зб}}$;
3. **Механічні** втрати на валу якоря $P_{\text{мех}}$;
4. **Магнітні** втрати в осерді якоря та в полюсних наконечниках $P_{\text{м}}$;
5. **Додаткові** втрати $P_{\text{дод}}$, які вважають рівними 1% від підведеної до машини потужності.

Сумарні втрати

$$\Sigma P_{\text{втр}} = P_{\text{я}} + P_{\text{зб}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{м}} + P_{\text{дод}}. \quad (1.94)$$

ККД машини

У режимі генератора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P_{\text{втр}}} = \frac{UI}{UI + \Sigma P_{\text{втр}}} = 1 - \frac{\Sigma P_{\text{втр}}}{UI + \Sigma P_{\text{втр}}}; \quad (1.95)$$

у режимі двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P_{\text{втр}}}{P_1} = \frac{UI - \Sigma P_{\text{втр}}}{UI} = 1 - \frac{\Sigma P_{\text{втр}}}{UI}. \quad (1.96)$$

Обертовий момент МПТ

У режимі генератора $M = M_{\text{ем}} + M_0 \approx M_{\text{ем}} \approx c_M I_{\text{я}} \Phi$; (1.97)

у режимі двигуна $M = M_{\text{ем}} - M_0 \approx M_{\text{ем}} \approx c_M I_{\text{я}} \Phi \approx 9,55 \frac{P_2}{n}$, (1.98)

де M – корисний момент на валу двигуна, Н·м; M_0 – момент неробочого ходу, Н·м.

Швидкість обертання двигуна у робочому режимі

$$n = \frac{E_{\text{я}}}{c_E \Phi} = \frac{U - IR_{\text{я}}}{c_E \Phi}. \quad (1.99)$$

Швидкість обертання двигуна у разі неробочого ходу

$$n_0 = n_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}} - R_{\text{я}} I_{\text{яНОМ}}}. \quad (1.100)$$

Рівняння механічної характеристики двигуна

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{c_E c_M \Phi^2} M. \quad (1.101)$$

Кратність пускового струму

$$K_I = \frac{I_{\text{ПУС}}}{I_{\text{НОМ}}}, \quad (1.102)$$

де $I_{\text{ПУС}}$ – пусковий струм двигуна, А.

Кратність пускового моменту

$$K_M = \frac{M_{\text{ПУС}}}{M_{\text{НОМ}}}, \quad (1.103)$$

де $M_{\text{ПУС}}$ – пусковий момент двигуна, Н·м; $M_{\text{НОМ}}$ – номінальний момент двигуна.

Опір пускового реостата

$$R_{\text{ПУС}} = \frac{U}{I_{\text{ЯНОМ}}} - R_{\text{Я}}. \quad (1.104)$$

Опір кола якоря

$$R_{\text{Я}} = \frac{\alpha}{I_{\text{НОМ}}^2} \left(\frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} - P_{\text{НОМ}} \right) \cdot 10^3, \quad (1.105)$$

де $\alpha = 0,5$ для двигунів незалежного та паралельного збудження;

$\alpha = 0,6$ для двигунів мішаного збудження;

$\alpha = 0,75$ для двигунів послідовного збудження.

1.4.3. Типові розв'язані задачі

Задача 1.84. Для генератора паралельного збудження відомі такі дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 5,2$ кВт, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 230$ В, номінальна швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 2860$ об/хв. Опір обмотки якоря $R_{\text{Я}} = 0,75$ Ом, опір кола збудження $R_3 = 154$ Ом, механічні та магнітні втрати складають 4% від номінальної потужності генератора. Визначити струм і ККД генератора у номінальному режимі; електромагнітний момент, потужність первинного двигуна.

Розв'язання. Номінальна потужність генератора – це номінальна корисна потужність, що віддається у навантаження: $P_{\text{НОМ}} = P_{2\text{НОМ}}$.

Номінальний струм навантаження (1.89)

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{5,2 \cdot 1000}{230} = 22,6 \text{ А.}$$

Струм збудження

$$I_{\text{ЗНОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_3} = \frac{230}{154} = 1,5 \text{ А.}$$

Струм якоря при номінальному навантаженні

$$I_{\text{ЯНОМ}} = I_{\text{НОМ}} + I_{\text{ЗНОМ}} = 22,6 + 1,5 = 24,1 \text{ А.}$$

Е.Р.С. генератора (1.96)

$$E_{\text{ЯНОМ}} = U_{\text{НОМ}} + R_{\text{Я}} I_{\text{ЯНОМ}} = 230 + 0,75 \cdot 24,1 = 248 \text{ В.}$$

Втрати в колі якоря і в колі збудження

$$P_{\text{ЯНОМ}} = R_{\text{Я}} I_{\text{ЯНОМ}}^2 = 0,75 \cdot 24,1^2 = 435 \text{ Вт.}$$

$$P_{\text{ЗНОМ}} = R_3 I_{\text{ЗНОМ}}^2 = 154 \cdot 1,5^2 = 346 \text{ Вт.}$$

Сума механічних і магнітних втрат

$$P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{М}} = 0,04 \cdot 5,2 \cdot 10^3 = 208 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати при номінальному навантаженні (1.94)

$$\Sigma P_{\text{НОМ}} = P_{\text{ЯНОМ}} + P_{\text{ЗНОМ}} + P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{М}} = 435 + 346 + 208 = 989 \text{ Вт.}$$

Потужність на валу первинного двигуна (1.87)

$$P_{1\text{НОМ}} = \Sigma P_{\text{НОМ}} + P_{2\text{НОМ}} = 989 + 5200 = 6189 \text{ Вт} \approx 6,2 \text{ кВт.}$$

Момент на валу первинного двигуна при номінальному навантаженні генератора (1.98)

$$M_{\text{дв}} = \frac{9,55 P_{\text{1НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{9,55 \cdot 6200}{2860} = 20,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

ККД генератора у номінальному режимі

$$\eta_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{2НОМ}}}{P_{\text{1НОМ}}} = \frac{5,2}{6,2} = 0,84.$$

Задача 1.85. Генератор постійного струму незалежного збудження за номінальної швидкості обертання $n_{\text{НОМ}} = 145$ об/хв має характеристику неробочого ходу, приведену в таблиці 1.14. Визначити якою буде Е.Р.С. якоря при номінальній швидкості обертання, якщо обмотку збудження з опором $R_z = 110$ Ом підключити паралельно до обмотки якоря. Розрахувати опір регулювального реостата, який потрібно ввімкнути у коло збудження, щоб за тієї ж швидкості обертання отримати Е.Р.С. $E_{\text{я}} = 230$ В.

Таблиця 1.14

$I_z, \text{ А}$	0,6	1,0	1,71	2,6	4,05
$E_{\text{я}}, \text{ В}$	115	178	230	260	287

Розв'язання. Використовуючи дані таблиці 1.14 будемо характеристику неробочого ходу (рис. 1.30, графік 1).

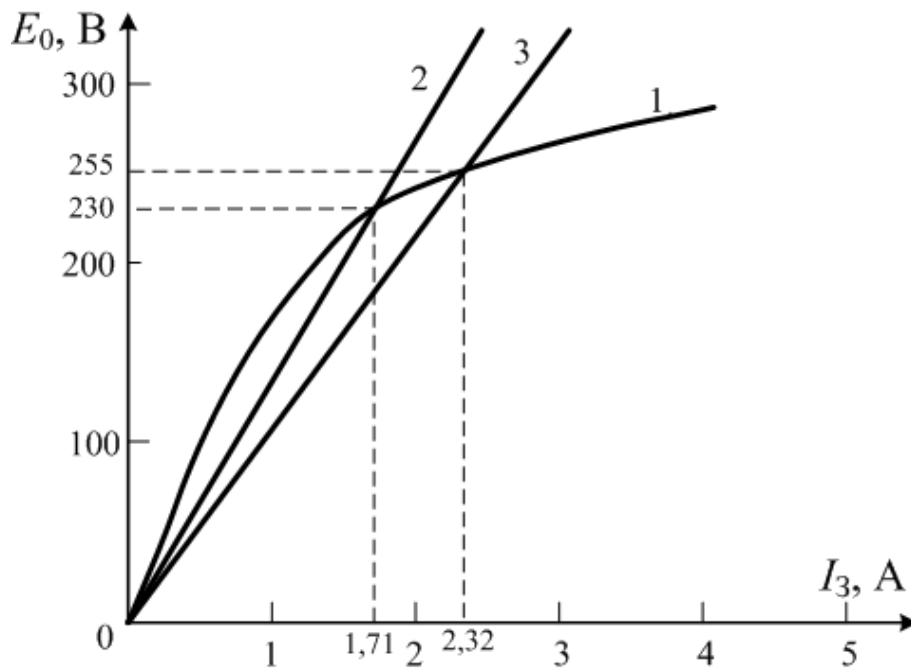
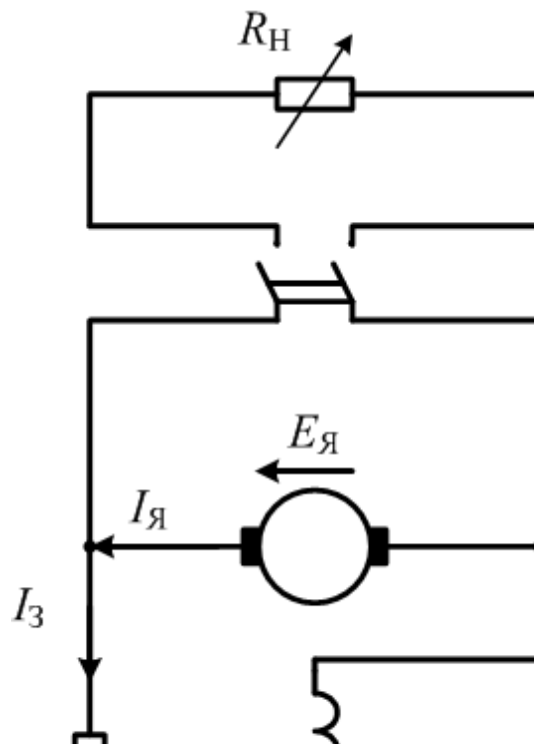


Рис. 1.30

Струм у колі збудження при паралельному підключенні обмотки збудження до обмотки якоря і наявності регулювального реостата (рис. 1.31) визначається за формулою

$$I_3 = \frac{E_{\text{я}}}{R_{\text{я}} + R_3 + R_{\text{РЕГ}}} \approx \frac{E_{\text{я}}}{R_3 + R_{\text{РЕГ}}},$$

звідки $E_{\text{я}} = (R_3 + R_{\text{РЕГ}})I_3$. Це лінійне рівняння називають характеристикою кола збудження.



При Е.Р.С. $E_{\text{я}} = 230$ В і конкретному значенні $R_3 + R_{\text{РЕГ}}$ характеристика кола збудження повинна перетинати криву 1, тому на кривій 1 позначасмо точку, яка відповідає $E_{\text{я}} = 230$ В.

З'єднавши позначену точку з початком координат, отримуємо пряму 2 – характеристику кола збудження при $R_{\text{РЕГ}} \neq 0$. У точці перетину кривої 1 та прямої 2 струм збудження $I_3 = 1,71$ А, тоді

$$R_3 + R_{\text{РЕГ}} = \frac{230}{1,71} = 134,5 \text{ Ом},$$

$$R_{\text{РЕГ}} = 134,5 - R_3 = 134,5 - 110 = 24,5 \text{ Ом}.$$

За відсутності регулювального реостату в колі збудження вольт амперна характеристика цього кола описується рівнянням $E_{\text{я}} = R_3 I_3 = 110 I_3$. На рис. 1.30 будуємо ВАХ кола збудження при $R_{\text{РЕГ}} = 0$ (пряма 3), з'єднавши початок координат з точкою, яку можна отримати, задавшись певним значенням струму I_3 . Наприклад, при

$I_3 = 2$ А Е.Р.С. $E_{я} = 110 \cdot 2 = 220$ В. Точка перетину характеристики 3 з характеристикою 1 має координати $E_{я} = 255$, $I_3 = 2,32$. Отже, при швидкості обертання $n = 1450$ об/хв в обмотці яколя індукується $E_{я} = 255$ В.

Задача 1.86. Відомі номінальні дані генератора незалежного збудження: $P_{НОМ} = 187$ кВт, $U_{НОМ} = 230$ В, $I_{НОМ} = 775$ А, $R_{я} = 0,0181$ Ом. Номінальна напруга на обмотці збудження $U_{зНОМ} = 100$ В. Характеристика неробочого ходу генератора приведена на рис. 1.32. Визначити опір обмотки збудження R_3 , а також опір регулювального реостата $R_{РЕГ}$, який потрібно підключити в коло збудження, щоб при незмінному опорі навантаження $R_H = 0,297$ Ом напруга на ньому дорівнювала $0,5U_{НОМ}$.

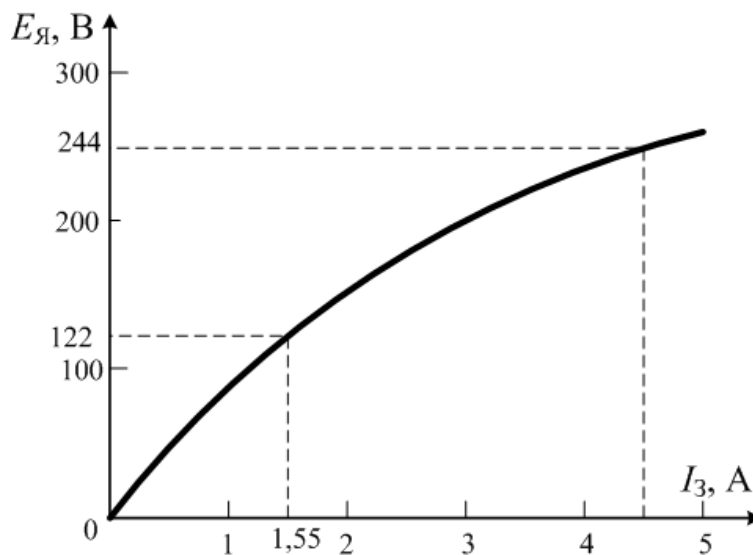


Рис. 1.32

Розв'язання. У генератора з незалежним збудженням через обмотку якоря і навантаження проходить один і той саме струм $I_{\text{яНОМ}} = I_{\text{НОМ}} = 775$ А. Е.Р.С. якоря у номінальному режимі

$$E_{\text{яНОМ}} = U_{\text{НОМ}} + R_{\text{я}} I_{\text{яНОМ}} = 230 + 0,0181 \cdot 775 = 244 \text{ В.}$$

За характеристикою на рис. 1.32 значенню $E_{\text{яНОМ}} = 244$ В відповідає номінальний струм збудження $I_{\text{зНОМ}} = 4,5$ А. Оскільки у номінальному режимі регулювальний опір у колі збудження $R_{\text{РЕГ}} = 0$, то

$$R_3 = \frac{U_{\text{зНОМ}}}{I_{\text{зНОМ}}} = \frac{100}{4,5} = 22 \text{ Ом.}$$

У разі зниження напруги до $U = 0,5U_{\text{НОМ}} = 0,5 \cdot 230 = 115$ В струм у колі навантаження і якоря

$$I = I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{Н}}} \approx \frac{U}{R_{\text{Н}}} = \frac{115}{0,297} = 387,2 \text{ А.}$$

Е.Р.С. обмотки якоря $E_{\text{я}}$ у такому випадку

$$E_{\text{я}} = U + R_{\text{я}} I_{\text{я}} = 115 + 0,0181 \cdot 387,2 = 122 \text{ В.}$$

На рис. 1.32 значенню $E_{\text{я}} = 122$ В відповідає струм збудження $I_3 = 1,55$ А. Сумарний опір обмотки збудження та регулювального реостата

$$R_3 + R_{\text{РЕГ}} = \frac{U_{\text{зНОМ}}}{I_3} = \frac{100}{1,5} = 67 \text{ Ом.}$$

Опір регулювального реостата

$$R_{\text{РЕГ}} = (R_3 + R_{\text{РЕГ}}) - R_3 = 67 - 22 = 45 \text{ Ом.}$$

Задача 1.87. Двигун паралельного збудження, ввімкнений у мережу з напругою $U_{\text{НОМ}} = 220$ В, при номінальному навантаженні споживає струм $I_{\text{НОМ}} = 20,5$ А, у разі неробочого ходу – струм $I_0 = 2,35$ А. Опір обмотки якоря $R_{\text{Я}} = 0,75$ Ом, опір обмотки збудження $R_3 = 258$ Ом. Номінальна швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 1025$ об/хв.

Визначити: номінальну потужність двигуна на валу $P_{2\text{НОМ}}$; номінальний ККД $\eta_{\text{НОМ}}$; номінальний обертовий момент $M_{\text{НОМ}}$; пусковий струм у разі пуску без пускового реостата $I_{\text{ПУС}}$; опір пускового реостата для забезпечення $I_{\text{ПУС}} = 2,5I_{\text{НОМ}}$; пусковий момент при пуску з реостатом.

Побудувати природну механічну характеристику двигуна. При розв'язанні задачі вважати, що механічні та магнітні втрати не залежать від навантаження.

Розв'язання. Потужність, яку споживає з мережі двигун при номінальному навантаженні,

$$P_{1\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}} = 220 \cdot 20,5 = 4510 \text{ Вт.}$$

Струми номінального режиму:

$$\text{у колі збудження } I_{\text{ЗНОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_3} = \frac{220}{258} = 0,85 \text{ А,}$$

$$\text{у колі якоря } I_{\text{ЯНОМ}} = I_{\text{НОМ}} - I_{\text{ЗНОМ}} = 20,5 - 0,85 = 19,65 \text{ А.}$$

Втрати в колі збудження і в обмотці якоря:

$$P_{\text{ЗНОМ}} = R_3 I_{\text{ЗНОМ}}^2 = 258 \cdot 0,85^2 = 186 \text{ Вт,}$$

$$P_{\text{ЯНОМ}} = R_{\text{Я}} I_{\text{ЯНОМ}}^2 = 0,75 \cdot 19,65^2 = 290 \text{ Вт.}$$

Потужність, яку споживає двигун при неробочому ході,

$$P_0 = U_{\text{НОМ}} I_0 = 220 \cdot 2,35 = 517 \text{ Вт.}$$

Втрати в обмотці якоря при неробочому ході

$$P_{я0} = R_{я}(I_0 - I_3) = 0,75(2,35 - 0,85)^2 = 1,7 \text{ Вт.}$$

Механічні та магнітні втрати

$$P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{М}} = P_0 - P_{я0} - P_3 = 517 - 1,7 - 186 = 329,3 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати в двигуні при номінальному навантаженні

$$\Sigma P_{\text{ВТРНОМ}} = P_{\text{ЯНОМ}} + P_{\text{ЗНОМ}} + P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{М}} = 290 + 186 + 329,3 = 805,3 \text{ Вт.}$$

Номінальна потужність на валу

$$P_{\text{НОМ}} = P_{\text{ІНОМ}} - \Sigma P_{\text{ВТРНОМ}} = 4510 - 805,3 = 3704,7 \text{ Вт.}$$

Номінальний ККД

$$\eta_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{P_{\text{ІНОМ}}} = \frac{3704,7}{4510} = 0,82 \text{ або } 82\%.$$

Номінальний обертовий момент (1.98)

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \cdot \frac{3704,7}{1025} = 34,6 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Пусковий струм двигуна (вважають, що $I_{\text{ПУС}} = I_{\text{ЯПУС}}$) у разі пуску без реостата

$$I_{\text{ПУС}} = I_{\text{ЯПУС}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_{я}} = \frac{220}{0,75} = 293 \text{ А.}$$

Опір пускового реостата знаходимо з рівності

$$I_{\text{ЯПУС}} = 2,5I_{\text{ЯНОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_{я} + R_{\text{ПУС}}},$$

звідки

$$R_{\text{ПУС}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{2,5I_{\text{ЯНОМ}}} - R_{я} = \frac{220}{2,5 \cdot 19,65} - 0,75 = 3,73 \text{ Ом.}$$

Пусковий момент двигуна у разі пуску з пусковим реостатом обчислюємо з таких міркувань: відомо, що обертовий момент двигуна визначається рівнянням $M = c_M \Phi I_{\text{я}}$; для режиму номінального навантаження це рівняння набуває вигляду $M_{\text{НОМ}} = c_M \Phi I_{\text{яНОМ}}$, а для пускового режиму $M_{\text{ПУС}} = c_M \Phi I_{\text{яПУС}}$. У двигуна з паралельним збудженням магнітний потік Φ практично сталий, тому можна скласти пропорцію

$$\frac{M_{\text{НОМ}}}{M_{\text{ПУС}}} = \frac{I_{\text{яНОМ}}}{I_{\text{яПУС}}},$$

$$\text{звідки } M_{\text{ПУС}} = M_{\text{НОМ}} \frac{I_{\text{яПУС}}}{I_{\text{яНОМ}}} = 34,6 \cdot \frac{2,5 \cdot 19,65}{19,65} = 86,5 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Природна механічна характеристика $n = f(M)$ для двигуна з паралельним збудженням є прямою, тому для її побудови достатньо двох точок: 1) у режимі неробочого ходу при $M = 0$ швидкість обертання

$$n_0 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{c_E \Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{U_{\text{НОМ}} \cdot n_{\text{НОМ}}}{E_{\text{НОМ}}} = \frac{220 \cdot 1025}{205} = 1100 \text{ об/хв},$$

$$\text{де } E_{\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}} - R_{\text{я}} I_{\text{яНОМ}} = 220 - 0,75 \cdot 19,65 = 205 \text{ В};$$

2) за номінального навантаження частота обертання відома з умови задачі $n_{\text{НОМ}} = 1025 \text{ об/хв}$, а номінальний момент вже розрахований:

$$M_{\text{НОМ}} = 34,6 \text{ Н}\cdot\text{м}. \text{ Характеристика показана на рис. 1.33.}$$

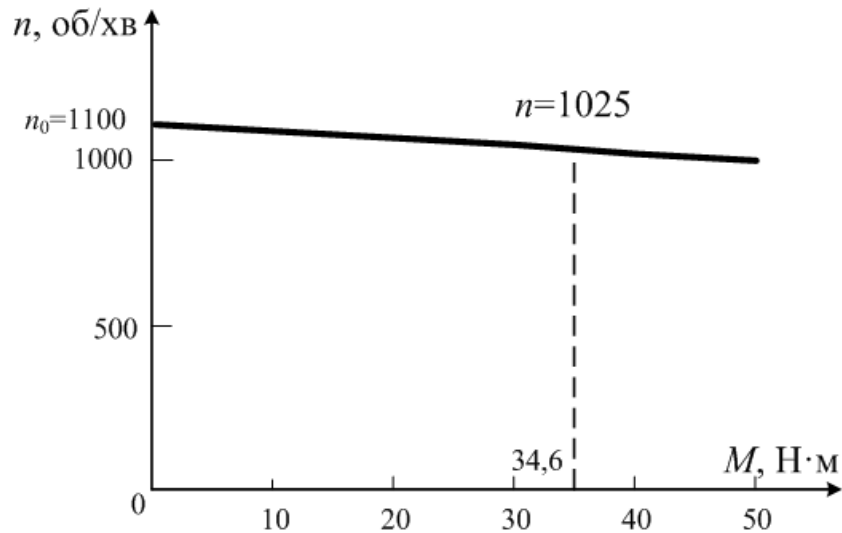


Рис. 1.33

Задача 1.88. Двигун послідовного збудження живиться від мережі з напругою $U = 220$ В. Номінальний обертовий момент двигуна $M_{\text{НОМ}} = 75$ Н·м, номінальна частота обертання $n_{\text{НОМ}} = 1020$ об/хв, опір обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,4$ Ом, опір обмотки збудження $R_3 = 0,3$ Ом, номінальний ККД $\eta_{\text{НОМ}} = 81,5\%$.

Визначити при номінальному навантаженні: потужність на валу $P_{2\text{НОМ}}$; потужність, яку споживає двигун з мережі $P_{1\text{НОМ}}$; струм двигуна $I_{\text{НОМ}}$; Е.Р.С. в обмотці якоря $E_{\text{яНОМ}}$; електромагнітну потужність $P_{\text{ЕМ}}$; втрати в двигуні $P_{\text{ВТРНОМ}}$; опір пускового реостата для забезпечення $I_{\text{ПУС}} = 2I_{\text{НОМ}}$.

Розв'язання. Номінальна потужність двигуна на валу

$$P_{2\text{НОМ}} = \frac{M_{\text{НОМ}} \cdot n_{\text{НОМ}}}{9,55} = \frac{75 \cdot 1020}{9,55} = 8 \text{ кВт.}$$

Споживана з мережі потужність

$$P_{1\text{НОМ}} = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{8}{0,815} = 9,8 \text{ кВт.}$$

Номинальний струм

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{1\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{9,8 \cdot 10^3}{220} = 44,5 \text{ А.}$$

Оскільки двигун має послідовне збудження, то обчислений струм є одночасно струмом якоря і струмом збудження $I_{\text{ЯНОМ}} = I_{\text{ЗНОМ}} = 44,5 \text{ А.}$

Е.Р.С. $E_{\text{я}}$, що наводиться в обмотці якоря,

$$E_{\text{ЯНОМ}} = U_{\text{НОМ}} - (R_{\text{я}} + R_3)I_{\text{ЯНОМ}} = 220 - (0,4 + 0,3) \cdot 44,5 = 188,8 \text{ В.}$$

Електромагнітна потужність (1.92)

$$P_{\text{ЕМ}} = E_{\text{ЯНОМ}}I_{\text{ЯНОМ}} = 188,8 \cdot 44,5 = 8,4 \text{ кВт.}$$

Механічні та магнітні втрати

$$P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{М}} = P_{\text{ЕМНОМ}} - P_{2\text{НОМ}} = 8,4 - 8 = 0,4 \text{ кВт.}$$

Втрати в обмотці якоря і в обмотці збудження:

$$P_{\text{ЯНОМ}} = R_{\text{я}}I_{\text{ЯНОМ}}^2 = 0,4 \cdot 44,5^2 = 792 \text{ Вт,}$$

$$P_{\text{ЗНОМ}} = R_3I_{\text{ЗНОМ}}^2 = 0,3 \cdot 44,5^2 = 595 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати в двигуні (1.94)

$$\Sigma P_{\text{ВТР}} = P_{\text{ЯНОМ}} + P_{\text{ЗНОМ}} + P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{М}} = 795 + 595 + 400 = 1787 \text{ Вт.}$$

Перевіримо отриманий результат:

$$\Sigma P_{\text{ВТРНОМ}} = P_{1\text{НОМ}} - P_{2\text{НОМ}} = 9,8 - 8 = 1,8 \text{ кВт.}$$

Опір пускового реостату визначаємо з рівняння

$$I_{\text{ПУС}} = 2I_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_3 + R_{\text{я}} + R_{\text{ПУС}}},$$

$$\text{звідки } I_{\text{ПУС}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{2I_{\text{НОМ}}} - R_3 - R_{\text{я}} = \frac{220}{2 \cdot 44,5} - 0,3 - 0,4 = 1,77 \text{ Ом.}$$

Задача 1.89. Двигун постійного струму з паралельним збудженням працює при напрузі $U_{\text{НОМ}} = 110$ В і струмі $I_{\text{НОМ}} = 25$ А. Якір двигуна обертається зі швидкістю $n_{\text{НОМ}} = 1500$ об/хв і розвиває на валу обертовий момент $M_{\text{НОМ}} = 14$ Н·м. Опір обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,35$ Ом, опір обмотки збудження $R_{\text{з}} = 110$ Ом. Визначити корисну, споживану, електромагнітну потужності двигуна, а також механічні і магнітні втрати у номінальному режимі. Як зміняться споживаний струм, корисна і споживана потужності, швидкість обертання, ККД у разі зменшення підведеної напруги до 90 В при незмінному обертовому моменті на валу і незмінному струмі збудження?

Розв'язання. Корисна потужність на валу двигуна (1.93)

$$P_{2\text{НОМ}} = \frac{M_{\text{НОМ}} \cdot n_{\text{НОМ}}}{9,55} = \frac{14 \cdot 1500}{9,55} = 2200 \text{ кВт.}$$

Споживана потужність при номінальному навантаженні (1.91)

$$P_{1\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}} \cdot I_{\text{НОМ}} = 110 \cdot 25 = 2750 \text{ Вт.}$$

Струми номінального режиму:

$$\text{у колі збудження } I_{\text{зНОМ}} = U_{\text{НОМ}} / R_{\text{з}} = 110 / 110 = 1 \text{ А;}$$

$$\text{у колі якоря } I_{\text{яНОМ}} = I_{\text{НОМ}} - I_{\text{зНОМ}} = 25 - 1 = 24 \text{ А.}$$

Е.Р.С. обмотки якоря

$$E_{\text{яНОМ}} = U_{\text{НОМ}} - R_{\text{я}} I_{\text{яНОМ}} = 110 - 0,35 \cdot 24 = 101,6 \text{ В.}$$

Електромагнітна потужність

$$P_{\text{ем}} = E_{\text{яНОМ}} I_{\text{яНОМ}} = 101,6 \cdot 24 = 2438,4 \text{ Вт.}$$

Механічні та магнітні втрати

$$P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{М}} = P_{\text{ЕМНОМ}} - P_{\text{2НОМ}} = 2438,4 - 2200 = 238,4 \text{ Вт.}$$

Електричні втрати в обмотках якоря і збудження

$$P_{\text{ЕНОМ}} = P_{\text{1НОМ}} - P_{\text{ЕМНОМ}} = 2750 - 2438,4 = 311,6 \text{ Вт,}$$

$$\text{або } P_{\text{ЕНОМ}} = R_{\text{Я}} I_{\text{ЯНОМ}}^2 + R_{\text{З}} I_{\text{ЗНОМ}}^2 = 201,6 + 110 = 311,6 \text{ Вт.}$$

ККД у номінальному режимі

$$\eta_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{2НОМ}}}{P_{\text{1НОМ}}} = \frac{2200}{2640} = 0,8 \text{ або } 80\%.$$

У разі зниження напруги живлення двигуна при незмінному струмі збудження магнітний потік Φ також залишається незмінним $\Phi_1 = \Phi_{\text{НОМ}}$.

З формули обертового моменту $M = c_{\text{М}} I_{\text{Я}} \Phi$ видно, що при $M = \text{const}$, $\Phi = \text{const}$ струм якоря залишається таким самим $I_{\text{Я1}} = I_{\text{ЯНОМ}} = 24 \text{ А}$.

Швидкість обертання при номінальній напрузі $U_{\text{НОМ}} = 110 \text{ В}$

$$n_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}} - R_{\text{Я}} I_{\text{ЯНОМ}}}{c_{\text{Е}} \Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{110 - 0,35 \cdot 24}{c_{\text{Е}} \Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{101,6}{c_{\text{Е}} \Phi_{\text{НОМ}}},$$

швидкість обертання при напрузі $U_1 = 90 \text{ В}$

$$n_1 = \frac{U_1 - R_{\text{Я}} I_{\text{Я1}}}{c_{\text{Е}} \Phi_1} = \frac{90 - 0,35 \cdot 24}{c_{\text{Е}} \Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{81,6}{c_{\text{Е}} \Phi_{\text{НОМ}}},$$

$$\text{тоді } \frac{n_1}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{81,6}{101,6} = 0,8,$$

$$\text{звідки } n_1 = n_{\text{НОМ}} \cdot 0,8 = 1500 \cdot 0,8 = 1200 \text{ об/хв.}$$

Потужність на валу двигуна (1.93)

$$P_2 = \frac{M_{\text{НОМ}} \cdot n_1}{9,55} = \frac{14 \cdot 1200}{9,55} = 1759 \text{ кВт.}$$

Потужність, яку споживає двигун,

$$P_1 = U_1 I_1 = 90 \cdot 25 = 2250 \text{ Вт.}$$

ККД у разі зниженої напруги

$$\eta_1 = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1759}{2250} = 0,78 \text{ або } 78\% .$$

Висновок: зменшення напруги живлення при незмінних обертовому моменті на валу і струмі збудження призводить до того, що швидкість обертання, корисна потужність та ККД також зменшуються і складають відносно номінального такі значення:

$$n_1 = \frac{n_1}{n_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% = \frac{1200}{1500} \cdot 100\% = 80\% ,$$

$$P_2 = \frac{P_2}{P_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% = \frac{1759}{2200} \cdot 100\% = 80\% ,$$

$$\eta_1 = \frac{\eta_1}{\eta_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% = \frac{0,78}{0,8} \cdot 100\% = 97\% .$$

Задача 1.90. Паспортні дані двигуна постійного струму П12 такі: $P_{\text{НОМ}} = 1 \text{ кВт}$, $U_{\text{НОМ}} = 220 \text{ В}$, $n_{\text{НОМ}} = 3000 \text{ об/хв}$, $I_{\text{ЯНОМ}} = 5,6 \text{ А}$; $R_{\text{Я}} = 2 \text{ Ом}$, $\eta_{\text{НОМ}} = 77\%$. Визначити частоту обертання двигуна у разі неробочого ходу і при номінальному навантаженні, якщо регулювання проводилося шляхом зміни опору в колі збудження і магнітний потік мав три значення: 1) $\Phi_{\text{НОМ}}$, 2) $\Phi_1 = 0,8\Phi_{\text{НОМ}}$, 3) $\Phi_2 = 0,5\Phi_{\text{НОМ}}$.

Розв'язання. Швидкість обертання ротора у разі неробочого ходу (1.100):

1) $\Phi = \Phi_{\text{НОМ}}$

$$n_0 = n_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}} - R_{\text{Я}} I_{\text{ЯНОМ}}} = 3000 \frac{220}{220 - 5,6 \cdot 2} = 3160 \text{ об/хв};$$

$$2) \Phi_1 = 0,8\Phi_{\text{НОМ}}$$

$$n_{01} = n_0 \frac{\Phi_{\text{НОМ}}}{\Phi_1} = 3160 \frac{1}{0,8} = 3950 \text{ об/хв};$$

$$3) \Phi_2 = 0,5\Phi_{\text{НОМ}}$$

$$n_{02} = n_0 \frac{\Phi_{\text{НОМ}}}{\Phi_2} = 3160 \frac{1}{0,5} = 6320 \text{ об/хв}.$$

Спад швидкості обертання між неробочим ходом та номінальним навантаженням:

$$1) \Phi = \Phi_{\text{НОМ}}$$

$$\Delta n_{\text{НОМ}} = n_0 - n_{\text{НОМ}} = 3160 - 3000 = 160 \text{ об/хв};$$

$$2) \Phi_1 = 0,8\Phi_{\text{НОМ}}$$

$$\Delta n_1 = \Delta n_{\text{НОМ}} \left(\frac{\Phi_{\text{НОМ}}}{\Phi_1} \right)^2 = 160 \left(\frac{1}{0,8} \right)^2 = 250 \text{ об/хв};$$

$$3) \Phi_2 = 0,5\Phi_{\text{НОМ}}$$

$$\Delta n_2 = \Delta n_{\text{НОМ}} \left(\frac{\Phi_{\text{НОМ}}}{\Phi_2} \right)^2 = 160 \left(\frac{1}{0,5} \right)^2 = 640 \text{ об/хв}.$$

Швидкість обертання ротора при номінальному моменті на валу і зниженому магнітному потоці:

$$\Phi_1 = 0,8\Phi_{\text{НОМ}}, \quad n_{1\text{НОМ}} = n_{01} - \Delta n_1 = 3950 - 250 = 3700 \text{ об/хв},$$

$$\Phi_2 = 0,5\Phi_{\text{НОМ}}, \quad n_{2\text{НОМ}} = n_{02} - \Delta n_2 = 6320 - 640 = 5680 \text{ об/хв}.$$

Задача 1.91. Двигун паралельного збудження має такі номінальні дані:
 $P_{\text{НОМ}} = 10$ кВт, $U_{\text{НОМ}} = 220$ В, $I_{\text{НОМ}} = 53$ А, $n_{\text{НОМ}} = 1100$ об/хв,
 $\eta_{\text{НОМ}} = 0,86$.

Визначити: Е.Р.С. якоря в номінальному режимі; повний опір пускового реостата $R_{\text{ПУС}}$ для забезпечення початкового пускового моменту $M_{\text{ПУС}} = 2,5M_{\text{НОМ}}$.

Як потрібно змінити магнітний потік Φ , щоб при моменті на валу $M = 45$ Н·м швидкість обертання була $n = 1600$ об/хв? Для обох вказаних режимів побудувати механічну характеристику.

Розв'язання. В умові задачі не вказаний опір кола якоря, тому спочатку обчислюємо $R_{\text{я}}$, скориставшись наближеною формулою (1.105)

$$R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 = \alpha \left(\frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} - P_{\text{НОМ}} \right) \cdot 10^3,$$

в якій для двигунів паралельного збудження приймають коефіцієнт $\alpha = 0,5$:

$$R_{\text{я}} = \frac{\alpha}{I_{\text{НОМ}}^2} \left(\frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} - P_{\text{НОМ}} \right) \cdot 10^3 = \frac{0,5}{53^2} \left(\frac{10}{0,86} - 10 \right) \cdot 10^3 = 0,3 \text{ Ом.}$$

Номінальна Е.Р.С. обмотки якоря

$$E_{\text{яНОМ}} = U_{\text{НОМ}} - R_{\text{я}} I_{\text{яНОМ}} = 220 - 53 \cdot 0,3 \approx 204 \text{ В.}$$

Для побудови природної механічної характеристики використовуємо рівняння

$$n = \frac{U}{c_{\text{Е}} \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{c_{\text{Е}} c_{\text{М}} \Phi^2} M.$$

Спочатку обчислюємо величини $c_E \Phi_{\text{НОМ}}$ і $c_M \Phi_{\text{НОМ}}$, враховуючи співвідношення $E_{\text{Я}} = c_E n \Phi$ і $c_E / c_M = 0,105$:

$$c_E \Phi_{\text{НОМ}} = \frac{E_{\text{ЯНОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{204}{1100} \approx 0,185;$$

$$c_M \Phi_{\text{НОМ}} = \frac{c_E \Phi_{\text{НОМ}}}{0,105} = \frac{0,185}{0,105} = 1,76.$$

Рівняння природної механічної характеристики набуває вигляду

$$n = \frac{220}{0,185} - \frac{0,3}{0,185 \cdot 1,76} M = 1190 - 0,92M.$$

Оскільки характеристика є прямою лінією, то для її побудови необхідно знати координати тільки двох точок. Координати першої точки визначаємо за номінальними даними $n = n_{\text{НОМ}} = 1100$ об/хв,

$$M = M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \cdot 10^4 / 1100 \approx 87 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Координати другої точки простіше за все розрахувати для режиму неробочого ходу:

$$\text{при } M = 0 \quad M_0 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{c_E \Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{220}{0,185} \approx 1190 \text{ об/хв}$$

Природна характеристика зображена прямою 1 на рис. 1.34.

Обчислюємо повний опір пускового реостата, який забезпечує пусковий момент $M_{\text{ПУС}} = 2,5M_{\text{НОМ}}$, беручи до уваги, що у двигуна паралельного збудження струм прямо пропорційний моменту:

$$I_{\text{ПУС}} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{M_{\text{НОМ}}} \cdot M_{\text{ПУС}} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{M_{\text{НОМ}}} \cdot 2,5M_{\text{НОМ}} = 2,5I_{\text{НОМ}} \approx 132 \text{ А};$$

$$R_{\text{Я}} + R_{\text{ПУС}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{ПУС}}} = \frac{220}{132} \approx 1,67 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{ПВС}} = 1,67 - 0,3 = 1,37 \text{ Ом.}$$

Рівняння штучної механічної характеристики має вигляд:

$$n_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{c_{\text{Е}} \Phi_{\text{НОМ}}} - \frac{R_{\text{я}} I_{\text{ПВС}}}{c_{\text{Е}} c_{\text{М}} \Phi_{\text{НОМ}}^2} M = 1190 - 5,13M.$$

Побудувати цю механічну характеристику можна, не користуючись останнім рівнянням, а по двом точкам з координатами:

$$1) n = 0, M_{\text{ПВС}} = 2,5M_{\text{НОМ}} = 2,5 \cdot 87 \approx 218 \text{ Н·м;}$$

$$2) n = n_0 = 1190 \text{ об/хв, } M = 0.$$

Характеристика представлена прямою 2 на рис. 1.34.

Для визначення зменшеного магнітного потоку Φ_1 , який відповідає швидкості обертання $n = 1600$ об/хв, знайдемо спочатку величину $c_{\text{Е}} \Phi_1$, скориставшись рівнянням природної механічної характеристики, в якій $c_{\text{М}}$ замінимо на $c_{\text{Е}}/0,105$:

$$\begin{aligned} c_{\text{Е}} \Phi_1 &= \frac{U_{\text{НОМ}}}{2n_1} + \sqrt{\left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{2n_1}\right)^2 - \frac{0,105M_1 R_{\text{я}}}{n_1}} = \\ &= \frac{220}{2 \cdot 1600} + \sqrt{\left(\frac{220}{2 \cdot 1600}\right)^2 - \frac{0,105 \cdot 45 \cdot 0,3}{1600}} \approx 0,132. \end{aligned}$$

Оскільки за номінального магнітного потоку $c_{\text{Е}} \Phi_{\text{НОМ}} = 0,185$, то магнітний потік потрібно зменшити в

$$\frac{\Phi_{\text{НОМ}}}{\Phi_1} = \frac{c_{\text{Е}} \Phi_{\text{НОМ}}}{c_{\text{Е}} \Phi_1} = \frac{0,185}{0,132} = 1,4 \text{ рази.}$$

У такому випадку струм якоря

$$I_{\text{я1}} = \frac{M_1}{c_{\text{М}} \Phi_1} = \frac{M_1 \cdot 0,105}{c_{\text{Е}} \Phi_1} = \frac{45 \cdot 0,105}{0,132} \approx 36 \text{ А.}$$

Рівняння механічної характеристики у разі зменшеного магнітного потоку

$$n_1 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{c_M \Phi_1} - \frac{R_{\text{я}}}{c_E c_M \Phi_1^2} M = \frac{220}{0,132} - \frac{0,3}{0,132 \cdot 1,26} M = 1670 - 1,8M.$$

Цю механічну характеристику будемо по двом точкам з відомими координатами: 1) $M = 45 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $n = 1600 \text{ об/хв}$; 2) $M = 0$, $n_{10} = 1670 \text{ об/хв}$, (пряма 3 на рис. 1.34).

Задача 1.92. Двигун послідовного збудження має такі номінальні дані: $P_{\text{НОМ}} = 12,5 \text{ кВт}$, $U_{\text{НОМ}} = 220 \text{ В}$, $n_{\text{НОМ}} = 630 \text{ об/хв}$, $I_{\text{яНОМ}} = 72 \text{ А}$, $R_{\text{я}} = 0,4 \text{ Ом}$. Розрахувати та побудувати у відносних одиницях:

- графік залежності струму якоря від обертового моменту $I_{\text{я}}/I_{\text{яНОМ}} = f(M/M_{\text{НОМ}})$;
- природну механічну характеристику $n/n_{\text{НОМ}} = f(M/M_{\text{НОМ}})$;

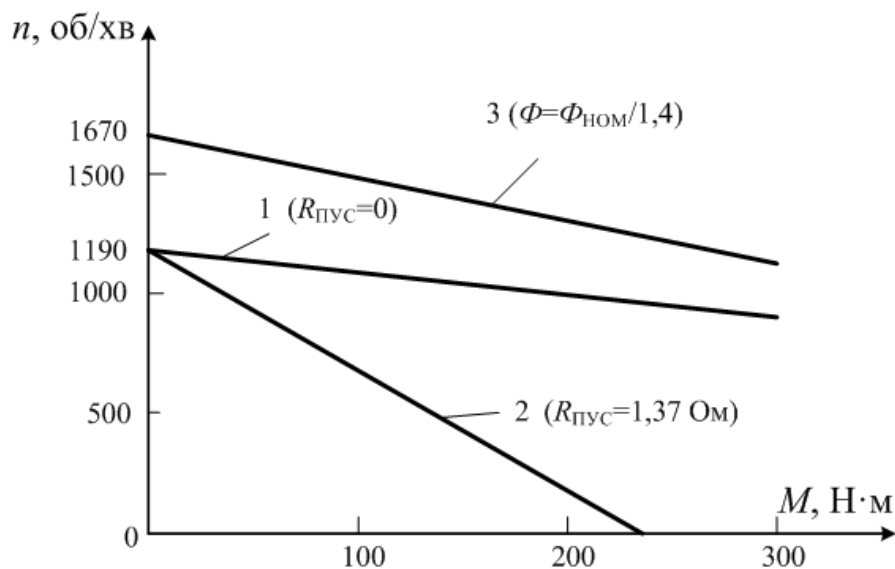


Рис. 1.34

- штучну механічну характеристику у випадку ввімкнення регулювального реостата, який забезпечує швидкість обертання $n = 0,5n_{\text{НОМ}}$ при номінальному моменті на валу.

При розрахунках вважати, що обертовий момент двигуна змінюється в межах від $M_{\text{min}} = 0,25M_{\text{НОМ}}$ до $M_{\text{max}} = 0,25M_{\text{НОМ}}$. Залежність між струмом збудження і магнітним потоком показано на рис. 1.35

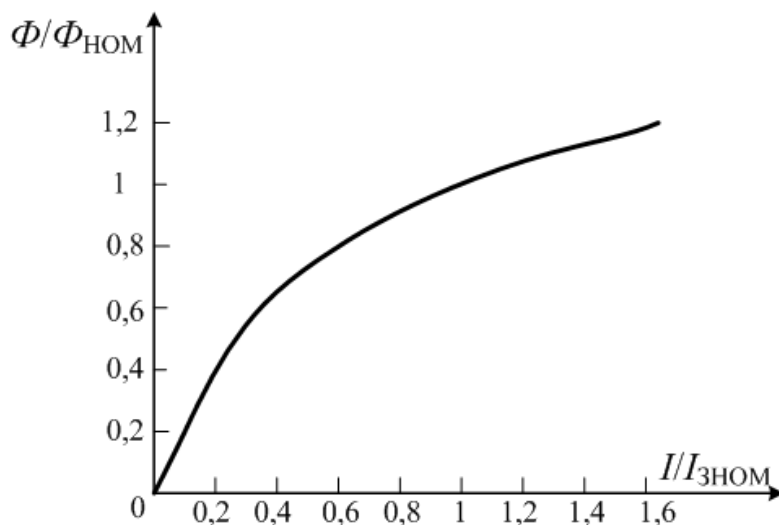


Рис. 1.35

Розв’язання. Струм якоря визначається моментом на валу $I_{\text{я}} = M/c_{\text{м}}\Phi$, у номінальному режимі $I_{\text{яНОМ}} = M_{\text{НОМ}}/c_{\text{м}}\Phi_{\text{НОМ}}$.

Розділивши першу рівність на другу, отримуємо:

$$\frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{яНОМ}}} = \frac{M}{M_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{\Phi_{\text{НОМ}}}{\Phi} \quad \text{або} \quad \frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{яНОМ}}} \cdot \frac{\Phi}{\Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{M}{M_{\text{НОМ}}}$$

У двигуна послідовного збудження струм якоря є одночасно струмом збудження $I_{\text{з}}/I_{\text{зНОМ}} = I_{\text{я}}/I_{\text{яНОМ}}$, тому наступні розрахунки виконуємо, користуючись графіком на рис. 1.35. Задаємося відношенням $I_{\text{я}}/I_{\text{яНОМ}}$ і по кривій на рис. 1.35 знаходимо відношення $\Phi/\Phi_{\text{НОМ}}$, потім

розраховуємо добуток $\frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{яном}}} \cdot \frac{\Phi}{\Phi_{\text{ном}}}$, що дорівнює відношенню моментів

$M/M_{\text{ном}}$. Наприклад, $I_{\text{я}}/I_{\text{яном}} = 0,2$, $\Phi/\Phi_{\text{ном}} = 0,37$,

$M/M_{\text{ном}} = 0,2 \cdot 0,37 = 0,074$. За результатами розрахунків побудований графік залежності $I_{\text{я}}/I_{\text{яном}} = f(M/M_{\text{ном}})$, який показано на рис. 1.36.

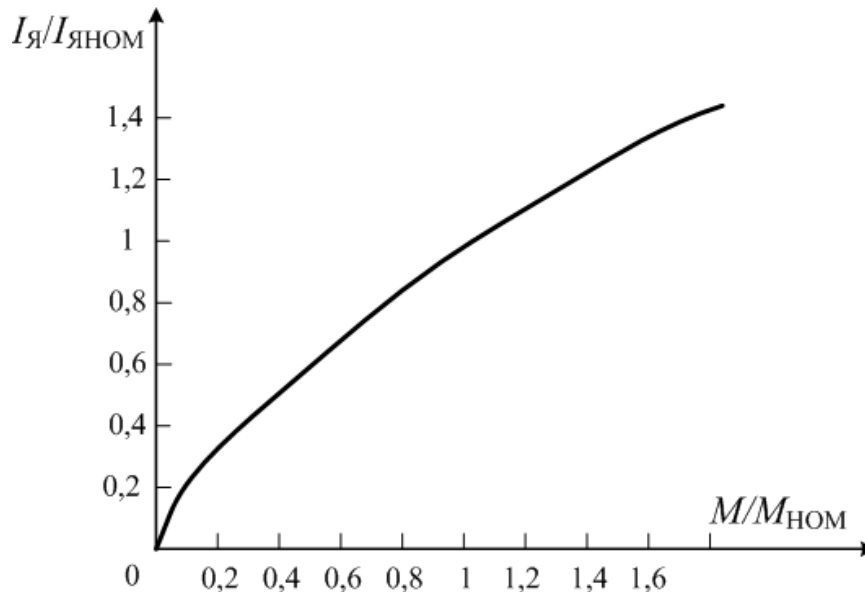


Рис. 1.36

Для побудови природної механічної характеристики виконуємо ряд математичних операцій.

Швидкість обертання якоря при номінальному навантаженні

$$n_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}} - R_{\text{я}} I_{\text{яном}}}{c_{\text{Е}} \Phi_{\text{ном}}},$$

швидкість обертання якоря при навантаженні, відмінному від номінального,

$$n = \frac{U_{\text{ном}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{c_{\text{Е}} \Phi}.$$

Останню формулу запишемо у дещо зміненому вигляді:

$$n = \frac{U_{\text{НОМ}} - R_{\text{Я}} (I_{\text{Я}} / I_{\text{ЯНОМ}}) I_{\text{ЯНОМ}}}{c_{\text{Е}} (\Phi / \Phi_{\text{НОМ}}) \Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{U_{\text{НОМ}} - k_I R_{\text{Я}} I_{\text{ЯНОМ}}}{c_{\text{Е}} k_{\Phi} \Phi_{\text{НОМ}}} =$$

$$= \frac{U_{\text{НОМ}} - k_I R_{\text{Я}} I_{\text{ЯНОМ}}}{c_{\text{Е}} k_{\Phi} \Phi_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{n_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{U_{\text{НОМ}} - k_I R_{\text{Я}} I_{\text{ЯНОМ}}}{k_{\Phi} E_{\text{НОМ}}} \cdot n_{\text{НОМ}},$$

де $k_I = \frac{I_{\text{Я}}}{I_{\text{ЯНОМ}}}$, $k_{\Phi} = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{НОМ}}}$, $E_{\text{НОМ}} = c_{\text{Е}} \Phi_{\text{НОМ}} n_{\text{НОМ}}$.

Тоді

$$\frac{n}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{U_{\text{НОМ}} - k_I R_{\text{Я}} I_{\text{ЯНОМ}}}{k_{\Phi} E_{\text{НОМ}}} = \frac{220 - k_I \cdot 0,4 \cdot 72}{k_{\Phi} (U_{\text{НОМ}} - R_{\text{Я}} I_{\text{ЯНОМ}})} = \frac{220 - k_I \cdot 28,8}{k_{\Phi} \cdot 191,2}.$$

Задаючись значенням $M/M_{\text{НОМ}}$, по кривій на рис. 1.36 знаходимо відповідне значення $I_{\text{Я}}/I_{\text{ЯНОМ}} = k_I$, потім за відомим значенням $I_{\text{Я}}/I_{\text{ЯНОМ}}$ по кривій на рис. 1.35 визначаємо $\Phi/\Phi_{\text{НОМ}} = k_{\Phi}$. Підставивши коефіцієнти k_I і k_{Φ} в останню формулу, розраховуємо відношення $n/n_{\text{НОМ}}$, яке відповідає заданому значенню $M/M_{\text{НОМ}}$. Наприклад, $M/M_{\text{НОМ}} = 0,25$, по кривій на рис. 1.36 $k_I = I/I_{\text{НОМ}} = 0,4$, по кривій на рис. 1.35 $k_{\Phi} = \Phi/\Phi_{\text{НОМ}} = 0,65$, тоді

$$\frac{n}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{220 - 0,4 \cdot 28,8}{0,65 \cdot 191,2} = 1,67.$$

За результатами розрахунків на рис. 1.37 побудовано природну механічну характеристику у відносних одиницях (крива 1).

Для побудови штучної механічної характеристики спочатку визначаємо опір регулювального реостату $R_{\text{РЕГ}}$, який забезпечує швидкість обертання $n = 0,5n_{\text{НОМ}}$:

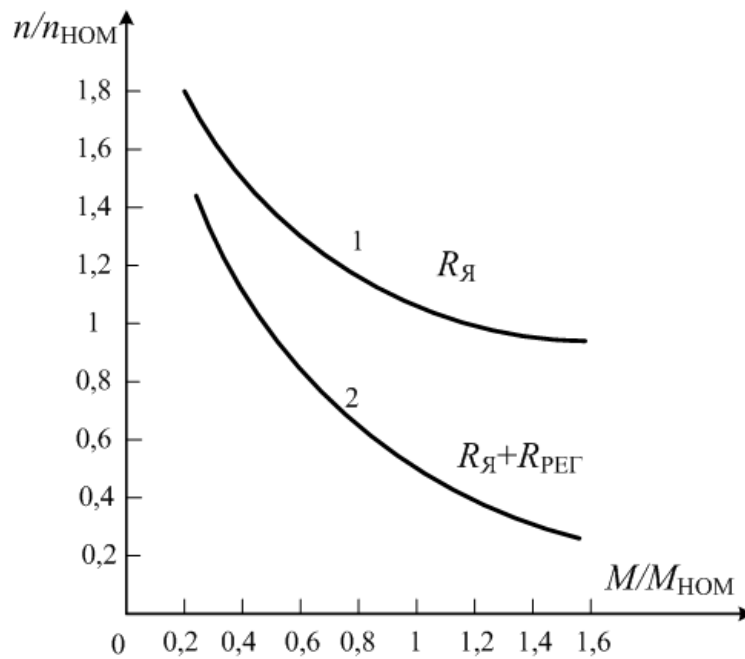


Рис. 1.37

$$0,5n_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}} - (R_{\text{я}} + R_{\text{РЕГ}})I_{\text{яНОМ}}}{c_{\text{E}}\Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{U_{\text{НОМ}} - R_{\text{я}}I_{\text{яНОМ}} - R_{\text{РЕГ}}I_{\text{яНОМ}}}{c_{\text{E}}\Phi_{\text{НОМ}}} =$$

$$= \frac{E_{\text{яНОМ}} - R_{\text{РЕГ}}I_{\text{яНОМ}}}{c_{\text{E}}\Phi_{\text{НОМ}}},$$

звідки $0,5n_{\text{НОМ}} \cdot c_{\text{E}}\Phi_{\text{НОМ}} = E_{\text{яНОМ}} - R_{\text{РЕГ}}I_{\text{яНОМ}},$

$$0,5E_{\text{НОМ}} = E_{\text{яНОМ}} - R_{\text{РЕГ}}I_{\text{яНОМ}},$$

$$R_{\text{РЕГ}} = \frac{0,5E_{\text{яНОМ}}}{I_{\text{яНОМ}}} = \frac{0,5 \cdot 191,2}{72} = 1,33 \text{ Ом.}$$

Рівняння штучної характеристики набуває вигляду

$$\frac{n}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{220 - k_{\text{I}}(R_{\text{я}} + R_{\text{РЕГ}})I_{\text{яНОМ}}}{k_{\Phi}E_{\text{НОМ}}} = \frac{220 - k_{\text{I}} \cdot 124,5}{k_{\Phi} \cdot 191,2}.$$

Розрахунки точок графіка штучної механічної характеристики (рис. 1.37) проводимо так само, як природної.

Задача 1.93. У системі генератор-двигун для регулювання частоти обертання двигуна постійного струму П12 планується використовувати генератор з незалежним збудженням. Паспортні дані двигуна такі: $P_{\text{НОМ}} = 1$ кВт, $U_{\text{НОМ}} = 220$ В, $n_{\text{НОМ}} = 3000$ об/хв, $I_{\text{ЯНОМ}} = 5,9$ А, $R_{\text{Я}} = 2$ Ом, $\eta = 77\%$. Вибрати генератор і визначити межі регулювання частоти обертання від максимального до мінімального значення у випадку неробочого ходу і при номінальному навантаженні.

Розв'язання. При виборі генератора, який буде використовуватися у системі генератор-двигун, необхідно брати до уваги, що номінальна потужність генератора повинна дорівнювати або перевищувати споживану потужність двигуна з урахуванням можливих перевантажень.

Потужність, яка споживається двигуном у номінальному режимі,

$$P_{\text{ІНОМ}} = U_{\text{НОМ}} I_{\text{ЯНОМ}} = 220 \cdot 5,9 = 1298 \text{ Вт} \approx 1,3 \text{ кВт.}$$

Вибираємо генератор потужністю не менше 1,3 кВт, напругою 230 В і номінальним струмом більше, ніж 6 А. Зазначеним вимогам відповідає генератор типу П22, який має такі паспортні дані: $P_{\text{НОМ}} = 1,6$ кВт, $U_{\text{НОМ}} = 230$ В, $I_{\text{НОМ}} = 7$ А, $\eta = 83,5\%$, опір обмотки якоря $R_{\text{Я}} = 1,55$ Ом.

Загальний опір кола якоря генератора і двигуна (обмотки якорів генератора та двигуна з'єднані послідовно)

$$R = R_{\text{ЯД}} + R_{\text{ЯГ}} = 2 + 1,55 = 3,55 \text{ Ом.}$$

Е.Р.С. генератора у номінальному режимі

$$E_{\text{Г}} = U_{\text{ГНОМ}} + R_{\text{ЯГ}} I_{\text{ЯГ}} = 230 + 7 \cdot 1,55 = 240,85 \text{ В.}$$

Напруга на виході генератора за номінального навантаження двигуна

$$U_{\Gamma} = E_{\Gamma} + R \cdot I_{\text{я}\Gamma} = 240,85 - 3,55 \cdot 5,9 = 220,97 \text{ В,}$$

що відповідає номінальній напрузі двигуна.

Для визначення швидкості обертання двигуна у різних режимах розраховуємо добуток сталої двигуна і магнітного потоку:

$$c_E \Phi_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}} - R_{\text{яд}} I_{\text{яНОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{220 - 2 \cdot 5,9}{3000} = 0,0694 \text{ Вб.}$$

Максимальна швидкість обертання двигуна у випадку неробочого ходу

$$n_{0max} = \frac{E_{\Gamma}}{c_E \Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{240,85}{0,0694} = 3470 \text{ об/хв.}$$

Мінімальну швидкість обертання двигуна у разі неробочого ходу знаходимо по мінімальному значенню Е.Р.С. генератора, при якому двигун починає обертатися. Припустимо, що пусковий струм двигуна $I_{\text{ПУС}} = 1,5 I_{\text{НОМ}}$, тоді мінімальна Е.Р.С. генератора, необхідна для приведення двигуна в рух,

$$E_{\Gamma min} = 1,5 I_{\text{ДНОМ}} \cdot R = 1,5 \cdot 5,9 \cdot 3,55 = 31,4 \text{ В.}$$

Мінімальна частота обертання двигуна:

у разі неробочого ходу

$$n_{0min} = \frac{E_{\Gamma min}}{c_E \Phi} = \frac{31,4}{0,0694} = 452 \text{ об/хв.};$$

при номінальному навантаженні

$$n_{min} = \frac{E_{\Gamma min} - R I_{\text{ДНОМ}}}{c_E \Phi} = \frac{31,4 - 5,9 \cdot 3,55}{0,0694} = 150 \text{ об/хв.}$$

Таким чином, при зміні напруги на виході генератора частота обертання двигуна у разі неробочого ходу змінюється від 3470 об/хв до

452 об/хв, а за номінального навантаження на валу від 3000 об/хв до 150 об/хв.

Вихідна потужність генератора у випадку номінального навантаження двигуна

$$P_{2Г} = U_{Г} I_{\text{ДНОМ}} = 220,97 \cdot 5,9 = 1303 \text{ Вт.}$$

Потужність, яка споживається генератором від первинного двигуна,

$$P_{1Г} = \frac{P_{2Г}}{\eta_{Г}} = \frac{1303}{0,82} = 1590 \text{ Вт.}$$

Для визначення потужності первинного двигуна, який обертає вал генератора, слід врахувати можливі перевантаження. Припустимо, що вони не будуть перевищувати 30% від номінального струму двигуна, тоді

$$P_{1Г} = \frac{P_{2Г}}{\eta_{Г}} = \frac{U_{Г} 1,3 I_{\text{ДНОМ}}}{0,835} = \frac{220,97 \cdot 1,3 \cdot 5,9}{0,835} = 2030 \text{ Вт.}$$

1.4.4. Задачі для самостійного розв'язання

1.94. Е.Р.С. генератора паралельного збудження $E_{я} = 120 \text{ В}$, опір кола якоря $R_{я} = 0,2 \text{ Ом}$, опір кола збудження $R_{з} = 36 \text{ Ом}$, опір навантаження $R_{н} = 10 \text{ Ом}$. Розрахувати напругу на виході генератора; струм у колі якоря; струм у колі збудження; струм у навантаженні; потужність, яку генератор віддає у навантаження.

1.95. Для генератора з паралельним збудженням відомі такі дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 50 \text{ кВт}$, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 115 \text{ В}$, опір кола якоря $R_{я} = 0,09 \text{ Ом}$, опір кола збудження

$R_3 = 11 \text{ Ом}$. Визначити струми збудження, якоря, навантаження; Е.Р.С. генератора; втрати в колі якоря і в колі збудження.

1.96. Генератор з паралельним збудженням живить лампи розжарювання, загальний опір яких $R = 3 \text{ Ом}$. Напряга на виході генератора $U = 114 \text{ В}$, опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,1 \text{ Ом}$, струм збудження $I_3 = 2 \text{ А}$. Знайти Е.Р.С. і струм в обмотці якоря; електромагнітну і корисну потужності генератора.

1.97. Генератор паралельного збудження має такі паспортні дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 14 \text{ кВт}$, номінальна напряга $U_{\text{НОМ}} = 115 \text{ В}$, номінальна швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 2850 \text{ об/хв}$, опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,03 \text{ Ом}$, опір кола збудження $R_3 = 57,5 \text{ Ом}$. Механічні та магнітні втрати складають 5% від номінальної потужності генератора. Розрахувати Е.Р.С. і струм в обмотці якоря; номінальний обертовий момент; ККД генератора.

1.98. Генератор послідовного збудження при напрузі $U_{\text{НОМ}} = 220 \text{ В}$ і струмі $I_{\text{НОМ}} = 20 \text{ А}$ працює з ККД $\eta = 94\%$. Визначити Е.Р.С., яка наводиться в обмотці якоря; опір кола якоря; опір навантаження; корисну потужність генератора.

1.99. При напрузі $U = 230 \text{ В}$ струм генератора паралельного збудження $I = 60,87 \text{ А}$. Відомо, що втрати в колі якоря складають 4%, а в колі збудження 5% від корисної потужності генератора. Знайти опір і струм кола збудження; Е.Р.С. в обмотці якоря; опір і струм кола якоря.

1.100. Генератор паралельного збудження має такі паспортні дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 50 \text{ кВт}$, номінальна напряга $U_{\text{НОМ}} = 230 \text{ В}$, номінальна швидкість обертання якоря $n_{\text{НОМ}} = 1450 \text{ об/хв}$, опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,01 \text{ Ом}$, опір кола збудження

$R_3 = 11 \text{ Ом}$, ККД $\eta_{\text{НОМ}} = 87\%$. Обчислити Е.Р.С. і струм якоря; струм обмотки збудження; втрати в колі якоря і в колі збудження; механічні та магнітні втрати.

1.101. Для чотириполюсного генератора паралельного збудження відомі такі дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 7,2 \text{ кВт}$, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 230 \text{ В}$, опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,2 \text{ Ом}$, опір кола збудження $R_3 = 65,7 \text{ Ом}$, число активних провідників обмотки якоря $N = 240$, число пар паралельних гілок $a = 2$, магнітний потік $\Phi = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$. Розрахувати номінальну частоту обертання якоря.

1.102. Генератор паралельного збудження має такі паспортні дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 14 \text{ кВт}$, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 115 \text{ В}$, номінальна швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 2850 \text{ об/хв}$, магнітний потік $\Phi_{\text{НОМ}} = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$, число активних провідників обмотки якоря $N = 120$, число пар паралельних гілок $a = 2$, кількість пар полюсів $p = 2$, струм збудження $I_{\text{зНОМ}} = 4 \text{ А}$. Розрахувати опори кола якоря і кола збудження; Е.Р.С. $E_{\text{я}}$; струм якоря і струм генератора за номінальної потужності.

1.103. Якір чотириполюсного генератора з паралельним збудженням має в обмотці число активних провідників $N = 252$, кількість пар паралельних гілок $a = 2$. Опір обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,1 \text{ Ом}$, магнітний потік $\Phi_{\text{НОМ}} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$, струм збудження $I_{\text{зНОМ}} = 5 \text{ А}$, швидкість обертання якоря $n_{\text{яНОМ}} = 1450 \text{ об/хв}$. Визначити напругу і потужність на виході генератора, якщо струм навантаження $I_{\text{НОМ}} = 65 \text{ А}$.

1.104. Генератор незалежного збудження має такі номінальні дані: потужність $P_{\text{НОМ}} = 25 \text{ кВт}$, напруга $U_{\text{НОМ}} = 230 \text{ В}$, струм $I_{\text{НОМ}} = 209 \text{ А}$,

швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 1450$ об/хв, ККД $\eta_{\text{НОМ}} = 0,87$, струм збудження $I_{\text{ЗНОМ}} = 2$ А. Побудувати зовнішню характеристику генератора. Розрахувати зміну напруги генератора при переході від номінального навантаження до неробочого ходу.

1.105. Двигун паралельного збудження, ввімкнений у мережу з напругою $U = 220$ В, працює з ККД $\eta = 80\%$ і обертається зі швидкістю $n_{\text{НОМ}} = 750$ об/хв. Номінальний струм двигуна $I_{\text{НОМ}} = 63$ А, Е.Р.С. в обмотці якоря $E_{\text{я}} = 209$ В, опір обмотки збудження $R_{\text{з}} = 88$ Ом. Обчислити струм якоря $I_{\text{я}}$; опір кола якоря $R_{\text{я}}$; корисну потужність на валу P_2 ; обертовий момент M .

1.106. Двигун паралельного збудження має такі паспортні дані: номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 220$ В, номінальний струм $I_{\text{НОМ}} = 55$ А, номінальна швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 1500$ об/хв, номінальний струм збудження $I_{\text{ЗНОМ}} = 5$ А, опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,02$ Ом. Знайти швидкість обертання двигуна, якщо напруга зменшиться до 180 В, а струм збудження і гальмівний момент залишаться незмінними.

1.107. Чотириполюсний двигун паралельного збудження, ввімкнений у мережу з напругою $U = 220$ В, працює з ККД $\eta = 0,82$ і споживає струм $I = 78$ А. Магнітний потік $\Phi = 2,2 \cdot 10^{-2}$ Вб, опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,171$ Ом, струм обмотки збудження $I_{\text{з}} = 2,5$ А. Число провідників обмотки якоря $N = 600$, кількість пар паралельних гілок $a = 2$. Визначити обертовий момент на валу і швидкість обертання якоря при номінальному навантаженні та при неробочому ході.

1.108. Двигун паралельного збудження має такі паспортні дані: $P_{\text{НОМ}} = 4,5$ кВт, $U_{\text{НОМ}} = 220$ В, $n_{\text{НОМ}} = 3000$ об/хв, $I_{\text{НОМ}} = 24,3$ А, $\eta_{\text{НОМ}} = 0,84$, опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,265$ Ом, опір обмотки збудження $R_{\text{з}} = 417$ Ом. Розрахувати потужність, яку споживає двигун; електричні втрати в обмотках якоря та збудження; механічні та магнітні втрати; електромагнітну потужність; обертовий момент на валу; швидкість обертання у разі неробочого ходу; опір пускового реостата за умови, що $I_{\text{ПУС}} = 2,5I_{\text{НОМ}}$.

1.109. Двигун послідовного збудження, ввімкнений у мережу з напругою $U = 220$ В, обертається зі швидкістю $n = 1000$ об/хв. Число провідників обмотки якоря $N = 180$, число пар паралельних гілок $a = 2$, кількість пар полюсів машини $p = 2$. Струм якоря $I_{\text{я}} = 100$ А, магнітний потік $\Phi = 7,1 \cdot 10^{-2}$ Вб. Обчислити Е.Р.С. $E_{\text{я}}$; опір кола якоря $R_{\text{я}}$; обертовий момент на валу.

1.110. Двигун послідовного збудження, ввімкнений у мережу з напругою $U = 220$ В, обертається зі швидкістю $n = 1500$ об/хв і має ККД $\eta = 89,5\%$. Обертовий момент на валу $M = 477,5$ Н·м, опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,02$ Ом. Визначити потужність, яку споживає двигун; корисну потужність на валу; струм якоря; втрати в колі якоря; електрорушійну силу, наведену в обмотці якоря.

1.111. Двигун послідовного збудження ввімкнений у мережу з напругою $U = 220$ В. При швидкості обертання $n = 1500$ об/хв і споживаному струмі $I = 60$ А двигун розвиває на валу обертовий момент $M = 70$ Н·м; при швидкості обертання $n = 1000$ об/хв і споживаному струмі $I = 90$ А він розвиває обертовий момент $M = 162$ Н·м. Розрахувати

співвідношення споживаних потужностей; корисних потужностей на валу; струмів; ККД.

1.112. Двигун мішаного збудження живиться від мережі з напругою $U = 220$ В, споживає з мережі потужність $P = 75$ кВт при ККД $\eta = 89,5\%$ і обертається зі швидкістю $n = 1500$ об/хв. Опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,2$ Ом, струм у паралельній обмотці збудження $I_3 = 4,5$ А. Розрахувати струм I , який двигун споживає з мережі; потужність P_2 на валу; обертовий момент M .

1.113. Чотиріполюсний двигун мішаного збудження живиться від мережі з напругою $U = 220$ В, споживає струм $I = I_{\text{НОМ}} = 172$ А і обертається зі швидкістю $n_{\text{НОМ}} = 964$ об/хв. Опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,068$ Ом, опір паралельного кола збудження $R_3 = 44$ Ом. Число провідників обмотки якоря $N = 276$, число пар паралельних гілок $a = 2$. Механічні та магнітні втрати $P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{М}} = 1544$ Вт. Визначити струм якоря $I_{\text{я}}$; Е.Р.С. обмотки якоря $E_{\text{я}}$; електромагнітну потужність $P_{\text{ЕМ}}$; потужність на валу P_2 ; ККД η .

1.114. Відомі паспортні дані двигуна: $P_{\text{НОМ}} = 5$ кВт, $U_{\text{НОМ}} = 220$ В, $I_{\text{НОМ}} = 3$ А, $n_{\text{НОМ}} = 955$ об/хв, $R_{\text{я}} = 0,66$ Ом. Обчислити швидкість обертання у разі неробочого ходу і за номінального навантаження, якщо регулювання швидкості обертання здійснювалося зміною магнітного потоку від $\Phi_{\text{НОМ}}$ до $\Phi_1 = 0,5\Phi_{\text{НОМ}}$.

1.115. Двигун має такі паспортні дані: число провідників у якорі $N = 120$, число пар полюсів і пар паралельних гілок $p = a = 2$, струм якоря $I_{\text{яНОМ}} = 62,8$ А, номінальна швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 2000$ об/хв.

Знайти швидкість обертання у разі неробочого ходу і за номінального моменту, якщо регулювання швидкості обертання проводилося шляхом зміни магнітного потоку від $\Phi_{\text{НОМ}} = 5 \cdot 10^{-2}$ Вб до $\Phi_1 = 2,5 \cdot 10^{-2}$ Вб.

1.116. Двигун з паралельним збудженням має такі паспортні дані: номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 55$ кВт, номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 220$ В, номінальний ККД $\eta_{\text{НОМ}} = 89\%$, опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,04$ Ом, опір кола збудження $R_3 = 54$ Ом. Розрахувати опір реостата, який потрібно підключити в коло якоря, щоб за незмінного струму збудження і номінального моменту на валу швидкість обертання зменшилася у два рази.

1.117. Для двигуна з послідовним збудженням відомі: номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 220$ В, номінальний струм $I_{\text{НОМ}} = 50$ А, номінальний обертовий момент $M_{\text{НОМ}} = 60$ Н·м, номінальна швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 1500$ об/хв, номінальний ККД $\eta_{\text{НОМ}} = 0,857$. Опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,2$ Ом. Визначити якими будуть швидкість обертання, корисна потужність і ККД, якщо в коло якоря підключити реостат з опором $R = 0,8$ Ом. Обертовий момент на валу вважати незмінним.

1.118. Двигун паралельного збудження з номінальною напругою $U_{\text{НОМ}} = 220$ В, струмом $I_{\text{НОМ}} = 59,8$ А, швидкістю обертання $n_{\text{НОМ}} = 1500$ об/хв, струмом збудження $I_{\text{ЗНОМ}} = 1,34$ А і ККД $\eta_{\text{НОМ}} = 0,8$ використовують у режимі генератора паралельного збудження. Опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,183$ Ом. Яку швидкість обертання повинен мати первинний двигун, щоб при незмінних струмах збудження і навантаження напруга на виході генератора становила $U = 220$ В ?

1.4.5. Завдання на індивідуальну розрахунково-графічну роботу

Завдання 1 (варіанти 0-25)

Для двигуна паралельного збудження відомі такі дані: номінальна напруга $U_{\text{НОМ}}$; струм при номінальному навантаженні $I_{\text{НОМ}}$; струм неробочого ходу I_0 ; номінальна швидкість обертання $n_{\text{НОМ}}$; опір кола якоря $R_{\text{я}}$; опір кола збудження R_3 . Магнітні та механічні втрати вважати незмінними в усіх режимах роботи двигуна.

Визначити:

номінальну потужність двигуна $P_{2\text{НОМ}}$ на валу;

номінальний обертовий момент $M_{\text{НОМ}}$;

номінальний ККД $\eta_{\text{НОМ}}$;

величину пускового моменту при $I_{\text{ПВС}} = 2I_{\text{НОМ}}$;

швидкість обертання якоря при підключенні в коло збудження регульовального реостата з опором $R_{\text{РЕГ}} = 3R_3$.

Побудувати природну та штучну механічні характеристики двигуна. Дані для розрахунків наведено в таблиці 1.15.

Завдання 2 (варіанти 26-50)

Для двигуна паралельного збудження відомі: номінальна напруга $U_{\text{НОМ}}$; номінальна потужність на валу $P_{\text{НОМ}}$; номінальна швидкість обертання якоря $n_{\text{НОМ}}$; номінальний ККД $\eta_{\text{НОМ}}$. Втрати потужності в колі

якоря $P_{\text{я}}$ і в колі збудження P_3 задані у відсотках від потужності $P_{\text{НОМ}}$, яка споживається двигуном.

Визначити:

струм у колі збудження і в колі якоря при номінальному навантаженні;

пусковий обертовий момент у разі пуску двигуна з пусковим реостатом $R_{\text{ПУС}}$;

швидкість обертання якоря за номінального моменту на валу;

швидкість обертання якоря при підключенні в коло якоря регульовального реостата з опором $R_{\text{РЕГ}} = 3R_{\text{я}}$.

Побудувати природну та штучну механічні характеристики.

Дані для розрахунків подано в таблиці 1.16.

Таблиця 1.15

№ варіанта	Дані для розрахунків					
	$U_{\text{НОМ}}, \text{В}$	$I_{\text{НОМ}}, \text{А}$	$I_0, \text{А}$	$R_{\text{я}}, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$n_{\text{НОМ}}, \text{об/хв}$
0	220	15	1,6	1,2	180	1025
1	220	53	6,3	0,212	33	1225
2	115	100	9,5	0,11	50	1000
3	110	267	30,0	0,04	27,5	1100
4	220	16,3	1,78	1,16	75	1025
5	110	7,8	0,7	0,8	210	1240
6	220	19,9	2,0	1,5	150	960
7	110	35	3,2	0,6	60	1400
8	220	32	2,8	0,94	120	1600

9	220	34	3,0	0,45	110	1100
10	110	9,5	0,9	1,9	200	850
11	110	20	1,8	0,7	80	940
12	220	15	1,5	0,82	200	1350
13	110	8,2	0,8	1,4	220	1450
14	220	20,5	2,35	0,74	258	1025
15	220	40	4,2	0,52	190	1420
16	110	10,5	1,2	1,2	160	960
17	110	18,6	2,0	0,9	120	825
18	220	16	1,8	0,6	270	1600
19	220	32	3,5	0,62	200	1350
20	110	28	3,2	0,55	80	875
21	110	25	2,6	0,58	90	1110
22	220	60	6,8	0,40	130	935
23	220	50	5,7	0,40	150	1340
24	220	102	9,5	0,12	110	750
25	220	151	15	0,07	75	1000

Таблиця 1.16

№ варіанта	Дані для розрахунків					
	$U_{НОМ}$, В	$P_{НОМ}$, кВт	$\Delta P_{Я}$, %	$\Delta P_{З}$, %	$n_{НОМ}$, об/хв	$\eta_{НОМ}$, %
26	110	60	5,2	4,8	980	86,5
27	220	10	5,0	4,8	2250	86,0
28	220	4,0	6,2	4,2	1025	82,2
29	220	6,6	6,2	4,1	2400	85,5
30	220	4,4	6,5	4,8	2100	84,5
31	220	2,5	5,8	4,8	1000	85,0
32	220	10,0	5,3	4,4	2250	83,0
33	110	77	5,0	4,2	1050	85,5
34	110	80	5,4	4,5	1150	85,8

35	110	92	5,3	4,1	970	86,5
36	110	66	6,2	5,0	1050	85,5
37	110	35	6,3	5,2	2200	84,5
38	110	45	5,7	4,6	1500	85,0
39	220	15	5,0	4,0	1000	84,5
40	220	10	5,2	4,2	970	85,5
41	220	5,8	6,0	5,0	2200	84,0
42	220	19	4,8	4,5	980	86,5
43	220	29	5,0	4,3	2520	86,0
44	220	46,5	5,4	4,8	1025	82,2
45	220	14,0	4,0	4,6	2400	84,0
46	220	20,0	5,1	4,2	2100	85,5
47	220	33,5	5,5	4,0	1000	84,5
48	220	8,5	4,0	4,1	2250	85,5
49	220	13,5	4,8	4,2	1050	85,5
50	110	60	5,0	4,0	1150	84,5

РОЗДІЛ 2. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

2.1. Основні теоретичні положення механіки електроприводу

2.1.1. Рівняння руху електроприводу

Електродвигун і виробничий механізм утворюють механічну систему, в якій двигун рухає механізм, долаючи опір останнього. Характер руху визначається дією моментів, прикладених до валу, і моментом інерції J системи. Слід розрізняти електромагнітний момент M , що розвиває двигун, і статичний момент навантаження M_C , який враховує момент сил опору виробничого механізму та моменти сил тертя в механічній системі. Кожний момент має свою величину і напрямок. Якщо момент M (M_C), діє у напрямку обертання, то його знак збігається зі знаком швидкості Ω і момент називають рушійним. При протилежному обертанню напрямку дії моменту M (M_C) його знак також протилежний знаку Ω і момент є гальмівними.

Моменти за характером поділяють на активні та реактивні. Обертний момент двигуна завжди має активний характер. Це впливає з властивостей оберненості та саморегулювання електричних машин, які можуть працювати як в режимі двигуна, так і в режимі генератора або електромагнітного гальма. До активних моментів сил опору відносять такі, що не змінюють свого напрямку при зміні знаку Ω (наприклад, моменти сил тяжіння, стиснення, розтягнення і скручування пружних тіл). Їх називають також потенційними моментами, оскільки вони пов'язані зі зміною запасу потенційної енергії системи. Активні моменти можуть бути

додатними або від'ємними в залежності від того, гальмують чи сприяють ці моменти руху електроприводу. Моменти, які перешкоджають руху (наприклад, моменти сил тертя або різання) і змінюють свій знак при зміні напрямку обертання, називають реактивними.

Спільна дія моментів M і M_C створює динамічний момент

системи $M_{\text{дин}} = J \frac{d\Omega}{dt}$, що визначає прискорення електроприводу.

Рівняння руху електроприводу має вигляд

$$\pm M \pm M_C = J \frac{d\Omega}{dt}.$$

Як правило, основним режимом роботи електричної машини є рушійний; при цьому момент опору має гальмівний характер відносно руху ротора і діє назустріч моменту двигуна. Отже, можна записати

$$M - M_C = J \frac{d\Omega}{dt}.$$

Слід пам'ятати, що за умови $M = M_C$ динамічний момент $M_{\text{дин}} = 0$ і привод працює в усталеному режимі при $\Omega = \text{const}$. Якщо $M > M_C$, то динамічний момент додатний і спрямований на збільшення швидкості, а у випадку $M < M_C$ електропривод під дією динамічного моменту гальмується.

2.1.2. Статична стійкість електроприводу

Електропривод працює в усталеному режимі тільки тоді, коли система статично стійка, тобто після будь-якого зовнішнього впливу на систему вона повертається у початковий стан. Статична стійкість

визначається видом механічних характеристик виробничого механізму і двигуна та з'ясовується з їх спільного розгляду.

Механічна характеристика механізму відображає залежність кутової швидкості Ω від моменту опору механізму $\Omega = f(\dot{I}_{\tilde{N}})$, який часто є змінною величиною і залежить від ряду факторів (швидкості, часу, шляху, кута повороту валу і т. д.). Характер моменту опору M_C однозначно задається умовами технологічного процесу.

На рис. 2.1 показано механічні характеристики найбільш поширених виробничих механізмів. У деяких механізмів момент M_C не залежить від швидкості (пряма 1). До них відноситься більшість вантажопідйомних і транспортних механізмів (ліфти, транспортери, механізми підйомних кранів). Лінійно зростаючу залежність $M_C(\Omega)$ (пряма 2) має привод генератора постійного струму, який працює на сталі навантаження ($R_f = const$). Механічна характеристика механізму з постійною потужністю на валу $P = M\Omega = const$ зображена кривою 3. Механізми власних потреб ТЕЦ (відцентрові насоси, компресори, вентилятори і повітродувки) мають механічну характеристику «вентиляторного» типу (крива 4), яка виражається співвідношенням $M_C = k\Omega^n$ при $n > 1$.

На рис. 2.2. наведено розглянуті раніше природні механічні характеристики електродвигунів: 1 – синхронного; 2 – асинхронного; 3,4 – постійного струму незалежного та послідовного збудження.

Розуміння механічних характеристик двигунів і виробничих механізмів, а також їх зміни у процесі регулювання швидкості грає важливу роль у виборі типу електроприводу механізмів, оскільки дозволяє

визначити швидкість $\Omega_{уст}$ і момент $M_{уст}$ в усталеному режимі та оцінити стійкість руху приводу.

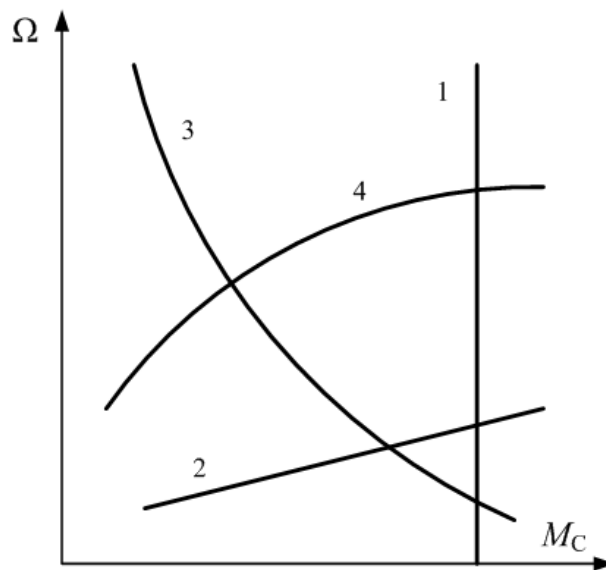


Рис. 2.1

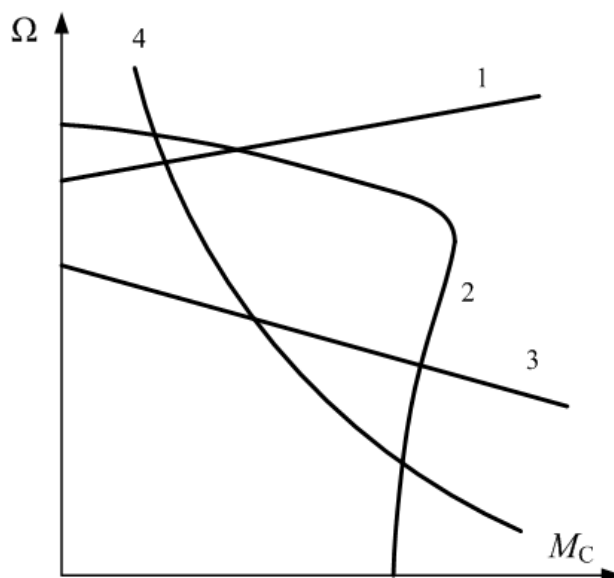


Рис. 2.2

Точка перетину механічних характеристик двигуна і механізму ($M = M_C$) дає значення швидкості обертання в усталеному режимі. Якщо механічні характеристики двигуна та механізму мають вигляд,

представлений на рис. 2.3,а, то при зміні швидкості від Ω_1 ($M = M_C$) до Ω_2 виникає динамічний момент $M_{\text{дин}} = M - M_C > 0$. Дія цього моменту збільшує швидкість до Ω_1 і електропривод повертається у вихідне положення. У випадку механічної характеристики, яку наведено на рис. 2.3,б, при зміні швидкості від Ω_1 до Ω_2 різниця $M - M_C < 0$. Момент $M_{\text{дин}}$ збільшує відхилення швидкості від усталеного значення і двигун буде гальмувати до швидкості $\Omega = 0$. Аналогічно можна провести перевірку на стійкість роботи в усталеному режимі будь-якого електроприводу. Проте в кожному конкретному випадку необхідно враховувати характер моментів і знак швидкості.

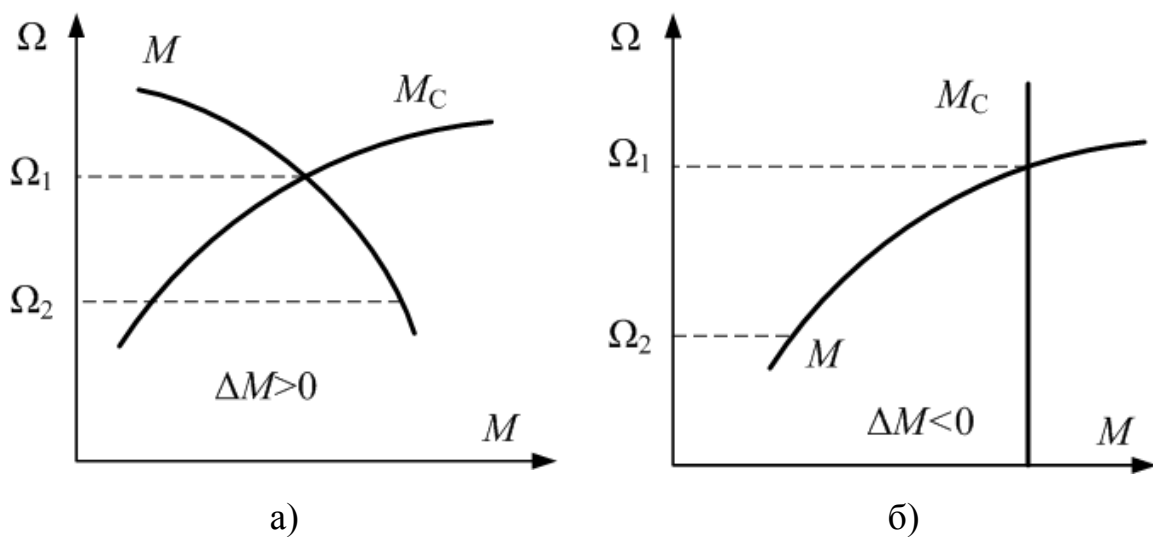


Рис. 2.3

Вивчаючи механічні характеристики, слід оволодіти поняттям «жорсткість механічної характеристики», яке часто використовують, аналізуючи процеси в електромеханічних системах.

Представлені на рис. 2.1 та 2.2 механічні характеристики відрізняються ступенем зміни моментів M і M_C зі зміною швидкості. Величину, що характеризує цю зміну, прийнято називати жорсткістю механічної характеристики β . Жорсткість характеристики або окремої її ділянки оцінюють відношенням приросту моменту до приросту швидкості:

$$\beta = \Delta M / \Delta \Omega.$$

Характеристики з великим від'ємним значенням β називають жорсткими, їм властива мала зміна швидкості при значних змінах моменту. Так, синхронний двигун має «абсолютно» жорстку механічну характеристику ($\beta = \infty$). Характеристики з низькою від'ємною жорсткістю називають м'якими. Якщо в усіх точках характеристики жорсткість β однакова, то β називають постійною, в іншому випадку – змінною. Механічні характеристики, що змінюються лінійно, мають постійну жорсткість ($\beta = const$), а механізми і двигуни з нелінійною залежністю $\Omega(M)$ – змінну ($\beta = var$). Наприклад, жорсткість механічної характеристики асинхронного двигуна на робочій ділянці $\Omega(M)$ від'ємна і практично незмінна, дорівнює нулю при $M = M_{max}$, а в області нестійкої роботи – додатна і змінна.

Слід звернути увагу на те, що жорсткість штучних механічних характеристик двигунів постійного і змінного струмів відрізняється від жорсткості природних характеристик і залежить від способу регулювання швидкості. Це істотно впливає на стабільність швидкості при роботі приводу зі змінним навантаженням.

Використовуючи поняття жорсткості механічної характеристики β , можна в загальному вигляді сформулювати умову статичної стійкості роботи електроприводу: **в усталеному режимі привод буде працювати**

стійко, якщо $\beta - \beta_C < 0$, де β , β_C – жорсткість механічних характеристик електродвигуна і виробничого механізму відповідно.

2.1.3. Приведення моментів статичного навантаження і моментів інерції до валу двигуна

Правильний вибір електроприводу забезпечується безпомилковим розрахунком його навантажувальної діаграми, тому важливо зрозуміти сутність вказаного математичного прийому і навчитись використовувати його в інженерній практиці.

Оскільки окремі елементи системи передачі механічної енергії від двигуна до робочого органу виробничого механізму мають різні швидкості і можуть здійснювати як поступальний, так і обертальний рух, безпосередній розрахунок систем електроприводу виявляється складним і громіздким. Тому аналіз режимів роботи електроприводу і вибір потужності електро-двигуна виконують для еквівалентної системи двигун – механізм. Усі моменти статичних сил опору і моменти інерції приводяться до валу електродвигуна, відносно якого складають і вирішують рівняння руху.

Приведення моментів статичного навантаження базується на рівності робіт (потужностей) в еквівалентній та дійсній системах, тобто

$$M_M \Omega_M / \eta = M_C \Omega,$$

де M_M , Ω_M – момент опору і швидкість механізму;

M_C , Ω – статичний момент навантаження і швидкість двигуна;

η – ККД механічної передачі.

Замінивши відношення Ω / Ω_M передавальним відношенням механічної передачі i , отримаємо:

- якщо енергія надходить від двигуна до механізму $M_C = M_M / (i\eta)$,
- якщо енергія надходить від механізму до двигуна, наприклад, при спуску вантажа, коли двигун розвиває гальмівний момент $M_C = M_M \eta / i$.

Приведення моментів інерції обертових мас основане на рівності запасів кінетичної енергії в еквівалентній та дійсній системах. Оскільки момент інерції еквівалентної системи $J = J_{\text{ДВ}} + J_M$, то

$$J = J_{\text{ДВ}} + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_2}{i_2^2} + \dots + \frac{J_n}{i_n^2} + m \left(\frac{V}{\Omega} \right)^2,$$

де $J_1, J_2, J_n, i_1, i_2, i_n$ – відповідно моменти інерції та передавальні відношення ($i_m = \Omega_m / \Omega$) ланок системи з обертовими масами, а $\frac{mV^2}{\Omega^2}$ - приведений момент інерції мас, що рухаються поступально.

Слід звернути увагу на те, що в інженерних розрахунках електроприводів дуже часто момент інерції виражають через маховий момент (зазвичай наведений в каталогах), виходячи з умови, що $J = \frac{GD^2}{4g}$,

де G – сила тяжіння; D – приведений діаметр інерції. У цьому випадку рівняння руху записується у вигляді

$$M_{\text{дин}} = M - M_C = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt},$$

де n – число обертів за хвилину; $\frac{1}{375} = \frac{\pi}{9.81 \cdot 4 \cdot 30}$ – коефіцієнт перерахунку.

Приклад 1. На рис. 2.4 наведено кінематичну схему електроприводу виробничого механізму, момент інерції якого $J = 8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

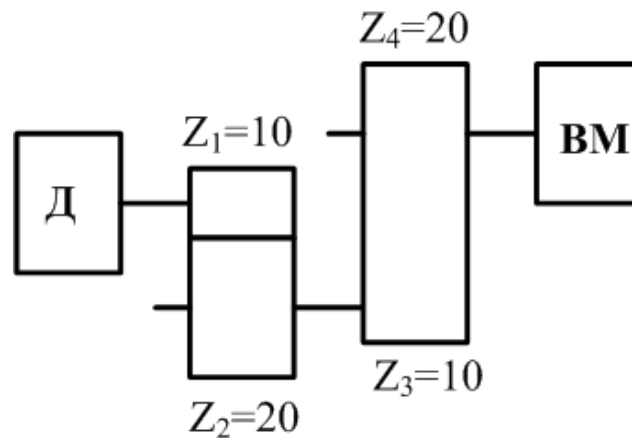


Рис. 2.4

Визначити приведений до валу двигуна момент інерції механізму.

Розв'язання. Знаходимо передавальне відношення механічної передачі:

$$i = \frac{20}{10} \cdot \frac{20}{10} = 4.$$

Обчислюємо приведений до валу двигуна момент інерції виробничого механізму, скориставшись формулою

$$J = \frac{J_{\text{ВМ}}}{i^2} = \frac{8}{16} = 0,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Приклад 2. Двигун через систему шестерень приводить у рух барабан. Швидкість обертання валу двигуна $n = 1000 \text{ об/хв}$, швидкість обертання барабана $n_{\text{Б}} = 100 \text{ об/хв}$. Момент сил опору на валу барабана $M_{\text{Б}} = 400 \text{ Н} \cdot \text{м}$, момент інерції барабана $J_{\text{Б}} = 250 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Визначити приведені до валу двигуна момент інерції барабана та момент сил опору, якщо коефіцієнт корисної дії передачі $\eta = 0,8$.

Розв'язання. Знаходимо передавальне відношення механічної передачі:

$$i = \frac{\Omega}{\Omega_B} = \frac{1000}{100} = 10,$$

тоді момент сил опору, приведений до валу двигуна,

$$M_C = \frac{M_B}{\eta i} = \frac{400}{0,8 \cdot 10} = 50 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

момент інерції барабана, приведений до валу двигуна,

$$J_{B \text{ ПР}} = \frac{J_B}{i_2} = \frac{250}{100} = 2,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

2.1.4. Поняття про динамічні режими

Процес переходу електроприводу з одного усталеного режиму в інший називають динамічним режимом. У динамічному режимі одночасно змінюються швидкість, момент і струм двигуна, а також швидкість і момент усіх ланок кінематичного ланцюга, який зв'язує двигун з робочим органом механізму. До динамічних режимів відносяться пуск, гальмування, реверс, перехід з однієї швидкості на іншу, а також процеси, спричинені зміною моменту на валу двигуна. Характер і тривалість динамічного режиму визначається моментом двигуна, моментом сил опору (тертя, різання, деформація тощо), масами та моментами інерції рухомих тіл. Залежності Ω , M , $J = f(t)$ і тривалість динамічного режиму можна визначити за допомогою рівняння руху електроприводу. Характер і

тривалість динамічних режимів у деяких виробничих механізмах визначають їх продуктивність, особливо у випадках, коли термін робочого циклу сумірний з часом розгону та гальмування. Крім того, втрати потужності в двигуні під час пуску і гальмування можуть бути сумірними з втратами в усталених режимах, що треба враховувати при виборі двигуна.

Визначення часу розгону електроприводу проводиться шляхом вирішення рівняння руху

$$M - M_C = J \frac{d\Omega}{dt},$$

де M – електромагнітний момент, що розвиває двигун; M_C – статичний момент сил опору, приведений до валу двигуна; J – момент інерції усіх ланок механізму, приведених до кутової швидкості Ω валу двигуна.

При аналітичному розв'язанні рівняння руху виникають труднощі, спричинені тим, що обертовий момент двигуна M і момент сили опору M_C у більшості випадків являються складною функцією швидкості. На практиці широко використовуються наближені графо-аналітичні методи розрахунку, в основі яких лежать графічні розв'язання рівняння руху. Розглянемо один з цих методів. У рівнянні руху нескінченно малі прирости $d\Omega$, dt замінюють малими кінцевими приростами $\Delta\Omega$, Δt , а M та M_C – середнім значенням в інтервалі швидкості $\Delta\Omega$. Тоді рівняння руху набуває вигляду:

$$M_{\text{СЕР}} - M_{\text{С.СЕР}} = J \frac{\Delta\Omega}{\Delta t},$$

звідки
$$\Delta t = \frac{J\Delta\Omega}{M_{\text{СЕР}} - M_{\text{С.СЕР}}}.$$

Підставивши $\Omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$, отримаємо

$$\Delta t = \frac{J\pi\Delta n}{30(M_{\text{СЕР}} - M_{\text{С.СЕР}})} = \frac{J\Delta n}{9,55(M_{\text{СЕР}} - M_{\text{С.СЕР}})},$$

де Δt – час розгону електроприводу в інтервалі швидкості Δn ; J – момент інерції системи; $M_{\text{СЕР}}$ – середній момент двигуна в інтервалі швидкості Δn ; $M_{\text{С.СЕР}}$ – середній момент сил опору в інтервалі швидкості Δn .

Вихідними для розрахунку являються механічна характеристика $M(n)$ двигуна і графік моменту сил опору $M_{\text{С}}(n)$ (рис. 2.5). Графіки розбивають на рівні ділянки Δn , визначають середні значення M та $M_{\text{С}}$ на кожній ділянці, а потім за вищенаведеною формулою оцінюють час на кожній з ділянок. Час розгону електроприводу дорівнює сумі проміжків часу всіх ділянок: $t_{\text{р}} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_k$.

Приклад 3. Механічна характеристика двигуна і графік моменту сил опору на валу двигуна зображені на рис. 2.5. Момент інерції двигуна $J = 0,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Обчислити час розгону.

Розв'язання. У даному випадку графіки зручно розбити на сім ділянок з інтервалом швидкості $\Delta n = 100 \text{ об/хв}$. Розраховуємо середні значення $M_{\text{СЕР}}$ та $M_{\text{С.СЕР}}$ на кожній ділянці та знаходимо час, відповідний окремій ділянці. Наприклад, на першій ділянці $M_{\text{СЕР}1} = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $M_{\text{С.СЕР}1} = 20 \text{ Н}\cdot\text{м}$,

$$\Delta t_1 = \frac{J\Delta n}{9,55(M_{\text{СЕР}} - M_{\text{С.СЕР}})} = \frac{0,4 \cdot 100}{9,55(50 - 20)} = 0,14 \text{ с.}$$

Результати розрахунків на окремих ділянках зведено у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

№ ділянки	1	2	3	4	5	6	7
$M_{\text{СЕР}}, \text{ Н}\cdot\text{м}$	50	55	63	74	86	94	67

$M_{C.CEP}, \text{H} \cdot \text{M}$	20	22	24	26	30	34	38
$\Delta t, \text{c}$	0,14	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	0,14

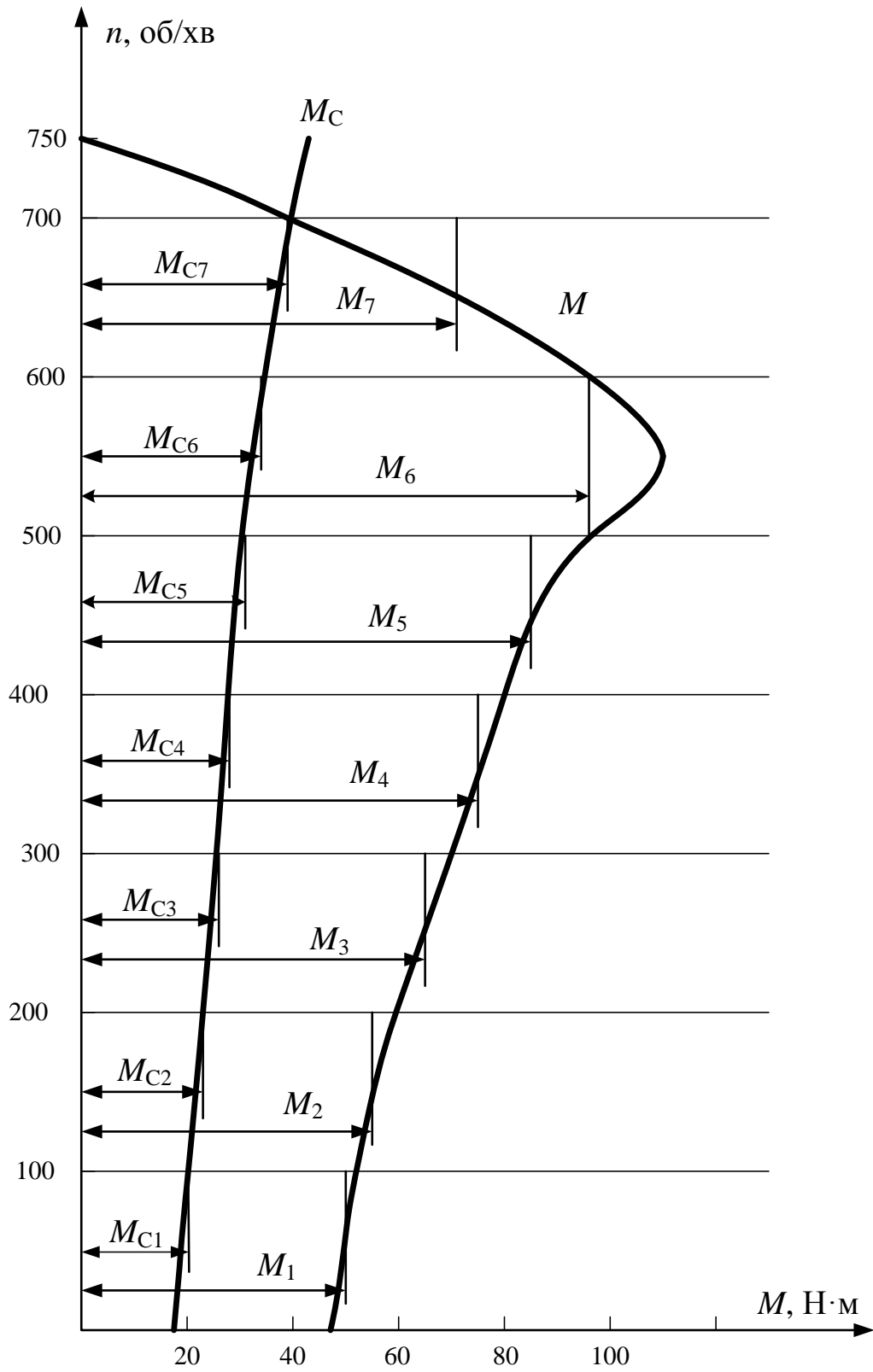


Рис. 2.5

Визначаємо час розгону електроприводу

$$t = \sum_{k=1}^7 \Delta t_k = 0,76 \text{ с.}$$

Час гальмування електроприводу визначається так само, як і час розгону. Різниця лише у тому, що момент двигуна гальмівний і діє проти руху, а момент сил опору в одних випадках може бути напрямлений за рухом, а в інших – проти руху. Тоді рівняння для визначення часу гальмування на ділянці Δt має вигляд

$$\Delta t = \frac{J\Delta n}{9,55(M_{\text{СЕР}} + M_{\text{С.СЕР}})}.$$

2.2. Вибір типу та потужності двигуна

Вибір двигуна є відповідальним етапом проектування електроприводу, оскільки саме від двигуна у значній мірі залежать технічні та економічні якості приводу.

2.2.1. Загальні положення вибору типу електродвигуна

Вибір типу електродвигуна здійснюють на підставі вимог технологічного процесу до електроприводу виробничого механізму. При цьому перш за все розглядаються питання, пов'язані із забезпеченням:

- надійності роботи приводу;
- заданого діапазону регулювання і стабільності швидкості приводу;
- умов запуску, гальмування і ряду інших специфічних вимог;

- відповідності конструктивного виконання двигуна умовам навколишнього середовища;
- зменшення капітальних та експлуатаційних витрат.

З погляду надійності та економічності доцільно в першу чергу розглянути можливості застосування асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Це найбільш простий і надійний в експлуатації двигун, що має найменшу масу, габарити і вартість, а також високі енергетичні показники порівняно з іншими електродвигунами. Асинхронні короткозамкнені двигуни використовуються в усіх галузях промисловості для привода механізмів, які не потребують регулювання швидкості обертання. Якщо асинхронний двигун звичайного виконання не забезпечує допустимого зменшення частоти обертання при збільшенні моменту навантаження, частоти повторних включень, можливості швидкого і надійного пуску і т. д., необхідно дослідити можливість використання асинхронних двигунів з поліпшеними пусковими властивостями. Використання статичних транзисторних і тиристорних перетворювачів частоти для регулювання швидкості обертання розширило область застосування короткозамкнених асинхронних двигунів і зробило їх конкурентоспроможними відносно двигунів постійного струму в електроприводах малої і середньої потужності (до сотень кіловат), де потрібні велика жорсткість механічної характеристики, плавне і глибоке регулювання.

У напружених режимах роботи механізмів з великою частотою ввімкнень і реверсування напрямку обертання, а також при регулюванні швидкості обертання у вузьких межах застосовуються асинхронні двигуни з контактними кільцями. Їх використовують для привода прокатних станів, підйомних кранів, пасажирських ліфтів малої та середньої потужності, кувальних машин і пресів тощо. Але ці двигуни знижують ККД

електропривода при регулюванні швидкості обертання через втрати потужності у регулювальних реостатах. Крім того, регулювання швидкості обертання можливе лише в бік зменшення від величини синхронної швидкості.

Для нерегульованих приводів середньої та великої потужності (до 20 000 кВт), що працюють з рідкими пусками у тривалому режимі (компресори, потужні відцентрові насоси, повітрорудки на теплових електростанціях та ін.), використовують синхронні електродвигуни. Вони мають більш високий ККД і здатність компенсувати (за необхідності) реактивну потужність у мережі або працювати з коефіцієнтом потужності, близьким до одиниці. Синхронні двигуни малої потужності в приводах, що не вимагають сталої швидкості обертання валу, нерентабельні, оскільки експлуатаційні переваги не окупають капітальні витрати.

Двигуни постійного струму доцільно використовувати лише у випадках, коли двигуни змінного струму не задовольняють характеристикам механізму або є неекономічними при експлуатації.

Двигуни постійного струму незалежного збудження застосовують головним чином в електроприводах, де потрібне глибоке і плавне регулювання швидкості обертання, а також при роботі з низькими швидкостями. Можливість частих вмикань і плавного регулювання в широких межах швидкості обертання за допомогою тиристорних перетворювачів напруги дозволяє використовувати ці двигуни у приводах, які мають задовольняти спеціальним вимогам щодо плавності пуску, гальмування, регулювання та стабільності швидкості обертання, а також до обертового моменту. Наприклад, у приводах прокатних станів, ліфтів висотних будівель, поліграфічних машин, складних металообробних верстатів, а також у системах Г-Д потужністю до 10000 кВт.

У разі невеликого діапазону регулювання швидкості обертання застосовують двигуни постійного струму паралельного збудження, які живляться від мережі постійного струму незмінної напруги. При широкому діапазоні регулювання частоти обертання і частих пусках також можливе застосування двигунів паралельного збудження, але з живленням від окремого джерела, напруга якого змінюється в широких межах.

Двигуни постійного струму послідовного збудження завдяки м'якій механічній характеристиці та великому пусковому моменту поширені в транспорті та в підйомно-транспортних механізмах.

Забезпечення мінімальних капітальних і експлуатаційних витрат досягається лише вибором двигуна відповідної потужності.

Велике практичне значення має правильний вибір конструктивного виконання двигуна з урахуванням умов навколишнього середовища. Атмосфера, в якій працює двигун, може містити вологу, пил, різноманітні гази, пари кислот і навіть вибухонебезпечні суміші. Ці компоненти атмосфери впливають на ізоляцію обмотки, погіршують її механічні та ізоляційні властивості, що в кінцевому рахунку може привести до виходу з ладу двигуна. Тому конструкція двигуна передбачає той чи інший захист ізоляції від впливу атмосферних домішок. Випускаються двигуни відкритого, захищеного, закритого та вибухобезпечного виконання. Відкриті двигуни не мають ніяких засобів захисту. Захищені двигуни поділяють на три категорії:

- 1) захищені від випадкового доторкання до струмопровідних частин і потрапляння сторонніх предметів всередину двигуна (мають сітки, що закривають отвори всередину двигуна);
- 2) захищені від потрапляння крапель (обладнані, крім сіток, спеціальними дашками);

3) захищені від дощу та бризок (зазвичай працюють на відкритому повітрі).

Закриті двигуни використовують у сирих приміщеннях, з їдкими газами, великим вмістом пилу. Вони бувають невентильовані, з примусовою вентиляцією і герметично закриті.

Чим більша ступінь захищеності двигуна, тим гірші умови охолодження його обмоток. Щоб при однакових габаритах зберегти номінальну потужність закритого двигуна, необхідно штучно посилити його тепловіддачу. З цією метою закриті двигуни обладнують вентилятором, насадженим на вал двигуна.

Для захисту навколишнього середовища від можливого вибуху при іскроутворенні всередині двигуна випускаються вибухозахищені двигуни. Вони забезпечені спеціальними кожухами, які витримують тиск у разі вибуху газів або пари в корпусі двигуна і не пропускають полум'я назовні.

Необґрунтоване використання двигуна спеціального виконання підвищує вартість установки. Тому в усіх сухих незапорошених приміщеннях з нормальним середовищем рекомендується встановлювати відкриті двигуни, а у виробничих приміщеннях – захищені. Двигуни змінного і постійного струмів випускаються в різних конструктивних модифікаціях залежно від способу монтажу: двигуни з горизонтальним розташуванням вала, які мають для кріплення лапи; фланцеві двигуни з лівим чи правим розміщенням керуючого пристрою (клемної панелі) тощо. Існують вбудовані двигуни, корпуси яких являють собою єдине ціле з корпусом або станиною виробничого механізму. Дані про конструктивні особливості наводяться в каталогах і дозволяють вибрати двигун за способом монтажу з таким розрахунком, щоб виключити застосування спеціальних пристроїв.

2.2.2. Основні режими роботи двигунів

Правильний вибір двигуна неможливий без розуміння теплових процесів, які відбуваються в ньому, а також особливостей їх перебігу в залежності від вимог технологічного процесу (тривалості та частоти ввімкнень, характеру навантаження тощо).

Під час роботи двигуна частина підведеної до нього електричної енергії перетворюється на теплоту, яка визначається втратами енергії при перетворенні і залежить від навантаження двигуна. Частково ця теплота розсіюється в навколишнє середовище, а інша частина накопичується в двигуні і спричиняє його нагрівання. Найбільш чутливою до нагрівання є ізоляція обмоток.

За державним стандартом температура навколишнього середовища для двигуна вважається рівною 40°C . Допустиме перевищення θ температури ізоляції двигуна над температурою середовища залежить від класу ізоляції, тобто від нагрівостійкості застосованих матеріалів. Для ізоляції класу А допустиме перевищення температури становить 65°C ; для машин з поліпшеною ізоляцією (клас F) – 115°C , а для деяких термостійких ізоляційних матеріалів на основі кремнієвоорганічних смол, керамік і слюди перевищення може досягати $140 - 180^{\circ}\text{C}$ і більше.

Теплові процеси в двигуні характеризуються нерівномірним розподілом джерел тепла неоднаковою температурою окремих його частин. Для спрощення врахування цього фактора нагрівання вважають, що двигун є однорідним суцільним тілом, а його теплоємність і тепловіддача пропорційні температурі перевищення θ . За певної

температури $\theta_{\text{уст}}$ настає усталений тепловий процес, коли усе тепло, що виділяється в машині, віддається навколишньому середовищу.

Зміна у часі температури перевищення θ від початкового значення θ_0 при $t = 0$ до усталеного значення $\theta_{\text{уст}}$ описується рівнянням

$$\theta = \theta_{\text{уст}} \left(1 - e^{-t/T_{\text{H}}} \right) + \theta_0 e^{-t/T_{\text{H}}},$$

де T_{H} – стала часу нагрівання (час нагрівання двигуна до усталеного перевищення температури $\theta_{\text{уст}}$ за відсутності тепловіддачі в навколишнє середовище); $T_{\text{H}} = C / A$ (C – теплоємність двигуна, тобто кількість теплоти, необхідної для підвищення температури двигуна на 1°C ; A – тепловіддача двигуна, тобто кількість теплоти, яка віддається двигуном в одиницю часу в зовнішнє середовище при різниці температур в 1°C).

Теплова стала часу T_{H} визначається конструктивними параметрами машини. Для електричних машин різних потужностей величина $T_{\text{H}} = (0,3 \div 2)$ години, для мікромашин $T_{\text{H}} = (3 \div 10)$ хвилин.

Якщо машина вмикається після відносно довгого перебування у вимкненому стані (тобто набула температури навколишнього середовища), то $\theta_0 = 0$ і рівняння нагрівання має вигляд $\theta = \theta_{\text{уст}} \left(1 - e^{-t/T_{\text{H}}} \right)$.

Графіки залежності $\theta(t)$ для $\theta_0 = 0$ і $\theta_0 > 0$ подано на рис. 2.6.

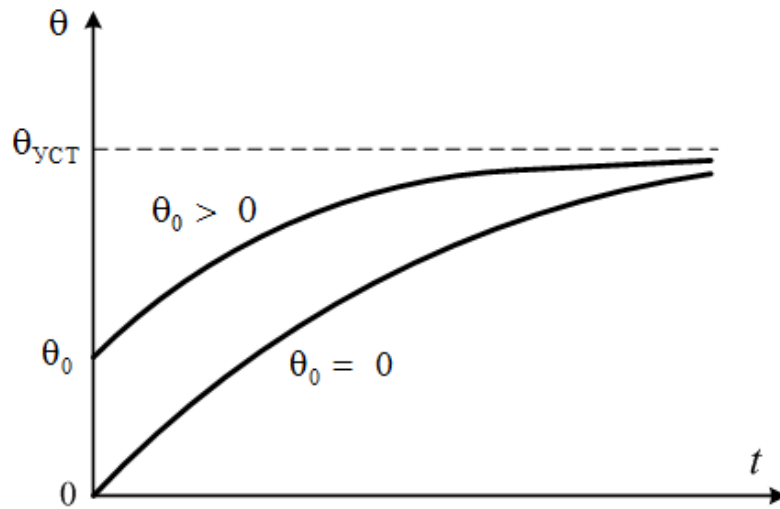


Рис. 2.6

Чим більша потужність, яку розвиває двигун, тим більший струм в робочих обмотках, тим сильніше нагрівається двигун і вище усталена температура. Отже, усталена температура $\theta_{уст}$ залежить від потужності P_2 на валу двигуна. На рис. 2.7 показано, як зі зміною потужності (в порівнянні з номінальною) змінюється θ .

Стала часу нагрівання T_H на рис. 2.7 показана у вигляді відрізка, що відсікає на прямій допустимого перевищення температури $\theta_{доп}$, дотична, яка проведена з початку координат до кривої нагріву $P_2 = P_{2ном}$.

З графіків на рис. 2.7 видно, що двигун може довгий час працювати без перегрівання, коли він розвиває потужність, яка менше або дорівнює номінальній. Якщо потужність більша за номінальну, то час роботи слід скоротити з таким розрахунком, щоб температура перегрівання θ не перевищувала допустиму для ізоляції двигуна ($P_4 > P_3, t_4 < t_3$).

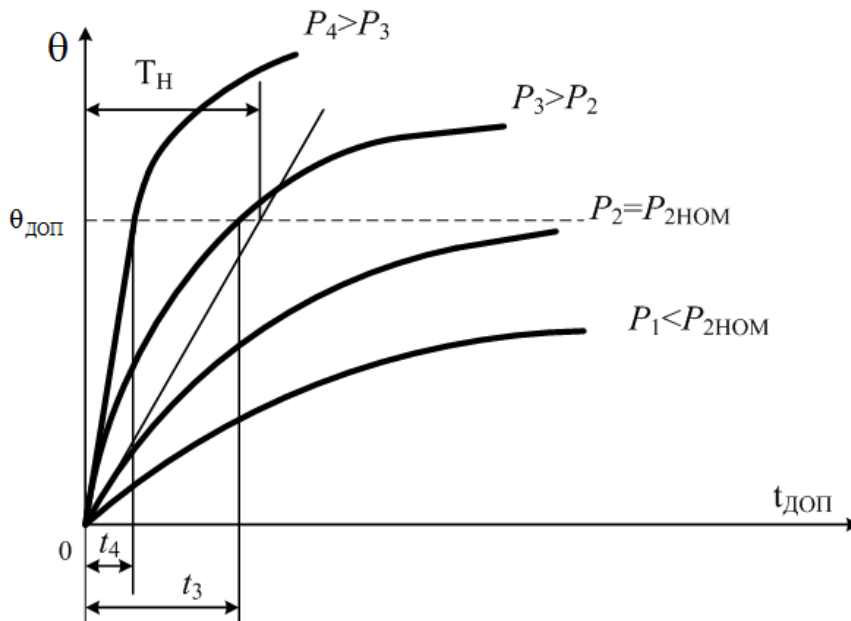


Рис. 2.7

Коли машину відключають від мережі, відбувається її охолодження до температури навколишнього середовища за експоненційним законом

$$\theta = \theta_{\text{ПОЧ}} \cdot e^{-t/T_0},$$

де $\theta_{\text{ПОЧ}}$ - температура перегрівання двигуна в момент його вимикання; T_0 - стала охолодження, яка зв'язана зі сталою нагрівання T_H співвідношенням $T_0 = T_H / \beta_0$. Коефіцієнтом $\beta_0 \leq 1$ враховують погіршення тепловіддачі при нерухомому роторі. Оскільки $T_0 \geq T_H$, то охолодження двигуна відбувається повільніше, ніж його нагрівання.

Графік охолодження двигуна наведено на рис. 2.8.

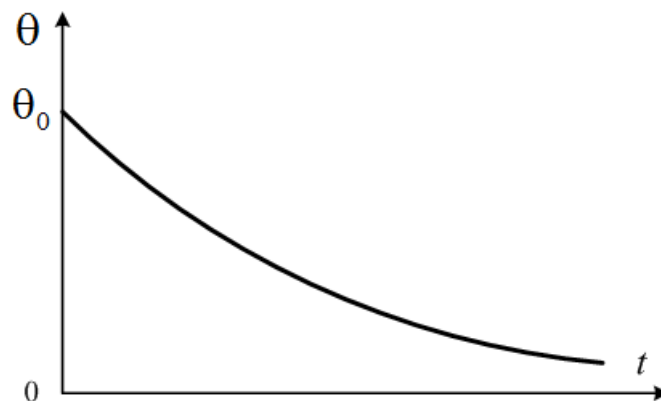


Рис. 2.8

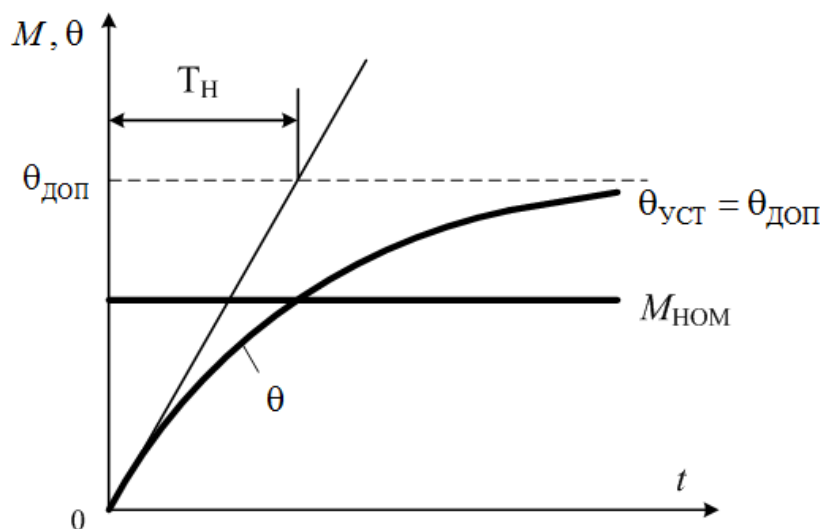
Взагалі ж стала часу $T_H(T_0)$ машини пропорційна її об'єму і залежить від способу вентиляції та охолодження.

Виходячи з особливостей процесів нагрівання і охолодження двигуна, розрізняють три основні режими його роботи:

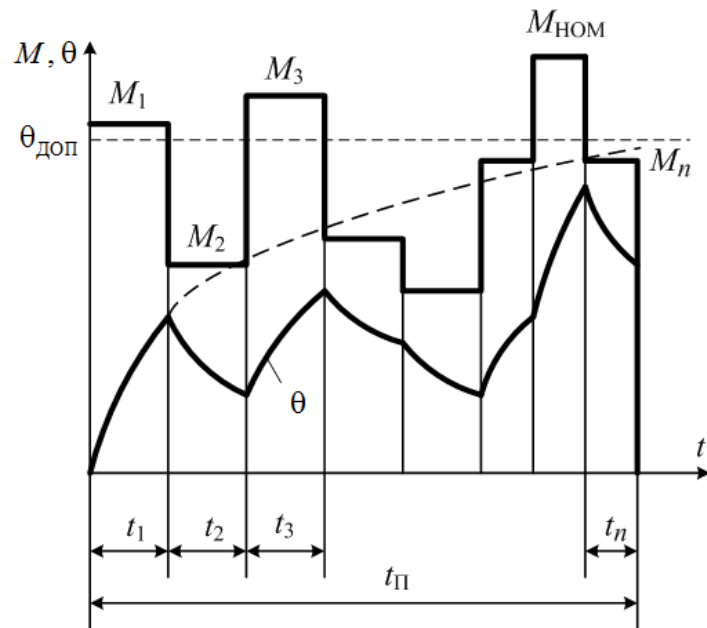
- тривалий режим $t_p \geq 3T_H$ (рис. 2.9);
- короткочасний режим $t_p < 3T_H$, $t_0 > 3T_0$ (рис. 2.10);
- повторно-короткочасний режим $t_p \ll T_H$, $t_0 \ll T_0$ (рис. 2.11);

t_p – час роботи, t_0 – тривалість паузи.

Тривалим називають режим роботи, коли двигун працює з навантаженням такий довгий час, що перевищення температури досягає усталеного значення $\theta_{уст}$; тривалість пауз у роботі не суттєва (рис. 2.9).



а) незмінне навантаження



б) змінне навантаження

Рис. 2.9

У правильно спроектованої машини усталена температура $\theta_{уст}$ за номінального навантаження повинна мати значення, яке наближається до допустимого для даного класу ізоляції (рис. 2.9, а). У разі тривалого режиму роботи з незмінним навантаженням (вентилятори, насоси, компресори, деякі трансформатори, повітродувні пристрої, папероробні машини тощо) температура досягає свого усталеного значення у машинах середньої та великої потужності через 3-6 годин, а в мікромашинах – через 10-30 хвилин. Якщо електрична машина працює у тривалому режимі, але зі змінним навантаженням (рис. 2.9, б), то тепловий процес є неусталеним, оскільки у різні проміжки часу (t_1, t_2, \dots, t_n) мають місце різні втрати потужності.

Короткочасним називають режим роботи, коли періоди навантаження чергуються з періодами вимикання машини. При цьому за час роботи t_p двигун не встигає нагрітися до усталеної температури $\theta_{уст}$,

а за час паузи t_0 охолоджується до температури навколишнього середовища.

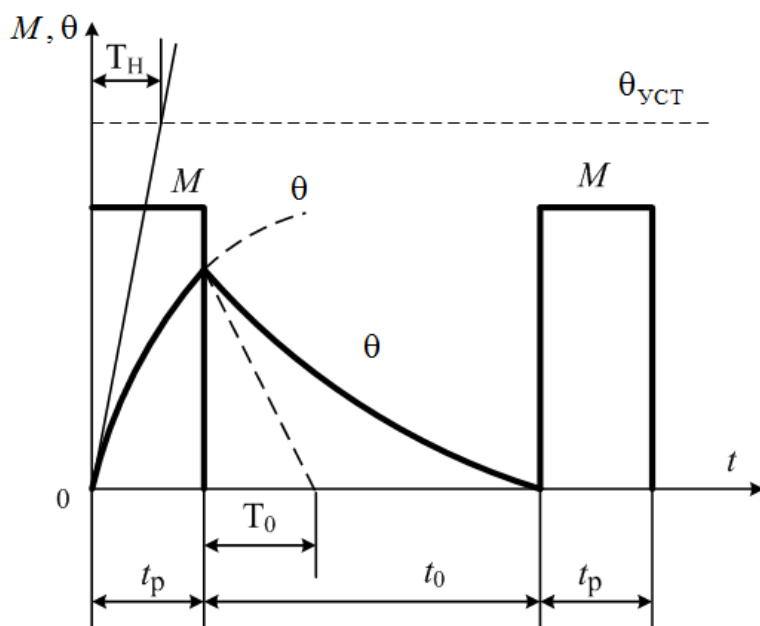


Рис. 2.10, а

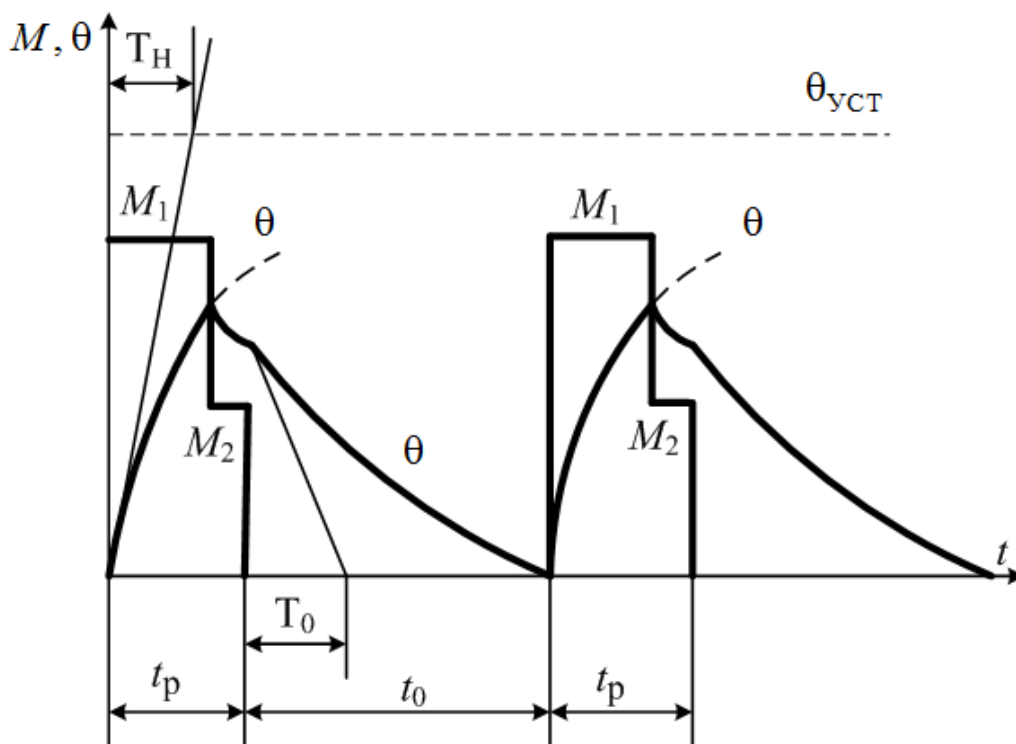


Рис. 2.10, б

Оскільки у короткочасному режимі роботи температура перевищення не досягає свого усталеного значення, то від даної машини можна отримати більшу потужність, ніж у тривалому режимі. Причому, чим менша тривалість робочого періоду, тим більшу потужність може розвинути машина, не перевищуючи допустимої температури. Короткочасний режим характерний для двигунів рідко працюючих механізмів, таких, як затвори шлюзів, підйомні механізми розвідних мостів, механізм прибирання шасі літаків і тощо.

Повторно-короткочасний режим роботи електроприводу характеризується циклічним повторенням періодів роботи t_p і пауз t_0 при загальній тривалості циклу $t_{\text{Ц}} = t_p + t_0 \leq 10$ хв.

За час роботи протягом одного циклу перегрівання двигуна не досягає усталеного значення; за час паузи двигун не встигає охолонути до температури навколишнього середовища. При багаторазовому повторенні циклів процес встановлюється, температура перегрівання на початку і наприкінці циклу однакова, а її коливання відбуваються навколо середнього значення $\theta_{\text{СЕР}}$ (рис. 2.11.)

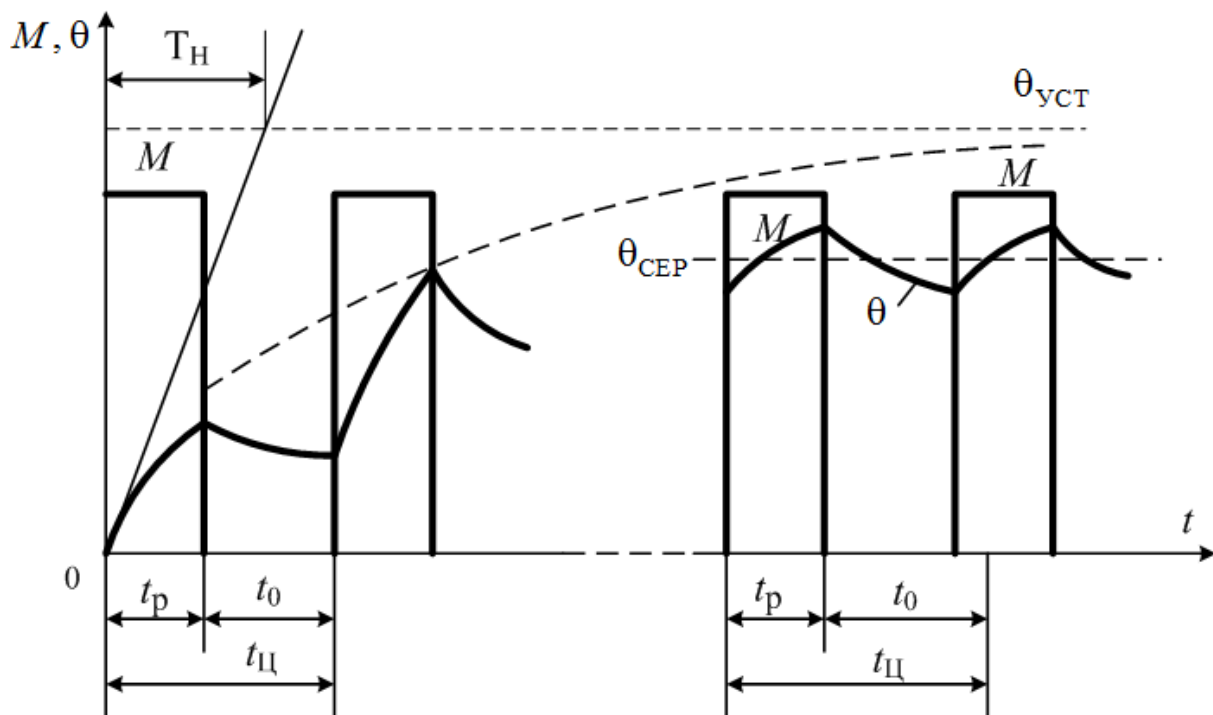


Рис. 2.11

Повторно-короткочасний режим роботи двигуна характеризується тривалістю ввімкнення (TB), яка визначається відношенням сумарного часу робочих інтервалів до тривалості циклу:

$$TB = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n + t_0} = \frac{t_p}{t_{\text{Ц}}}$$

Часто TB вказують у відсотках: $TB = \frac{t_p}{t_{\text{Ц}}} \cdot 100\%$.

Двигуни випускають для роботи з $TB = 0,15; 0,25; 0,40$ і $0,60$. Збільшення TB відповідає зменшенню тривалості паузи відносно тривалості циклу. Тривалий режим роботи характеризується $TB = 1$.

Умови роботи двигуна у повторно-короткочасному режимі залежать від співвідношення часу роботи t_p двигуна і часу паузи t_0 . Такий режим характерний для двигунів підйомно-транспортних механізмів, пресів, штампувальних машин і деяких металообробних верстатів.

Кожний двигун може працювати у будь-якому з перерахованих режимів. Однак для отримання найкращих економічних показників електротехнічна промисловість виготовляє двигуни, спеціально призначені для: а) тривалого режиму; б) повторно-короткочасного режиму; в) короткочасного режиму.

Для двигунів тривалого режиму в каталогах наведено номінальну потужність без будь-яких згадок про час роботи. Для двигунів повторно-короткочасного режиму в каталогах вказано номінальні значення потужностей для певного стандартного значення TB (15, 25, 40 або 60%). При цьому час циклу не повинен перевищувати 10 хв; в іншому випадку режим роботи вважається тривалим. Для двигунів короткочасного режиму в каталогах задано декілька термінів роботи і відповідні їм номінальні потужності.

2.2.3. Визначення потужності двигуна. Вибір двигуна за каталогом

Основний критерій вибору потужності двигуна – це його нагрівання. Номінальну потужність двигуна необхідно вибирати так, щоб середня температура його нагрівання не перевищувала допустимої, яку визначає завод-виробник у відповідності до класу ізоляції.

Завищення потужності двигуна спричиняє додаткові капітальні затрати, збільшення витрат енергії на одиницю продукції, а для асинхронних двигунів - ще й погіршення коефіцієнту потужності. Заниження потужності двигуна призводить до температурного перевантаження ізоляції, термін служби якої різко скорочується (при

експлуатації двигуна в нормальних умовах термін служби ізоляції складає 15-20 років). Є дані, що перевантаження двигуна на 25% призводить до зносу ізоляції протягом 1,5 місяця, тому правильний вибір потужності має велике техніко-економічне значення.

Необхідно пам'ятати, що при виборі потужності двигуна визначальними є моменти на валу, швидкість і прискорення виробничого механізму. Ці дані відповідають вимогам технологічного процесу і задаються графіками статичних часових залежностей моменту $M_C(t)$ або потужності $P_C(t)$, а також тахограмою—залежністю $\Omega(t)$.

Залежності $M_C(t)$ і $P_C(t)$ називають навантажувальними діаграмами механізму. Слід звернути увагу на те, що вони збігаються з навантажувальними діаграмами електроприводу тільки в статичному режимі і можуть бути використані для вибору потужності двигуна, якщо привод працює переважно в усталених режимах ($M = M_C$) і не має додаткових обмежень (умов) у перехідних режимах. В усіх інших випадках розрахунок потужності двигуна виконують за навантажувальними діаграмами електроприводу, які враховують навантаження в динамічних режимах, оскільки струм, що викликає нагрівання двигуна, визначається моментом $M = M_C + M_{\text{дин}}$. Динамічний момент $M_{\text{дин}} = J \frac{d\Omega}{dt}$

залежить від сумарного моменту інерції приводу і при певних умовах може перевищувати статичний момент M_C (наприклад, у приводах млинів та дробарок палива теплових електростанцій).

Якщо динамічні режими в роботі приводу грають суттєву роль, завдання вибору потужності двигуна вирішують у два етапи: 1) попередній вибір потужності двигуна за середнім моментом опору $M_{C,\text{серед}}$ протягом

циклу; 2) подальша перевірка вибраного двигуна на перевантажувальну здатність і нагрівання з використанням навантажувальної діаграми електроприводу. Побудову такої діаграми простежимо на прикладі механізму, тахограму $\Omega(t)$ і навантажувальну діаграму $M_C(t)$ якого наведено на рис. 2.12, а, б. При розрахунках що момент M_C і сумарний момент інерції J механізму приведено до валу двигуна.

Тривалість одного циклу роботи складають: t_1 – час пуску (розгону) двигуна з навантаженням від швидкості $\Omega = 0$ до заданої $\Omega = \Omega_{\text{ЗАД}}$; t_2 – час роботи з усталеною швидкістю $\Omega_{\text{ЗАД}}$; t_3 – час гальмування; t_0 – пауза в роботі механізму. З діаграми на рис. 2.12,б знаходять середній момент статичного навантаження за формулою

$$M_{\text{С.СЕР}} = \frac{\sum_{k=1}^n M_{\text{С}k} \cdot t_k}{\sum_{k=1}^n t_k},$$

де $M_{\text{С}k}$ – момент навантаження на k -му інтервалі; t_k - тривалість k -го інтервалу; n – число інтервалів, в яких $M_{\text{С}k} = \text{const}$.

У даному випадку $M_{\text{С.СЕР}} = \frac{M_{\text{С}}t_1 + M_{\text{С}}t_2}{t_1 + t_2} = M_{\text{С}}$

Далі визначають середню потужність двигуна з урахуванням заданої швидкості $\Omega_{\text{ЗАД}}$ і динамічних режимів (останні враховують коефіцієнтом запасу $K_{\text{ДИН}} = 1,1 \dots 1,3$).

$$P_{\text{СЕР}} = M_{\text{С.СЕР}} \Omega_{\text{ЗАД}} K_{\text{ДИН}} \cdot 10^{-3}, \text{кВт.}$$

За розрахованою величиною $P_{\text{СЕР}}$ та заданою $\Omega_{\text{ЗАД}}$ з каталогу вибирають найближчий за потужністю двигун, дотримуючись умов $P_{\text{НОМ}} > P_{\text{СЕР}}$, $\Omega_{\text{НОМ}} \approx \Omega_{\text{ЗАД}}$, $U_{\text{НОМ}} \approx U$. Визначають його момент інерції J . Після вибору двигуна побудова навантажувальної діаграми електроприводу $M(t)$ зводиться до розв'язання рівняння руху $M = M_{\text{С}} + J \frac{d\Omega}{dt}$. Скориставшись тахограмою, визначають прискорення $\frac{d\Omega}{dt}$ у динамічних режимах (рис. 2.12, в), розраховують і будують діаграму динамічних моментів $M_{\text{ДИН}} = J \frac{d\Omega}{dt}$ (рис. 2.12, г). На підставі проведених розрахунків будують навантажувальні діаграми електроприводу $M(t)$ і $P(t) = \Omega_{\text{ЗАД}} M$ (рис. 2.12, д, е). Користуючись цими діаграмами, проводять перевірку вибраного двигуна по перевантажувальній здатності, а також по нагріванню.

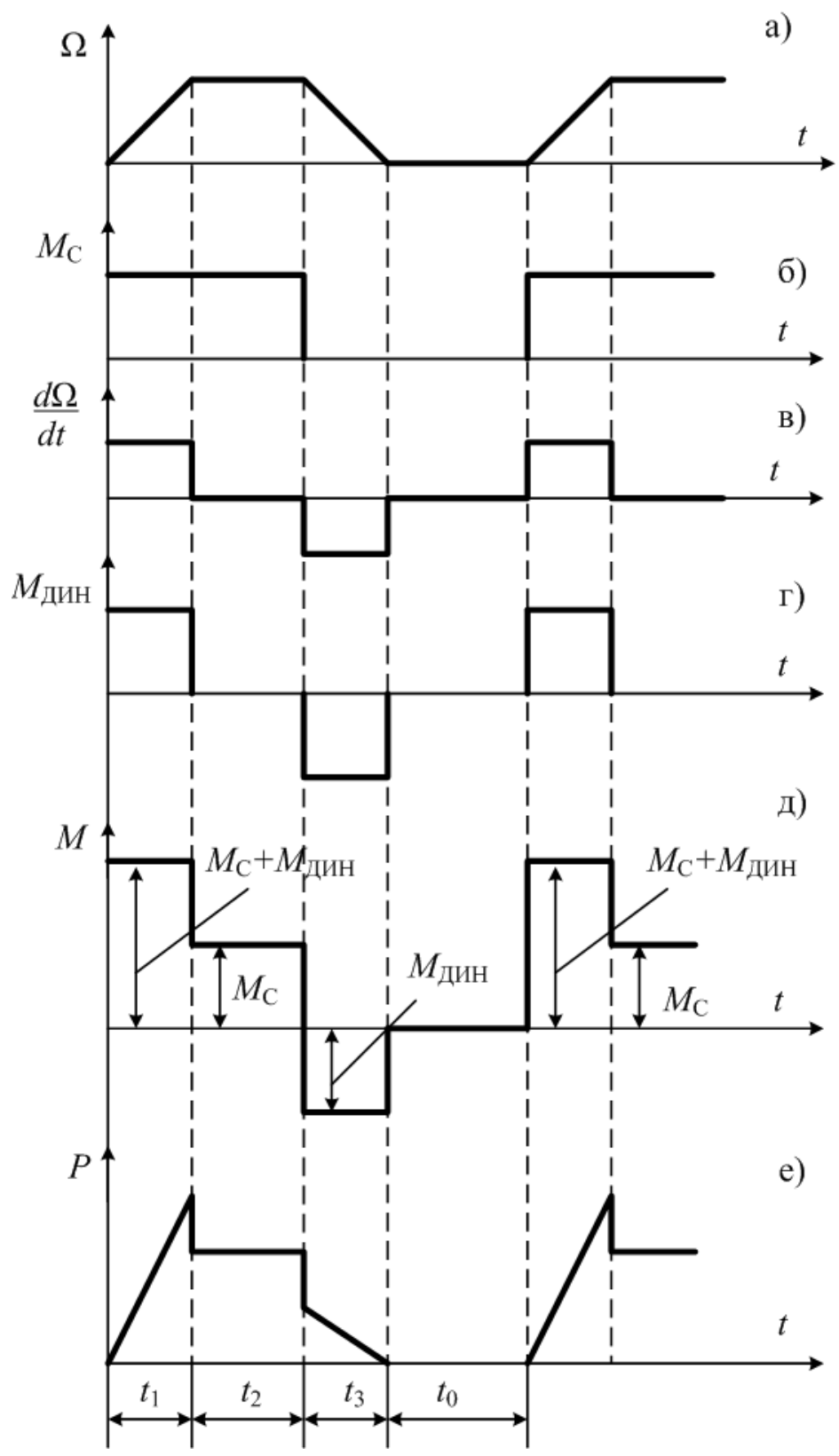


Рис. 2.12

Перевірка вибраного двигуна по перевантажувальній здатності і пусковому моменту

Вибраний двигун повинен забезпечувати нормальну роботу приводу під час тимчасових перевантажень і мати достатній пусковий і максимальний момент. Перевірка двигуна на перевантажувальну здатність полягає в порівнянні найбільшого моменту навантаження $M_{\text{НБ}}$, що визначається графіком навантаження, з максимально допустимим моментом $M_{\text{max доп}}$, який розвиває двигун. Умова усталеної роботи двигуна:

$$M_{\text{НБ}} \leq M_{\text{max доп}}.$$

Якщо в деякий проміжок часу момент навантаження на валу двигуна стане більше, ніж максимально допустимий, то асинхронний двигун може зупинитися, а на колекторі двигуна постійного струму виникне небезпечне іскріння.

Максимальний і номінальний моменти двигуна зв'язані коефіцієнтом $\lambda(M^*) = M_{\text{max}} / M_{\text{НОМ}}$, який називають коефіцієнтом перевантажувальної здатності або кратністю максимального моменту. За відомими для вибраного двигуна значеннями номінального моменту $M_{\text{НОМ}}$ і коефіцієнта λ обчислюють максимально допустимий момент на валу.

Для асинхронного двигуна з урахуванням можливого зниження напруги на 10%

$$M_{\text{max доп}} = (0,81)M_{\text{max}} = (0,81)\lambda M_{\text{НОМ}};$$

для двигунів постійного струму

$$M_{max\text{доп}} = M_{max} = \lambda M_{\text{НОМ}} = (2 - 2,5)M_{\text{НОМ}};$$

для синхронних двигунів нормального виконання

$$M_{max\text{доп}} = M_{max} = \lambda M_{\text{НОМ}} = (2 - 3)M_{\text{НОМ}}.$$

Якщо вибраний двигун задовольняє умові $M_{\text{НБ}} < M_{max\text{ доп}}$, то далі здійснюється його перевірка по нагріванню. У випадку $M_{\text{НБ}} > M_{max\text{ доп}}$ необхідно взяти двигун більшої потужності. Чим більш рівномірний графік навантаження, тим більша вірогідність того, що потужність двигуна буде визначатися найбільшою потужністю навантаження.

Для асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором проводять також перевірку по пусковому моменту. Пусковий момент двигуна $M_{\text{ПУС}} = K_{\text{П}} M_{\text{НОМ}} \geq M_{\text{С0}}$, де $K_{\text{П}}$ – кратність початкового пускового моменту, $M_{\text{С0}}$ – момент опору на валу двигуна при $\Omega = 0$.

Перевірка вибраного двигуна по нагріванню

Найбільш точний метод перевірки полягає у тому, що, користуючись навантажувальною діаграмою $P(t)$ і рівняннями нагрівання та охолодження двигуна, слід визначити температуру максимального перевищення θ_{max} і порівняти її з допустимою. Цей метод вимагає складних обчислень, тому використовується в окремих випадках. Більш зручним і досить точним методом перевірки є метод середніх втрат. Він базується на тому, що за цикл роботи двигуна потужність втрат $\Delta P_{\text{СЕР}}$ не повинна перевищувати потужності втрат за номінального навантаження, тобто $\Delta P_{\text{СЕР}} \leq \Delta P_{\text{НОМ}}$. При виконанні такої умови

середня температура перегрівання не буде перевищувати допустимої величини ($\theta_{\text{СЕР}} \leq \theta_{\text{ДОП}}$), оскільки середня температура пропорційна потужності втрат за цикл, тобто кількості теплоти $\Delta P_{\text{СЕР}} \cdot t$. Відповідно до цього можна записати, що

$$\Delta P_{\text{СЕР}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_{\text{Ц}}},$$

де $k = 1, 2, \dots, n$ - кількість ділянок навантажувальної діаграми;

ΔP_k та t_k - потужність втрат і тривалість k -ї ділянки.

Для визначення ΔP_k необхідно спочатку знайти залежність коефіцієнта корисної дії від моменту навантаження $\eta(M)$ і обчислити потужність на кожній ділянці $P_k = M_k \Omega_k$. Тоді потужність втрат k -ї ділянки

$$\Delta P_k = \frac{P_k \cdot (1 - \eta_k)}{\eta_k},$$

середня потужність втрат за цикл

$$\Delta P_{\text{СЕР}} = \frac{\sum_{k=1}^n \Delta P_k t_k}{t_{\text{Ц}}}.$$

Номінальні втрати потужності двигуна визначаються за паспортними даними

$$\Delta P_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}} (1 - \eta_{\text{НОМ}})}{\eta_{\text{НОМ}}}.$$

Якщо розрахована $\Delta P_{\text{СЕР}} < \Delta P_{\text{НОМ}}$, то двигун вибраний правильно. При $\Delta P_{\text{СЕР}} > \Delta P_{\text{НОМ}}$ двигун буде перегріватися, що неприпустимо. У такому випадку слід вибрати за каталогом двигун найближчої більшої

потужності та повторити розрахунок. Цей метод є достатньо точним і застосовується для вибору потужності двигунів постійного та змінного струмів. Недоліком даного методу є необхідність знання залежності $\eta(M)$ для двигуна і попереднього визначення втрат на кожній ділянці навантажувальної діаграми.

Якщо в результаті побудови навантажувальної діаграми отримані залежності струму $I(t)$, моменту $M(t)$ або потужності $P(t)$ у функції часу, то перевірку попередньо вибраного двигуна можна зробити без обчислення втрат методом еквівалентних величин: струму, моменту або потужності.

Еквівалентними називають незмінні значення струму, моменту і потужності, за яких втрати потужності в двигуні такі самі, як при роботі цього двигуна зі змінним навантаженням.

Втрати потужності в двигуні складаються з постійних втрат, що не залежать від навантаження (втрати в сталі, на тертя в підшипниках, вентиляційні) та змінних втрат, які пропорційні квадрату струму і, таким чином, залежать від навантаження (втрати в обмотках).

Методи еквівалентних величин засновані на методі середніх втрат з урахуванням припущення, що постійні втрати ΔP_n в двигуні не залежать від навантаження. Тоді можна записати:

$$\Delta P_{\text{СЕР}} = \Delta P_{\text{II}} + RI_{\text{ЕКВ}}^2 = \frac{(\Delta P_{\text{II}} + RI_1^2)t_1 + (\Delta P_{\text{II}} + RI_2^2)t_2 + \dots + (\Delta P_{\text{II}} + RI_n^2)t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n},$$

де RI^2 – втрати в міді обмоток двигуна.

З останнього рівняння можна визначити еквівалентний струм:

$$I_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}.$$

Для вибраного двигуна повинна виконуватися умова $I_{\text{НОМ}} > I_{\text{ЕКВ}}$.

Метод еквівалентного струму непридатний у тих випадках, коли необхідно враховувати зміну втрат у сталі і на тертя, а також для короткозамкнених двигунів з глибоким пазом і обмоткою типу «подвійне біляче колесо». Це пояснюється тим, що опір ротора у пускових і гальмівних режимах не залишається постійним.

Похідними від методу еквівалентного струму є методи еквівалентного моменту і потужності.

Змінне навантаження може бути задане у вигляді залежності $M(t)$.

У такому випадку визначають еквівалентний момент:

$$M_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}},$$

потім обчислюють еквівалентну потужність

$$P_{\text{ЕКВ}} = \frac{M_{\text{ЕКВ}} \cdot n_{\text{НОМ}}}{9,55} = 0,105 \cdot M_{\text{ЕКВ}} \cdot n_{\text{НОМ}},$$

де $n_{\text{НОМ}}$ – номінальна швидкість обертання.

Номінальна потужність вибраного двигуна повинна задовольняти умові $P_{\text{НОМ}} \geq P_{\text{ЕКВ}}$. Коли графік змінного навантаження тривалого режиму не має періодів неробочого ходу і швидкість обертання двигуна мало змінюється, застосовують метод еквівалентної потужності, яку визначають за формулою:

$$P_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}.$$

Розрахунок еквівалентної потужності виконують безпосередньо за графіком навантаження, тому це найбільш простий метод. Він використовується для двигунів постійного струму з паралельним збудженням, асинхронних двигунів, які працюють на природній характеристиці, а також синхронних двигунів.

У деяких випадках, наприклад, коли цикл роботи нетривалий і число ввімкнень двигуна на годину досягає кількох десятків, еквівалентні значення струму $I_{\text{ЕКВ}}$, моменту $M_{\text{ЕКВ}}$, потужності $P_{\text{ЕКВ}}$ обчислюють за формулами:

$$I_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{I_{\text{П}}^2 t_{\text{П}} + I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_{\text{Г}}^2 t_{\text{Г}}}{K_1(t_{\text{П}} + t_{\text{Г}}) + t_1 + t_2 + \dots + K_2 t_0}},$$

$$M_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{M_{\text{П}}^2 t_{\text{П}} + M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_{\text{Г}}^2 t_{\text{Г}}}{K_1(t_{\text{П}} + t_{\text{Г}}) + t_1 + t_2 + \dots + K_2 t_0}},$$

$$P_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{P_{\text{П}}^2 t_{\text{П}} + P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_{\text{Г}}^2 t_{\text{Г}}}{K_1(t_{\text{П}} + t_{\text{Г}}) + t_1 + t_2 + \dots + K_2 t_0}}.$$

У наведених формулах $t_{\text{П}}$, $t_{\text{Г}}$, t_0 – час пуску, гальмування і паузи; $I_{\text{П}}$, $I_{\text{Г}}$, $M_{\text{П}}$, $M_{\text{Г}}$, $P_{\text{П}}$, $P_{\text{Г}}$ – середні значення струму, моменту, потужності у відповідні проміжки часу $t_{\text{П}}$, $t_{\text{Г}}$; K_1 – коефіцієнт, що враховує зниження тепловіддачі при пуску і гальмуванні; K_2 – коефіцієнт, що враховує зменшення тепловіддачі протягом паузи. Для двигунів постійного струму $K_1 = 0,75$, $K_2 = 0,5$; для асинхронних двигунів $K_1 = 0,5$, $K_2 = 0,25$.

Визначення часу пуску $t_{\text{П}}$ і гальмування $t_{\text{Г}}$ було розглянуте у розділі 2.1.4.

2.2.4. Особливості розрахунку потужності двигуна в залежності від теплового режиму роботи.

Вибір двигуна для тривалого режиму з постійним навантаженням

Якщо температура навколишнього середовища не відрізняється від прийнятої держстандартом 40°C , то вибір потужності двигуна, який має працювати у вказаному режимі, зводиться до вибору його за каталогом. **Умова вибору: номінальна потужність двигуна повинна бути найбільш близькою або рівною потужності навантаження, тобто**

$$P_{\text{НОМ}} \geq P.$$

Вибір двигуна для тривалого режиму зі змінним навантаженням

У загальному випадку, коли задана статична часова залежність моменту $M_{\text{C}}(t)$ або потужності $P_{\text{C}}(t)$ виробничого механізму і тахограма $\Omega(t)$, вибір двигуна виконують за методикою, наведеною у підрозділі 2.2.3.

Якщо відома навантажувальна діаграма *самого двигуна* у вигляді часової функції $P(t)$, або $M(t)$, або $I(t)$, то за методом еквівалентної величини розраховують, скориставшись діаграмою, $P_{\text{ЕКВ}}$, або $M_{\text{ЕКВ}}$ і відповідну потужність $P_{\text{ЕКВ}} = 0,105M_{\text{ЕКВ}}n_{\text{ЗАД}}$; або $I_{\text{ЕКВ}}$ і відповідну потужність $P_{\text{ЕКВ}} = I_{\text{ЕКВ}}U$. Далі за каталогом вибирають двигун з умови

$P_{\text{НОМ}} \geq P_{\text{ЕКВ}}$, $n_{\text{НОМ}} \approx n_{\text{Зад}}$, $U_{\text{НОМ}} = U$ і перевіряють вибраний двигун по перевантажувальній здатності, а при важких умовах пуску ще й по пусковому моменту.

Вибір двигуна для повторно-короткочасного режиму

Для такого режиму можна вибрати спеціальний двигун, номінальна потужність якого вказується для одного із стандартних значень тривалості включення ($TB = 15\%, 25\%, 40\%, 60\%$). Скориставшись графіком навантаження, визначають еквівалентну потужність $P_{\text{ЕКВ}}$ двигуна.

У разі багатоступінчастого графіка навантаження, заданого функцією часу:

1. $I(t)$

$$I_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\sum_{k=1}^m I_k t_k / \sum_{k=1}^n t_k}, \text{ тоді } P_{\text{ЕКВ}} = I_{\text{ЕКВ}} U_{\text{НОМ}};$$

2. $M(t)$

$$M_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\sum_{k=1}^n M_k t_k / \sum_{k=1}^n t_k}, \text{ тоді } P_{\text{ЕКВ}} = 0,105 M_{\text{ЕКВ}} n;$$

3. $P(t)$

$$P_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\sum_{k=1}^n P_k t_k / \sum_{k=1}^n t_k}.$$

При обчисленнях за вищенаведеними формулами час паузи не враховується, оскільки він врахований величиною тривалості ввімкнення двигуна.

Далі обчислюють фактичну тривалість ввімкнення двигуна:

$$TB = \frac{\sum_{k=1}^n t_k}{\sum_{k=1}^n t_k + t_0} \cdot 100\% .$$

У випадку одноступінчастого графіка навантаження

$$I_{\text{ЕКВ}} = I ; M_{\text{ЕКВ}} = M ; P_{\text{ЕКВ}} = P ; TB = 100\% \cdot t_p / (t_p + t_0)$$

Якщо фактична тривалість увімкнення виявляється рівною або близькою до стандартної величини, то потужність двигуна вибирають з умови $P_{\text{НОМ}} \geq P_{\text{ЕКВ}}$. На практиці в багатьох випадках фактична тривалість увімкнення відрізняється від стандартної. У разі вибору $P_{\text{НОМ}} \geq P_{\text{ЕКВ}}$ і $TB\% > TB_{\text{СТ}}\%$ двигун буде перевантажений по нагріванню, а при $TB\% < TB_{\text{СТ}}\%$ - недовантажений. При невідповідності ТВ стандартній величині, розраховані $I_{\text{ЕКВ}}$, $M_{\text{ЕКВ}}$, $P_{\text{ЕКВ}}$ з достатньою для практики точністю можуть бути перераховані на найближчу (більшу або меншу) стандартну тривалість увімкнення:

$$I'_{\text{ЕКВ}} = I_{\text{ЕКВ}} \sqrt{\frac{TB}{TB_{\text{СТ}}}} ; M'_{\text{ЕКВ}} = M_{\text{ЕКВ}} \sqrt{\frac{TB}{TB_{\text{СТ}}}} ; P'_{\text{ЕКВ}} = P_{\text{ЕКВ}} \sqrt{\frac{TB}{TB_{\text{СТ}}}} .$$

$$\text{Потужність двигуна вибирають з умови } P_{\text{НОМ}} \geq P_{\text{ЕКВ}} \sqrt{\frac{TB}{TB_{\text{СТ}}}} .$$

Так само виконують розрахунок потужності двигуна у разі заміни його двигуном з іншим значенням TB . Якщо двигун розрахований на роботу в повторно-короткочасному режимі з TB_1 , то при роботі в режимі з TB_2 потужність двигуна можна збільшити або зменшити пропорційно

$$\frac{P_1}{P_2} = \sqrt{\frac{TB_2}{TB_1}}.$$

Приклад. Визначити допустимий момент двигуна, який працює в повторно-короткочасному режимі з $TB=25\%$, якщо його номінальний момент у тривалому режимі $M_{\text{НОМ}} = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Розв'язання. Враховуючи, що у тривалому режимі $TB=1$, обчислюємо:

$$M_{\text{ДОП}} = M_{\text{НОМ}} \sqrt{\frac{1}{0,25}} = 100\sqrt{4} = 200 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Зауваження. Якщо для роботи у повторно-короткочасному режимі буде використовуватися двигун, призначений для тривалого режиму, то його перевірка по нагріванню виконується за вищенаведеними формулами, в яких треба $TB_{\text{СТ}} = 100\%$.

Вибір двигуна для короткочасного режиму

Потужність двигуна вибирають не за умовами нагрівання, а за умовами допустимих значень перевантажувального моменту і струму. Особливості нагрівання окремих частин машини враховуються заводами-виробниками при випуску спеціальних двигунів, які мають велику перевантажувальну здатність і розраховані на роботу протягом 10, 30, 60 і 90 хв. Такі двигуни вибирають за каталогом серій двигунів короткочасного режиму роботи з умови, що його максимальний момент M_{max} повинен бути більше максимального моменту навантаження.

Якщо дані навантажувальної діаграми відповідають номінальним даним двигуна, то перевірка по нагріванню не потрібна. У випадку, коли

дані навантажувальної діаграми відрізняються від паспортних, слід розрахувати еквівалентну потужність $P_{\text{ЕКВ}}$, привівши її до найближчого стандартного часу $t_{\text{Р СТ}}$. Двигун буде працювати у нормальному тепловому режимі за умови $P_{\text{НОМ}} \geq P_{\text{ЕКВ}} \sqrt{t_{\text{Р}} / t_{\text{Р СТ}}}$, де $t_{\text{Р}}$ - фактичний час роботи, взятий з навантажувальної діаграми.

При роботі в короткочасному режимі двигун може бути навантажений більше, ніж у тривалому. Проте застосовувати в короткочасних режимах роботи двигуни, які призначені для тривалої роботи, небажано. Нормальні двигуни з повним навантаженням по нагріванню в короткочасному режимі роботи можуть бути використані тільки в поодиноких випадках, оскільки діапазон допустимої потужності двигуна обмежується перевантажувальною здатністю по механічним і електричним властивостям. Якщо двигун, призначений для тривалої роботи з номінальною потужністю $P_{\text{НОМ}}$, працює у короткочасному режимі з потужністю $P_{\text{КР}}$, то потужності $P_{\text{КР}}$ і $P_{\text{НОМ}}$ зв'язані співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{КР}} &= P_{\text{НОМ}} \cdot K_{\text{МЕХ}} \\ P_{\text{КР}} &= P_{\text{НОМ}} \cdot \sqrt{K_{\text{ТЕП}}} \end{aligned} \right\}$$

де $K_{\text{МЕХ}}$ – коефіцієнт механічного перевантаження, $K_{\text{ТЕП}}$ – коефіцієнт теплового перевантаження двигуна при номінальній напрузі.

$$K_{\text{ТЕП}} = \frac{1}{1 - e^{-t_{\text{КР}}/T_{\text{Н}}}},$$

де $t_{\text{КР}}$ – тривалість роботи у короткочасному режимі, $T_{\text{Н}}$ – стала нагріву двигуна (для асинхронних двигунів захищеного виконання малої та середньої потужності зазвичай приймають $T_{\text{Н}} = 15 \dots 60$ хвилин).

З наведених вище рівнянь випливає співвідношення між коефіцієнтами: $K_{\text{ТЕП}} = K_{\text{МЕХ}}^2$.

Зауваження. Двигуни, призначені для короткочасного режиму, недоцільно використовувати у тривалому режимі через властиві їм підвищені втрати потужності. Іноді такі двигуни не можуть працювати у тривалому режимі навіть без навантаження, перегріваючись вище допустимого рівня.

2.3. Основні розрахункові співвідношення

Рівняння руху електропривода

$$M - M_C = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (2.1)$$

де M - обертовий момент двигуна, **Н·м**; M_C - статичний момент навантаження, **Н·м**; J - момент інерції, кг/м^2 ; Ω - кутова швидкість обертання, рад/с ; t - час, с ; $d\Omega/dt$ - кутове прискорення; $J \frac{d\Omega}{dt}$ - динамічний момент, **Н·м**.

Приведення моменту статичного навантаження до валу двигуна

якщо енергія надходить від двигуна до механізму $M_C = \frac{M_M}{i\eta}$; (2.2)

якщо енергія надходить від механізму до двигуна $M_C = \frac{M_M \eta}{i}$, (2.3)

де M_C - статичний момент навантаження, приведений до валу двигуна, **Н·м**; M_M - момент опору механізму, **Н·м**; i - передавальне число механічної передачі; η - ККД механічної передачі.

Приведення моментів інерції рухомих мас до валу двигуна

$$J = J_{\text{дв}} + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_2}{i_2^2} + \dots + \frac{J_n}{i_n^2} + m \left(\frac{V}{\Omega} \right)^2, \quad (2.4)$$

де $J_{\text{дв}}$ - момент інерції двигуна, **Н·м**; J_1, J_2, \dots, J_n - моменти інерції ланок систем із обертовими масами, **Н·м**; i_1, i_2, \dots, i_n - передавальні числа механічної передачі відповідних ланок системи; mV^2 / Ω^2 - приведений момент інерції мас, що рухаються поступально, **Н·м**; m - маса, кг; V - швидкість руху, м/с; Ω - кутова швидкість обертання валу двигуна, рад/с.

Час розгону t_p і час гальмування t_Γ електроприводу

$$t_p = \frac{J \Delta n}{9,55(M_{\text{СЕР}} - M_{\text{ССЕР}})}; \quad (2.5)$$

$$t_\Gamma = \frac{J \Delta n}{9,55(M_{\text{СЕР}} + M_{\text{ССЕР}})}, \quad (2.6)$$

де J – сумарний момент інерції системи, кг/м²; $\Delta n = n_{\text{КІН}} - n_{\text{ПОЧ}}$ відповідно кінцева і початкова швидкість обертання, об/хв.; $M_{\text{СЕР}}$ - середній момент двигуна в інтервалі зміни швидкості Δn , **Н·м**; $M_{\text{ССЕР}}$ - середній момент сил опору в інтервалі швидкості Δn , **Н·м**.

Вибір потужності (або перевірка попередньо вибраної потужності) двигуна по нагріванню методом еквівалентних величин

Метод еквівалентного струму:

$$I_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{I_{\Pi}^2 t_{\Pi} + I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_{\Gamma}^2 t_{\Gamma}}{K_1(t_{\Pi} + t_{\Gamma}) + t_1 + t_2 + \dots + K_2 t_0}}; \quad (2.7)$$

Метод еквівалентного моменту:

$$M_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{M_{\Pi}^2 t_{\Pi} + M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_{\Gamma}^2 t_{\Gamma}}{K_1(t_{\Pi} + t_{\Gamma}) + t_1 + t_2 + \dots + K_2 t_0}}; \quad (2.8)$$

Метод еквівалентної потужності:

$$P_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{P_{\Pi}^2 t_{\Pi} + P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_{\Gamma}^2 t_{\Gamma}}{K_1(t_{\Pi} + t_{\Gamma}) + t_1 + t_2 + \dots + K_2 t_0}}; \quad (2.9)$$

де t_{Π}, t_{Γ}, t_0 - час пуску, гальмування, паузи; $I_{\Pi}, M_{\Pi}, P_{\Pi}$ - середні значення струму, моменту, потужності в часовому інтервалі пуску t_{Π} ; $I_{\Gamma}, M_{\Gamma}, P_{\Gamma}$ - в часовому інтервалі гальмування t_{Γ} ; I_k, M_k, P_k - в часових інтервалах роботи двигуна з незмінним навантаженням; K_1, K_2 - коефіцієнти, що враховують зниження тепловіддачі при пуску, гальмуванні і під час паузи. Для двигунів постійного струму $K_1 = 0,75$, $K_2 = 0,5$; для синхронних двигунів $K_1 = 0,5$; $K_2 = 0,25$.

Якщо час роботи двигуна в десятки разів перевищує сумарний час пуску, гальмування і паузи, то відпадає необхідність враховувати їх вплив на нагрівання двигуна. У таких випадках використовують спрощені формули:

$$I_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}; \quad (2.10)$$

$$M_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}; \quad (2.11)$$

$$P_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}; \quad (2.12)$$

Перерахунок $I_{\text{ЕКВ}}$, $M_{\text{ЕКВ}}$, $P_{\text{ЕКВ}}$ на стандартну тривалість увімкнення двигуна при повторно-короткочасному режимі роботи

Якщо фактична тривалість $TB\%$ роботи двигуна у повторно-короткочасному режимі відрізняється від стандартної тривалості $TB_{\text{СТ}}\% = 15\%$, 25% , 40% , 60% , то розраховані за вищенаведеними формулами величини $I_{\text{ЕКВ}}$, $M_{\text{ЕКВ}}$, $P_{\text{ЕКВ}}$ перераховують за формулами:

$$I_{\text{P}} = I_{\text{ЕКВ}} \sqrt{\frac{T\text{B}}{T\text{B}_{\text{СТ}}}}; \quad M_{\text{P}} = M_{\text{ЕКВ}} \sqrt{\frac{T\text{B}}{T\text{B}_{\text{СТ}}}}; \quad P_{\text{P}} = P_{\text{ЕКВ}} \sqrt{\frac{T\text{B}}{T\text{B}_{\text{СТ}}}}; \quad (2.13)$$

де $T\text{B}_{\text{СТ}}\%$ - найближча до фактичної (більша або менша) стандартна тривалість увімкнення, пропонована каталогом.

Перерахунок потужностей двигуна, призначеного для тривалого режиму, при використанні його у короткочасному режимі

$$P_{\text{КР}} = P_{\text{НОМ.ТР}} \sqrt{K_{\text{ТЕП}}}, \quad (2.14)$$

де $P_{\text{КР}}$ - потужність у короткочасному режимі; $P_{\text{НОМ}}$ - потужність у тривалому режимі; $K_{\text{ТЕП}}$ - коефіцієнт теплового перевантаження

$$K_{\text{ТЕП}} = \frac{1}{1 - e^{-t_{\text{КР}}/T_{\text{H}}}}, \quad (2.15)$$

$t_{\text{КР}}$ - термін роботи у короткочасному режимі (стандартні тривалості 10, 30, 60 і 90 хвилин); T_{H} - стала нагріву (для синхронних двигунів захищеного виконання малої та середньої потужності зазвичай приймають $T_{\text{H}} = 15 \dots 60$ хв).

$$P_{\text{кр}} = P_{\text{ном.тр}} K_M, \quad (2.16)$$

де K_M - коефіцієнт механічного перетворення.

$$K_{\text{теп}} = K_M^2. \quad (2.17)$$

Вибір найбільш вигідного передатного числа механічної передачі

Передаточне число редуктора

$$i = n_{\text{дв}} / n_M, \quad (2.18)$$

де $n_{\text{дв}}$ - швидкість обертання валу двигуна, об/хв; n_M - швидкість обертання механізму, об/хв.

Найбільш вигідна величина передаточного числа редуктора визначається з умови $mD^2 i^2 = \min$;

Маховий момент двигуна mD^2 обчислюється за відомим із каталогу моментом інерції J двигуна:

$$mD^2 = 4J. \quad (2.19)$$

Розрахункові потужності двигунів для деяких поширених механізмів

Для привода відцентрового вентилятора

$$P = \frac{QH}{\eta_B \eta_{\Pi}}, \quad (2.20)$$

де Q - продуктивність вентилятора, м³/с; H - тиск газу, Н/м²; η_B - ККД вентилятора; η_{Π} - ККД передачі (зазвичай $\eta_B \eta_{\Pi} = 0,4 \dots 0,75$).

Для приводу насоса

$$P = \frac{\gamma Q (H + \Delta H)}{\eta_H \eta_{\Pi}}, \quad (2.21)$$

де γ - питома маса, Н/м³; Q - продуктивність насоса, м³/с; H - статичний напір, м; ΔH - спад напору в магістралях, м; η_H - ККД насоса; η_{Π} - ККД передачі.

Для приводу компресора

$$P = \frac{QA}{\eta_K \eta_{II}}, \quad (2.22)$$

де Q - продуктивність компресора, м³/с; A - робота, яка витрачається на стискання одного кубічного метра газу до необхідного тиску, Вт · с;

η_K - ККД компресора; η_{II} - ККД передачі.

Для приводу підйомного механізму у випадку підйома вантажа :

а) без противажеля

$$P = \frac{(G + G_0)V}{\eta_M \eta_{II}}, \quad (2.23)$$

б) за наявності противажеля

$$P = \frac{(G + G_0 - G_{IP})V}{\eta_M \eta_{II}}, \quad (2.24)$$

де G - маса корисного вантажа, Н; G_0 - маса пристрою, що тримає вантаж і т. і., G_{IP} - маса противажеля, Н; V - швидкість підйому, м/с; η_M - ККД механізму; η_{II} - ККД передачі.

Для приводу механізмів протягування стрічок конвеєрів, транспортерів тощо

$$P = \frac{FV}{\eta_M \eta_{II}}, \quad (2.25)$$

де F - тягове зусилля, Н; V - швидкість, м/с; η_M - ККД механізму; η_{II} - ККД передачі.

2.4. Типові розв'язані задачі

Задача 2.1. Для приводу вентилятора, що працює у тривалому режимі з незмінним навантаженням, використовують електродвигун типу 4А80В4У3 з такими номінальними даними: $P_{\text{НОМ}}=1,5$ кВт, $n_{\text{НОМ}}=1415$ об/хв.

Механічні характеристики двигуна і вентилятора подані на рис 2.13.

Визначити: швидкість обертання; потужність двигуна; час, необхідний для розгону приводу, якщо моменти інерції ротора $J_{\text{р}} = 0,0105$ кг·м², а моменти інерції вентилятора $J_{\text{в}} = 0,7J_{\text{р}}$.

Розв'язання. Точка P перетину характеристик двигуна і вентилятора відповідає робочому режиму двигуна. Спроектувавши точку P на вісі n_2 , M визначаємо швидкість обертання ротора $n_2 = 1440$ об/хв і обертовий момент двигуна $M = 9,4$ Н·м. За цими даними обчислюємо потужність, з якою працює двигун:

$$P_2 = 0,105Mn_2 = 0,105 \cdot 9,4 \cdot 1440 \cdot 10^{-3} = 1,42 \text{ кВт.}$$

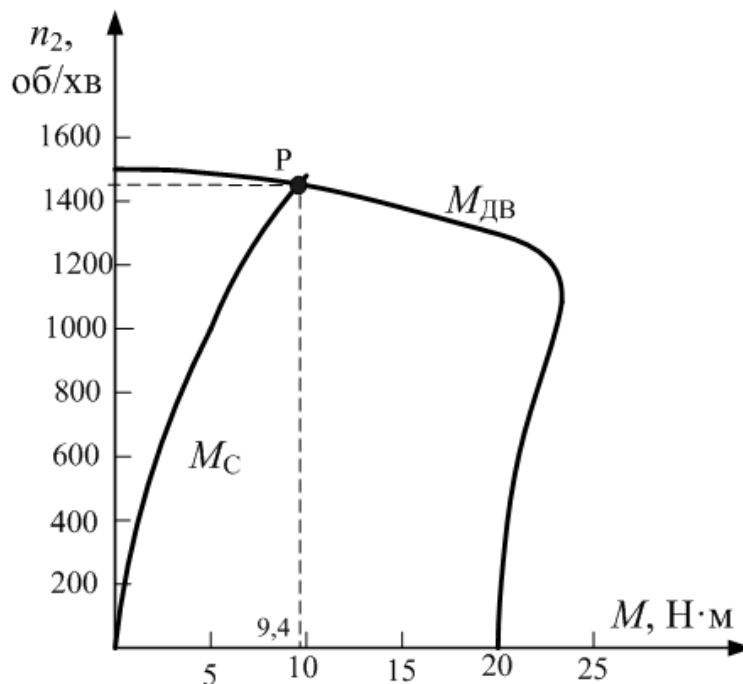


Рис. 2.13

Розрахована потужність дещо менша ніж номінальна, але найближчий за потужністю двигун має $P_{\text{НОМ}}=1,1$ кВт.

Далі за допомогою механічних характеристик на рис 2.13 знаходимо динамічний момент $M_{\text{ДИН}} = M_{\text{ДВ}} - M_{\text{С}}$, за рахунок якого відбувається розгін електропривода від швидкості $n_{\text{ПОЧ}} = 0$ до $n_{\text{УСТ}} = 1440$ об/хв (дивись підрозділ 2.1.4). Середнє значення $M_{\text{ДИН}} = 17$ Н·м, тоді за формулою (2.5) визначаємо час розгону приводу:

$$t_{\text{РОЗ}} = \frac{J(n_{\text{УСТ}} - n_{\text{ПОЧ}})}{9,55M_{\text{ДИНСЕР}}} = \frac{(0,0105 + 0,0105 \cdot 0,7)(1440 - 0)}{9,55 \cdot 17} = 0,16 \text{ с.}$$

Задача 2.2. Електропривод з асинхронним двигуном типу 4А180S2У2 пускається з моментом навантаження $M_{\text{С0}} = 0,4M_{\text{НОМ}}$ і розганяється до швидкості обертання $n = 2940$ об/хв. Сумарний момент інерції електроприводу, приведений до валу двигуна, $J = 0,125$ кг·м².

Визначити час розгону електроприводу.

Розв'язання. Для вказаного в умові задачі двигуна за даними каталогу

$$P_{\text{НОМ}} = 22 \text{ кВт}, \quad n_{\text{НОМ}} = 2940 \text{ об/хв}, \quad \lambda = M_{\text{max}}/M_{\text{ПУС}} = 2,5,$$

$$M_{\text{ПУС}} = 1,4M_{\text{НОМ}}.$$

Номінальний момент двигуна

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{9,55P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{9,55 \cdot 22 \cdot 10^3}{2940} = 70,4 \text{ Н·м};$$

$$\text{максимальний момент} \quad M_{\text{max}} = \lambda M_{\text{НОМ}} = 2,5 \cdot 70,4 = 176 \text{ Н·м};$$

пусковий момент $M_{\text{ПВС}} = 1,14M_{\text{НОМ}} = 1,4 \cdot 70,4 = 98,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$

З певними припущеннями можна прийняти, що середнє значення динамічного моменту двигуна в режимі пуску

$$M_{\text{СЕР}} = (M_{\text{max}} + M_{\text{ПВС}})/2 = (176 + 98,5)/2 = 137,2 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

час розгону двигуна (2.5)

$$t_p = \frac{J\Delta n}{9,55(M_{\text{СЕР}} - M_{\text{C0}})} = \frac{0,125 \cdot (2940 - 0)}{9,55(137,2 - 0,4 \cdot 70,4)} = 0,34 \text{ с}.$$

Задача 2.3. Визначити необхідну потужність і вибрати за каталогом асинхронний двигун з короткозамкненим ротором загальнопромислового призначення для вентилятора з продуктивністю $Q = 5000 \text{ м}^3/\text{Год}$ при тиску 981 Па, ККД вентилятора 40% і швидкості обертання 1450 об/хв.

Розв'язання. Скориставшись формулою (2.19) розраховуємо

$$P = \frac{QH}{n_B n_{\Pi}} = \frac{5000 \cdot 981}{3600 \cdot 0,4 \cdot 1} = 3406 \text{ Вт}.$$

За каталогом вибираємо найближчий більший за потужністю двигун типу 4A100L4У3, номінальна потужність якого $P_{\text{НОМ}} = 4 \text{ кВт}$ і швидкість обертання 1430 об/хв.

Вибраний двигун не вимагає перевірки по нагріванню та на перевантажувальну здатність і на пусковий момент, оскільки він розрахований на роботу при номінальній потужності у тривалому режимі і має малий протидіючий момент під час запуску.

Задача 2.4. Двигун постійного струму має обертати металообробний автомат зі швидкістю $n = 3000$ об/хв. Напряга живлення двигуна $U = 220$ В. Зміна струму в двигуні відбувається у таких часових інтервалах:

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 1. $I = 40$ А, $t = 120$ с; | 2. $I = 30$ А, $t = 180$ с; |
| 3. $I = 20$ А, $t = 300$ с; | 4. $I = 40$ А, $t = 120$ с; |
| 5. $I = 30$ А, $t = 180$ с; | 6. $I = 20$ А, $t = 300$ с. |

Вибрати двигун із серії П, який забезпечить роботу металообробного автомату.

Розв'язання. Скористаємося методом еквівалентного струму (2.7) і обчислимо значення $I_{\text{ЕКВ}}$ за робочий цикл:

$$I_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n I_k^2 t_k}{\sum_{k=1}^n t_k}} = \sqrt{\frac{40^2 \cdot 120 + 30^2 \cdot 180 + 20^2 \cdot 300}{120 + 180 + 300}} = 28 \text{ А.}$$

Еквівалентна потужність двигуна

$$P_{\text{ЕКВ}} = UI_{\text{ЕКВ}} = 220 \cdot 28 = 6,16 \text{ кВт.}$$

Вибираємо за каталогом двигун, у якого $P_{\text{НОМ}} \geq P_{\text{ЕКВ}}$. Найближчий за потужністю двигун П42, що має такі технічні дані: $P_{\text{НОМ}} = 8$ кВт, $U = 220$ В, $n_{\text{НОМ}} = 3000$ об/хв., ККД $\eta = 0,83$, $I_{\text{НОМ}} = 43,5$ А. Номінальний струм двигуна перевищує максимальне значення $I_{\text{max}} = 40$ А при роботі з навантаженням, тому двигун не буде перегріватися.

Задача 2.5. За умовами технологічного процесу двигун має забезпечити

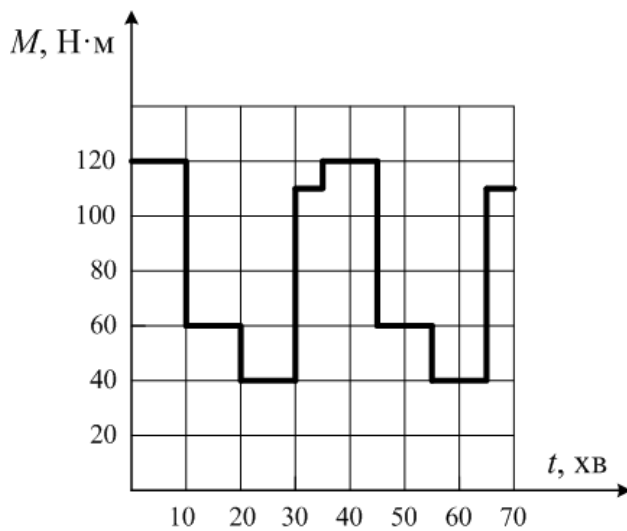


Рис. 2.14

роботу механізму у режимі, заданому навантажувальною діаграмою на рис. 2.14, при частоті обертання $n = 1470$ об/хв. Визначити потужність асинхронного двигуна для приводу механізму, вибрати двигун за каталогом і виконати перевірку на перевантажувальну здатність.

Розв'язання. Для визначення потужності двигуна використовуємо метод еквівалентного моменту (2.8). За спрощеною формулою еквівалентний момент

$$M_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + M_4^2 t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}} =$$

$$= \sqrt{\frac{120^2 \cdot 10 + 60^2 \cdot 10 + 40^2 \cdot 10 + 110^2 \cdot 6}{10 + 10 + 10 + 6}} = 86,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Еквівалентна потужність двигуна

$$P_{\text{ЕКВ}} = 0,105 M_{\text{ЕКВ}} n_2 = 0,105 \cdot 86,4 \cdot 1470 \cdot 10^{-3} = 13,3 \text{ кВт}.$$

Відповідно до $P_{\text{ЕКВ}}$ вибираємо двигун 4A160S4У3, що має такі технічні дані: $P_{\text{НОМ}} = 15$ кВт, $n_{2\text{НОМ}} = 1465$ об/хв., кратність максимального моменту $\lambda = 2,3$.

Для вибраного двигуна:

номінальний момент

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{2\text{НОМ}}} = 9,55 \frac{15 \cdot 10^3}{1465} = 97,8 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

максимальний момент

$$M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_{\text{НОМ}} = 2,3 \cdot 97,8 = 225 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

максимально допустимий момент з урахуванням зниження напруги на 10%

$$M_{\text{max доп}} = 0,81 M_{\text{max}} = 0,81 \cdot 225 = 182 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

З графіка навантаження найбільший момент $M_{\text{НБ}} = 120 \text{ Н} \cdot \text{м}$, тому перевантажувальна здатність двигуна відповідно умові $M_{\text{НБ}} < M_{\text{max доп}}$ достатня.

Задача 2.6. Вибрати двигун для привода механізму, режим роботи якого заданий навантажувальною діаграмою на рис. 2.15. За технологічними умовами слід використовувати асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Двигун повинен мати швидкість обертання $n = 980 \text{ об/хв}$. Приміщення, де встановлений двигун, сухе, без пилу і бруду.

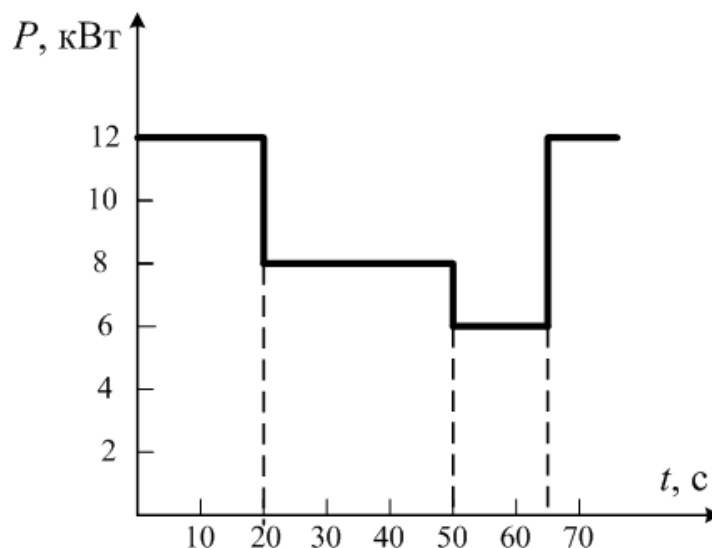


Рис. 2.15

Розв'язання. За умовою задачі режим роботи двигуна тривалий зі змінним навантаженням. Для визначення потужності двигуна скористаємося методом еквівалентної потужності (2.9):

$$P_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (P_k^2 t_k) / t_{\text{Ц}}}.$$

Час робочого циклу $t_{\text{Ц}}$ $t_{\text{Ц}} = t_1 + t_2 + t_3 = 20 + 30 + 15 = 65 \text{ с,}$

відповідно $P_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{12^2 \cdot 20 + 8^2 \cdot 30 + 6^2 \cdot 15}{65}} = 9,05 \text{ кВт.}$

За даними каталогу для привода заданого механізму можна використати асинхронний короткозамкнений двигун захищеного виконання типу А2-61-6, у якого $U_{\text{НОМ}} = 380/220 \text{ В; } P_{\text{НОМ}} = 10 \text{ кВт;}$
 $n_{\text{НОМ}} = 965 \text{ об/хв; } \eta_{\text{НОМ}} = 0,87; \quad M_{\text{ПУСК}}/M_{\text{НОМ}} = 1,2;$
 $M_{\text{max}}/M_{\text{НОМ}} = 1,8.$

Для вибраного двигуна:

номінальний момент

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{9,55 P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{9,55 \cdot 10 \cdot 10^3}{965} = 99 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

максимальний момент

$$M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_{\text{НОМ}} = 1,8 \cdot 99 = 178 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

максимально допустимий момент з урахуванням зниження напруги на 10%

$$M_{\text{max доп}} = 0,81 M_{\text{max}} = 0,81 \cdot 178 = 144 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

найбільший момент навантаження

$$M_{\text{нб}} = \frac{9,55 \cdot P_1}{n} = \frac{9,55 \cdot 12 \cdot 10^3}{980} = 117 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

З розрахунків видно, що $M_{\text{нб}} < M_{\text{max доп}}$, тому вибраний двигун задовольняє умові перевантажувальної здатності.

Задача 2.7. Механізм працює у повторно-короткочасному режимі з циклічним графіком моменту (рис. 2.16). Швидкість обертання механізму 930 об/хв. Вибрати за каталогом трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором для приводу механізму. Перевірити двигун на перевантажувальну здатність.

Розв'язання. Еквівалентний момент на валу (2.8)

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{30^2 \cdot 5 + 60^2 \cdot 10 + 40^2 \cdot 10}{5 + 10 + 10}} = 47,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

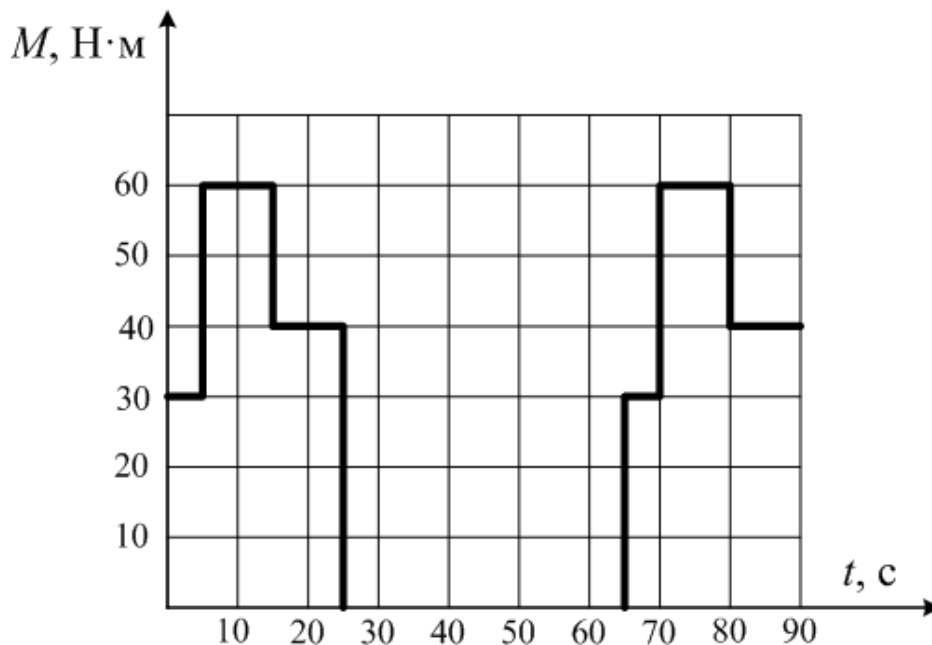


Рис. 2.16

Тривалість ввімкнення

$$TB = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_{\text{ц}}} 100\% = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0} 100\% = \\ = \frac{5 + 10 + 10}{5 + 10 + 10 + 40} 100\% = 38,5\%.$$

Еквівалентна потужність

$$P_{\text{ЕКВ}} = 0,105 M_{\text{ЕКВ}} n = 0,105 \cdot 47,5 \cdot 930 \cdot 10^{-3} = 4,63 \text{ кВт.}$$

Двигун вибираємо з умови

$$P_{\text{НОМ}} \geq P_{\text{ЕКВ}} \sqrt{\frac{TB}{TB_{\text{СТ}}}} = 4,63 \sqrt{\frac{38,5}{40}} = 4,54 \text{ кВт.}$$

Для стандартної тривалості ввімкнення $TB_{\text{СТ}} = 40\%$ вибираємо двигун

4AC132S6Y3 з такими технічними даними: $P_{\text{НОМ}} = 6,3 \text{ кВт}$,

$n_{2\text{НОМ}} = 935 \text{ об/хв}$, $M_{\text{НОМ}} = 64,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$, кратність максимального

моменту $\lambda = 2,1$.

У вибраного двигуна:

максимальний момент

$$M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_{\text{НОМ}} = 2,1 \cdot 64,2 = 135 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

максимально допустимий момент з урахуванням зниження напруги на 10%

$$M_{\text{max доп}} = 0,81 M_{\text{max}} = 0,81 \cdot 135 = 109 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

З графіка навантаження видно, що найбільший момент $M_{\text{НБ}} = 60 \text{ Н}\cdot\text{м}$ і перевантажувальна здатність двигуна достатня, оскільки $M_{\text{НБ}} < M_{\text{max доп}}$.

Задача 2.8. Двигун 4A200L4Y3, призначений для тривалого режиму роботи, має такі технічні дані: $P_{\text{НОМ}} = 45 \text{ кВт}$; $n_{2\text{НОМ}} = 1475 \text{ об/хв}$,

кратність максимального моменту $\lambda = 2,5$, стала нагріву $T_H = 55$ хв. Який час двигун може працювати, не перегріваючись, у короткочасному режимі з моментом навантаження $M = 1,5M_{\text{НОМ}}$?

Розв'язання. За умовою задачі коефіцієнт механічного перевантаження при номінальній напрузі $K_{\text{МЕХ}} = M/M_{\text{НОМ}} = 1,5$; відповідний коефіцієнт теплового перевантаження (2.17)

$$K_{\text{ТЕП}} = K_{\text{МЕХ}}^2 = 1,5^2 = 2,25.$$

Враховуючи, що $K_{\text{ТЕП}} = 1/(1 - e^{t_{\text{КР}}/T})$,

$$\text{отримуємо } t_{\text{КР}} = T_H \ln \frac{K_{\text{ТЕП}}}{K_{\text{ТЕП}} - 1} = 55 \ln \frac{2,25}{2,25 - 1} = 32,3 \text{ хв.}$$

Задача 2.9. З двигунів постійного струму, призначених для роботи у тривалому режимі, вибрати двигун для підйомного механізму, який працює у повторно-короткочасному режимі. Робочий цикл продовжується 135 с і має такі інтервали навантаження:

- | | |
|---|--|
| 1. $M_1 = 500 \text{ Н} \cdot \text{м}, t_1 = 5 \text{ с};$ | 2. $M_2 = 225 \text{ Н} \cdot \text{м}, t_2 = 20 \text{ с};$ |
| 3. $M_3 = 150 \text{ Н} \cdot \text{м}, t_3 = 5 \text{ с};$ | 4. $M_4 = 50 \text{ Н} \cdot \text{м}, t_4 = 15 \text{ с};$ |

Напруга живлення двигуна 220 В, необхідна швидкість обертання $n = 740$ об/хв.

Розв'язання. Еквівалентний момент механізму (2.8)

$$M_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^n M_k^2 t_k \right) / \left(\sum_{k=1}^n t_k \right)} = \sqrt{\frac{500^2 \cdot 5 + 225^2 \cdot 20 + 150^2 \cdot 5 + 50^2 \cdot 15}{5 + 20 + 5 + 15}} =$$

$$= 231,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Еквівалента потужність

$$P_{\text{ЕКВ}} = 0,105 \cdot M_{\text{ЕКВ}} \cdot n = 0,105 \cdot 231,5 \cdot 740^{10^{-3}} = 17,9 \text{ кВт}.$$

Тривалість увімкнення

$$TB\% = \frac{t_p}{t_{\text{Ц}}} \cdot 100\% = \frac{5 + 20 + 5 + 15}{135} \cdot 100\% = 33\%.$$

Потужність двигуна тривалого режиму для найближчої стандартної тривалості увімкнення $TB_{\text{СТ}} = 25\%$:

$$P_{\text{ЕКВ1}} = P_{\text{ЕКВ}} \sqrt{0,25/1} = 17,9 \cdot 0,5 = 8,95 \text{ кВт}.$$

Перерахуємо потужність двигуна на фактичну тривалість $TB = 33\%$:

$$P_{\text{ЕКВ2}} = P_{\text{ЕКВ1}} \sqrt{TB/TB_{\text{СТ}}} = 8,95 \sqrt{0,33/0,25} = 10,28 \text{ кВт}.$$

За каталогом вибираємо двигун П72 з такими паспортними даними:

$$P_{\text{НОМ}} = 11 \text{ кВт}, n_{\text{НОМ}} = 750 \text{ об/хв}, \eta = 81\%, \lambda = 3.$$

Для вибраного двигуна:

номінальний момент

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{9,55 \cdot P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{9,55 \cdot 11 \cdot 10^{-3}}{750} = 140 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

максимальний момент

$$M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_{\text{НОМ}} = 3 \cdot 140 = 420 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

максимально допустимий момент

$$M_{\text{maxдоп}} = M_{\text{max}} = 0,81 \cdot 135 = 420 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

За даними умови найбільший навантажувальний момент $M_{\text{НБ}} = 500$, тому двигун П72 не підходить. Вибираємо наступний за потужністю двигун П81 і проводимо перевірку на перевантажувальну здатність.

Паспортні дані двигуна П81 такі: $P_{\text{НОМ}} = 14$ кВт, $n_{\text{НОМ}} = 750$ об/хв, $\eta = 80,5\%$, $\lambda = 3$.

$$M_{\text{maxдоп}} = M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_{\text{НОМ}} = \lambda \cdot \frac{9,55 \cdot 14 \cdot 10^3}{750} = 534,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Оскільки $M_{\text{maxдоп}} > M_{\text{НБ}}$, то цей двигун підходить.

Задача 2.10. Асинхронний двигун типу МТКФ 411-8 працює у повторно-короткочасному режимі за графіком навантаження з еквівалентною потужністю $P_{\text{ЕКВ}} = 14,5$ кВт і стандартною тривалістю ввімкнення $TB_{\text{СТ}} = 40\%$. Чи можна використати цей двигун для роботи з іншими графіками навантаження з тією ж величиною $P_{\text{ЕКВ}}$, але при тривалості ввімкнення $TB = 35\%$ і $TB = 60\%$?

Розв'язання. Скориставшись (2.13), визначаємо, якою має бути потужність двигуна, щоб він працював без перегрівання:

при $TB = 35\%$

$$P_1 = P_{\text{ЕКВ}} \sqrt{\frac{TB_1}{TB_{\text{СТ}}}} = 14,5 \sqrt{\frac{0,35}{0,4}} = 13,55 \text{ кВт};$$

при $TB = 60\%$

$$P_2 = P_{\text{ЕКВ}} \sqrt{\frac{TB_2}{TB_{\text{СТ}}}} = 14,5 \sqrt{\frac{0,6}{0,4}} = 17,7 \text{ кВт}.$$

Порівняємо розраховані величини P_1 , P_2 з номінальною потужністю двигуна, вказаного в умові задачі. За даними каталогу для цього двигуна $P_{\text{НОМ}} = 15$ кВт при $TB = 40\%$. З порівняння випливає, що у першому

випадку він буде працювати без перегрівання, у другому – з перегріванням.

Обчислимо еквівалентну потужність, за якої даний двигун може працювати не перегріваючись при $TB = 60\%$:

$$P_{\text{ЕКВ}} = P_{\text{НОМ}} / \sqrt{\frac{0,60}{0,40}} = 15/1,225 = 12,2 \text{ кВт.}$$

Задача 2.11. Вибрати двигун з найбільш вигідним передаточним числом для нерегульованого підйомного механізму, якщо вага вантажу $G = 7500 \text{ Н}$, висота підйому 15 м , швидкість підйому $V = 0,3 \text{ м/с}$, час кріплення вантажу $t_0 = 60 \text{ с}$, ККД підйомного механізму $\eta = 0,6$, діаметр барабана лебідки $d = 0,4 \text{ м}$.

Розв'язання. Потужність підйомного механізму (2.23)

$$P_{\text{МЕХ}} = \frac{GV}{\eta} = \frac{7500 \cdot 0,3}{0,6} = 3,75 \text{ кВт.}$$

Швидкість обертання барабана лебідки

$$n_{\text{Б}} = \frac{60V}{\pi d} = \frac{60 \cdot 3}{3,14 \cdot 0,4} = 14,33 \text{ об/хв.}$$

З каталогу асинхронних двигунів серії АО2 для двигунів потужністю 3-4 кВт виписуємо такі технічні дані: номінальну потужність $P_{\text{НОМ}}$, номінальну швидкість обертання $n_{\text{НОМ}}$ і момент інерції J . Для кожного з виписаних двигунів обчислюємо:

передаточне число $i = n_{\text{ДВ}} / n_{\text{Б}}$ та його квадрат i^2 ;

маховий момент $mD^2 = 4J$;

добуток $mD^2 i^2$.

Дані з каталогу і результати обчислень записуємо у зведену таблицю 2.2.

Таблиця 2.2

Дані з каталогу			Результати обчислень			
$P_{\text{НОМ}}$, кВт	$n_{\text{НОМ}}$, об/хв	J , кг·м ²	i	i^2	mD^2	mD^2i^2
3,0-4,0	2880	0,01	200	4000	0,04	1600
3,0-4,0	1440	0,02	100	10000	0,08	800
3,0-4,0	960	0,04	67	4490	0,16	718
3,0-4,0	725	0,072	50	2500	0,288	720

З таблиці 2.2 видно, що найбільш вигідне передаточне число дорівнює $i = 67$ у двигуна зі швидкістю обертання 960 об/хв.

Розраховуємо час t_p підйому вантажу і тривалість увімкнення двигуна ТВ%:

$$t_p = \frac{h}{V} = \frac{15}{0,3} = 50 \text{ с}; \quad TB\% = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% = \frac{50}{50 + 60} \cdot 100\% = 45\% .$$

Двигуни серії АО2 призначені для тривалого режиму роботи, тому визначаємо, якою має бути потужність двигуна у повторно-короткочасному режимі для найближчої стандартної $TB_{\text{СТ}} = 40\%$:

$$P_p = P_{\text{max}} \sqrt{0,4/1} = 3,75 \cdot \sqrt{0,4} = 2,37 \text{ кВт.}$$

Перераховуємо потужність двигуна на фактичну $TB\% = 45\%$ (2.13):

$$P = P_p \sqrt{\frac{TB}{TB_{\text{СТ}}}} = 2,37 \sqrt{\frac{0,45}{0,4}} \approx 2,5 \text{ кВт.}$$

Найближчим за шкалою потужностей є двигун марки АО2-41-6 потужністю $P_{\text{НОМ}} = 3$ кВт, у якого швидкість обертання $n_{\text{НОМ}} = 960$ об/хв, ККД $\eta = 81,5\%$, коефіцієнт перевантаження $\lambda = 1,8$.

Перевіряємо вибраний двигун на перевантажувальну здатність:
номінальний момент

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{9,55P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{9,55 \cdot 3 \cdot 10^3}{960} = 29,8 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

максимальний момент $M_{\text{max}} = \lambda M_{\text{НОМ}} = 1,8 \cdot 29,8 = 53,64 \text{ Н} \cdot \text{м};$

максимально допустимий момент з урахування зниження напруги на 10%

$$M_{\text{maxдоп}} = 0,81 \cdot 53,64 = 43,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Найбільший момент навантаження

$$M_{\text{НБ}} = \frac{9,55P_{\text{МЕХ}}}{n} = \frac{9,55 \cdot 3,75 \cdot 10^3}{960} = 37,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Оскільки $M_{\text{maxдоп}} > M_{\text{НБ}}$ двигун задовольняє умові стійкої роботи .

2.5 Задачі для самостійного розв'язання

2.12. На рис. 2.17 подано механічні характеристики двигуна (1) і робочого механізму (2). Визначити частоту обертання двигуна в усталеному режимі і потужність на валу двигуна.

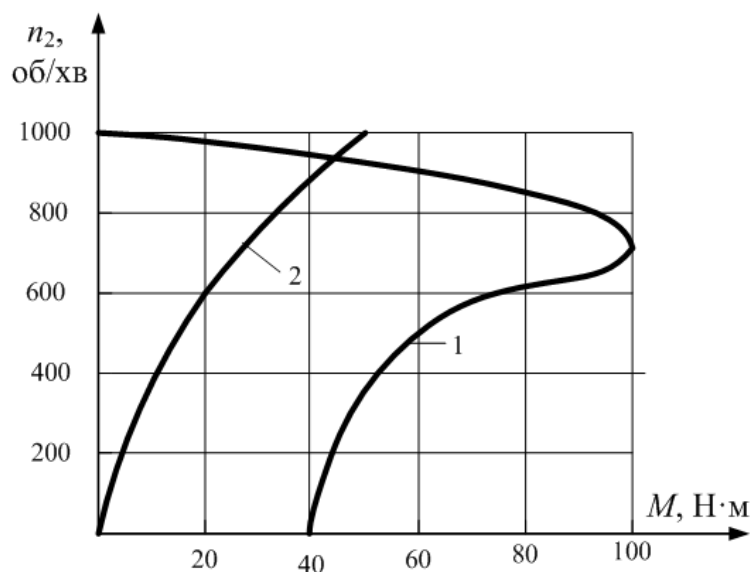


Рис. 2.17

2.13. Вибрати асинхронний двигун з короткозамкненим ротором захищеного виконання для привода відцентрового водяного насоса. Продуктивність насоса $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$, статичний напір 10 м, ККД насоса 70%, швидкість обертання 1470 об/хв.

2.14. Для верстата, що працює відповідно до навантажувальної діаграми на рис. 2.18, вибрати асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, швидкість обертання якого близька до 1500 об/хв.

2.15. Визначити розрахункову потужність та вибрати асинхронний двигун з короткозамкненим ротором для механізму з циклічним графіком навантаження (рис. 2.19). Швидкість обертання механізму 1420 об/хв.

2.16. Перевірити можливість використання двигуна, вибраного в задачі 4, для приводу механізму з графіком навантаження, який зображено на рис. 2.20. При розв'язанні рекомендується скористатися спрощеною формулою для еквівалентної потужності.

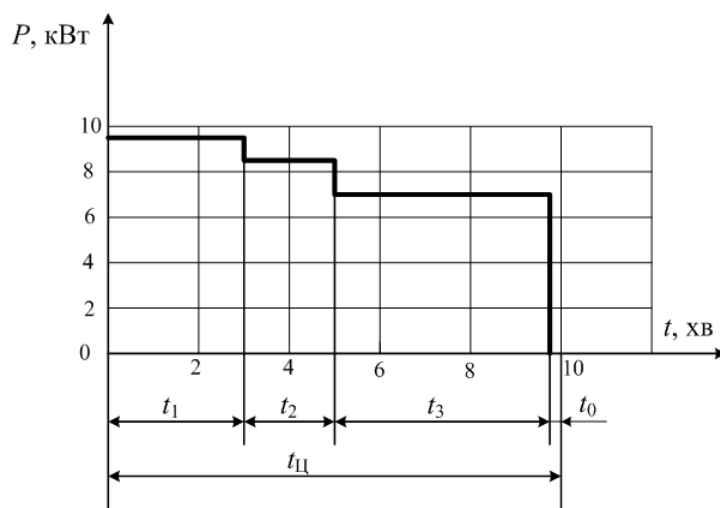


Рис. 2.18

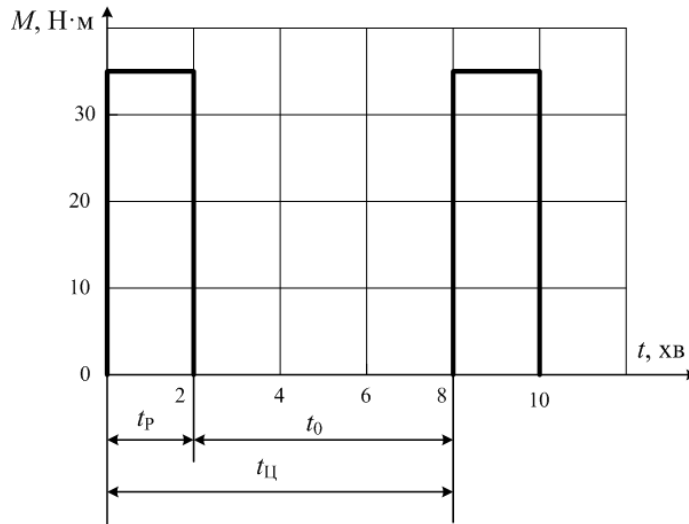


Рис. 2.19

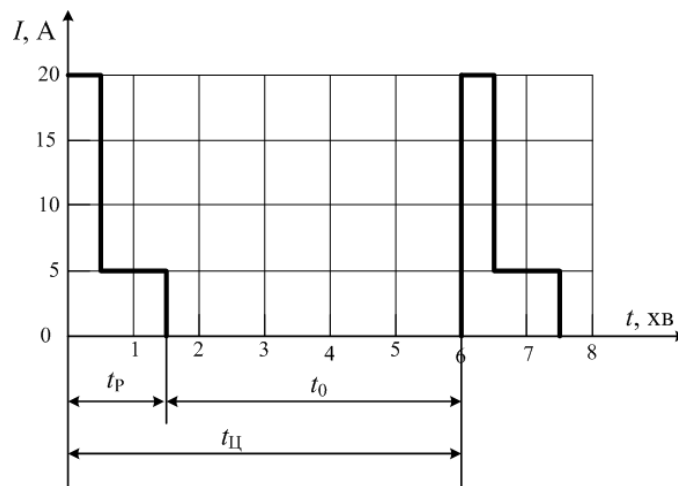


Рис. 2.20

2.17. З якою найбільшою еквівалентною потужністю має працювати асинхронний двигун 4АС1004УЗ у разі $TB = 35\%$, якщо при $TB_{\text{СТ}} = 40\%$ номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 3,2$ кВт?

2.18. Якою може бути найбільша тривалість увімкнення асинхронного двигуна 4АС160М4УЗ ($TB = 40\%$, $P_{\text{НОМ}} = 20$ кВт), якщо його еквівалентна потужність протягом одного циклу $P_{\text{ЕКВ}} = 17,5$ кВт?

2.19. Коефіцієнт механічного перевантаження асинхронного двигуна у короткочасному режимі при номінальній напрузі $K_{\text{МЕХ}} = 1,4$; коефіцієнт

зниження напруги $k_U = 0,9$. Визначити коефіцієнт теплового перевантаження в цьому режимі.

2.20. У короткочасному режимі тривалість роботи двигуна до припустимої температури $t_{кр} = 40$ хв; стала нагрівання $T_H = 50$ хв. Визначити коефіцієнт механічного перевантаження двигуна.

2.21. Момент опору на валу двигуна дорівнює $200 \text{ Н} \cdot \text{м}$; сумарний момент інерції на валу $0,48 \text{ кгм}^2$; середній момент який розвиває двигун при пуску $300 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Розрахувати час розгону двигуна до частоти 1000 об/хв .

2.6. Завдання на індивідуальну розрахункову роботу

У таблиці 2.3 наведено:

- моменти M_1, M_2, M_3 навантаження на валу двигуна;
- час роботи t_1, t_2, t_3 двигуна з заданими моментами;
- час паузи t_0 ;
- швидкість обертання двигуна n_2 ;
- коефіцієнт K_U , який враховує зниження напруги мережі.

Вибрати за каталогом асинхронний двигун для привода механізму, що працює

1. у тривалому режимі;
2. у повторно-короткочасному режимі.

Провести перевірку вибраного двигуна на перевантажувальну здатність.

Варіанти контрольних завдань

Таблиця 2.3

№ п/п	M_1 , Н·м	M_2 , Н·м	M_3 , Н·м	t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с	t_0 , с	n_2 , об/хв	K_U
1	80	40	60	10	5	20	25	410	0,95
2	120	100	95	10	10	15	55	930	0,90
3	50	20	30	10	15	10	5	915	0,85
4	150	125	145	10	20	10	60	930	0,95
5	150	130	160	10	25	20	35	1415	0,90
6	40	30	10	5	15	20	10	930	0,85

7	40	25	20	5	15	15	5	1420	0,95
8	30	15	25	5	20	10	25	950	0,90
9	20	15	10	5	10	5	60	935	0,85
10	180	140	150	5	15	15	25	1440	0,95
11	30	20	10	15	10	20	5	1440	0,90
12	30	40	60	15	5	15	5	1400	0,85
13	30	45	20	15	10	10	5	1410	0,95
14	30	50	30	15	15	10	10	940	0,90
15	180	180	170	15	20	5	60	930	0,85
16	230	230	215	10	15	10	25	940	0,95
17	20	15	25	10	10	15	5	930	0,90
18	20	45	40	10	5	10	75	950	0,85
19	25	20	15	10	15	15	60	950	0,95
20	20	25	15	10	10	5	20	1440	0,90
21	25	50	40	15	15	20	5	1440	0,85
22	25	20	10	15	15	5	25	950	0,95
23	20	35	10	15	15	10	30	920	0,90
24	25	40	10	15	15	15	5	930	0,85
25	25	15	10	15	10	20	5	950	0,95

Таблиця 2.4

Технічні дані асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором (закриті,
з повітряним охолодженням)

Тип двигуна	$P_{\text{НОМ}}$, кВт	$n_{2\text{НОМ}}$, об/хв	$\eta_{\text{НОМ}}$, %	$\cos\phi_{\text{НОМ}}$	M_{max}^*	$M_{\text{П}}^*$	$I_{\text{П}}^*$
Синхронна частота обертання 1500 об/хв							
4А80А4У3	1,1	1420	75,0	0,81	2,2	2,0	5,0
4А80В4У3	1,5	1415	77,0	0,83	2,2	2,0	5,0
4А90L4У3	2,2	1425	80,0	0,83	2,4	2,1	6,0
4А100S4У3	3,0	1435	82,0	0,83	2,4	2,0	6,0
4А100L4У3	4,0	1430	84,0	0,84	2,4	2,6	6,0

4A112M4Y3	5,5	1445	85,5	0,85	2,2	2,0	7,0
4A132S4Y3	7,5	1455	87,5	0,86	3,0	2,2	7,5
4A132M4Y3	11,0	1460	87,5	0,87	3,0	2,2	7,5
4A160S4Y3	15,0	1465	88,5	0,88	2,3	1,4	7,0
4A160M4Y3	18,5	1465	89,5	0,88	2,3	1,4	7,0
4A180S4Y3	22,0	1470	90,0	0,90	2,3	1,4	6,5
4A180M4Y3	30,0	1470	91,0	0,90	2,3	1,4	6,5
4A200M4Y3	37,0	1475	91,0	0,90	2,5	1,4	7,0
4A200L4Y3	45,0	1475	92,0	0,90	2,5	1,4	7,0
4A225M4Y3	55,0	1480	92,5	0,90	2,5	1,3	7,0
4A250S4Y3	75,0	1480	93,0	0,90	2,3	1,2	7,0
4A250M4Y3	90,0	1480	93,0	0,91	2,3	1,2	7,0
Синхронна частота обертання 1000 об/хв							
4A80B6Y3	1,1	920	74,0	0,74	2,2	2,0	4,0
4A90L6Y3	1,5	935	75,0	0,74	2,2	2,0	4,5
4A100L6Y3	2,2	950	81,0	0,73	2,2	2,0	5,0
4A112MA6Y3	3,0	955	81,0	0,76	2,5	2,0	6,0
4A112MB6Y3	4,0	950	82,0	0,81	2,5	2,0	6,0
4A132S6Y3	5,5	965	85,0	0,80	2,5	2,0	6,5
4A132M6Y3	7,5	970	85,5	0,81	2,5	2,0	6,5
4A180S6Y3	11,0	975	86,0	0,86	2,0	1,2	6,0
4A160M6Y3	15,0	975	87,5	0,87	2,0	1,2	6,0
4A180M6Y3	18,5	975	88,0	0,87	2,0	1,2	5,0
4A200M6Y3	22,0	975	90,0	0,90	2,4	1,3	6,5
4A200L6Y3	30,0	980	90,5	0,90	2,4	1,3	6,5
4A225M6Y3	37,0	980	91,0	0,89	2,3	1,2	6,5

Закінчення таблиці 2.4

Тип двигуна	$P_{\text{НОМ}}$, кВт	$n_{2\text{НОМ}}$, об/хв	$\eta_{\text{НОМ}}$, %	$\cos\varphi_{\text{НОМ}}$	M_{max} *	$M_{\text{П}}$ *	$I_{\text{П}}$ *
4A250S6Y3	45,0	985	91,5	0,89	2,1	1,2	6,5
4A250M6Y3	55,0	985	91,5	0,89	2,1	1,2	6,5
4A280S6Y3	75,0	985	92,0	0,89	2,2	1,4	5,5
4A280M6Y3	90,0	985	92,5	0,89	2,2	1,4	5,5

Таблиця 2.5

Технічні данні асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором
з підвищеним ковзанням

Тип двигуна	$M_{П*}$	M_{max*}	$S_{НОМ}$ %	ПВ = 25%			ПВ = 40%			ПВ = 60%			ПВ = 100%		
				$P_{НОМ}$ кВт	η , %	$\cos\phi$	$P_{НОМ}$ кВт	η , %	$\cos\phi$	$P_{НОМ}$ кВт	η , %	$\cos\phi$	$P_{НОМ}$ кВт	η , %	$\cos\phi$
Синхронна частота обертання 1500 об/хв															
4AC71A4Y3	2,0	2,2	8,2	0,65	67,0	0,76	0,6	68,0	0,73	0,6	68,0	0,73	0,60	68,0	0,73
4AC71B4Y3	2,0	2,2	8,7	0,90	68,0	0,71	0,8	68,5	0,75	0,8	68,5	0,75	0,70	69,0	0,74
4AC80A4Y3	2,0	2,2	5,6	1,8	68,5	0,82	1,3	68,6	0,82	1,1	70,0	0,80	0,95	70,5	0,79
4AC80B4Y3	2,0	2,2	5,5	1,9	69,5	0,83	1,7	70,0	0,82	1,5	70,5	0,80	1,3	71,0	0,79
4AC90L4Y3	2,0	2,2	5,8	2,4	76,0	0,82	2,4	76,0	0,82	2,2	76,5	0,80	1,9	77,0	0,78
4AC100S4Y3	2,0	2,2	4,2	3,7	76,0	0,84	3,2	76,5	0,82	2,8	77,0	0,80	2,3	77,5	0,78
4AC100L4Y3	2,0	2,2	4,1	5,0	77,0	0,84	4,3	78,0	0,82	3,8	79,0	0,80	3,3	80,0	0,78
4AC112M4Y3	2,0	2,2	5,6	6,7	77,5	0,85	5,6	79,0	0,83	5,0	80,0	0,81	4,2	81,0	0,78
4AC132S4Y3	2,0	2,2	6,9	9,5	82,0	0,86	8,5	82,5	0,85	7,5	83,5	0,83	7,1	84,0	0,81
4AC132M4Y3	2,0	2,2	6,1	14,0	83,0	0,86	11,8	84,0	0,85	10,5	84,5	0,83	9,0	85,0	0,81
4AC160S4Y3	2,0	2,2	6,1	19,0	83,5	0,86	17,0	84,5	0,86	15,0	85,5	0,85	13,0	86,0	0,784
4AC160M4Y3	2,0	2,2	5,3	23,0	86,0	0,87	20,0	87,0	0,87	18,5	87,5	0,87	17,0	88,0	0,86

Продовження таблиці 2.5

Тип двигуна	$M_{п*}$	M_{max*}	$S_{НОМ}$ %	ПВ = 25%			ПВ = 40%			ПВ = 60%			ПВ = 100%		
				$P_{НОМ}$ кВт	η , %	$\cos\varphi$	$P_{НОМ}$ кВт	η , %	$\cos\varphi$	$P_{НОМ}$ кВт	η , %	$\cos\varphi$	$P_{НОМ}$ кВт	η , %	$\cos\varphi$
4AC180S4Y3	2,0	2,2	5,7	24,0	84,5	0,93	21,0	86,0	0,92	20,0	86,5	0,92	19,0	87,0	0,92
4AC180M4Y3	2,0	2,2	4,4	30,0	87,0	0,92	26,5	88,5	0,91	25,0	89,0	0,91	24,0	89,5	0,91
4AC200M4Y3	2,0	2,2	5,7	35,0	87,0	0,93	31,5	87,5	0,92	28,0	88,0	0,92	26,0	88,0	0,92
4AC200L4Y3	2,0	2,2	5,8	47,0	88,0	0,94	40,0	89,0	0,93	37,0	89,5	0,93	35,0	90,0	0,93
4AC225M4Y3	2,0	2,2	5,8	55,0	87,0	0,93	50,0	87,5	0,92	45,0	88,0	0,92	40,0	88,5	0,92
4AC250S4Y3	2,0	2,2	6,3	63,0	87,0	0,93	56,0	87,5	0,92	53,0	88,0	0,92	50,0	88,0	0,92
4AC250M4Y3	2,0	2,2	6,4	71,0	86,5	0,94	63,0	87,0	0,93	60,0	87,0	0,93	56,0	87,5	0,93
4AC71A6Y3	2,0	2,1	10,4	0,4	62,5	0,70	0,4	62,5	0,70	0,4	62,5	0,70	0,4	62,5	0,70
4AC71B6Y3	2,0	2,1	10,2	0,65	65,0	0,70	0,63	65,0	0,70	0,65	65,0	0,70	0,5	63,5	0,62
4AC980A6Y3	2,0	2,1	7,0	0,9	61,0	0,72	0,8	61,0	0,68	0,7	61,0	0,64	0,5	60,0	0,54
4AC80B6Y3	2,0	2,1	7,8	1,3	65,5	0,75	1,2	66,5	0,73	1,1	67,5	0,71	0,8	69,0	0,61
4AC90L6Y3	1,9	2,1	6,2	1,8	70,0	0,74	1,7	71,0	0,72	1,3	71,5	0,65	1,1	72,0	0,60
4AC100L6Y3	1,9	2,1	5,3	2,9	74,5	0,78	2,6	75,0	0,76	2,2	76,0	0,72	1,8	76,5	0,67
4AC112M6Y3	1,9	2,1	7,3	3,8	71,0	0,81	3,2	72,0	0,74	2,8	73,0	0,72	2,5	73,5	0,68
4AC112M6Y3	1,9	2,1	8,5	5,0	72,5	0,83	4,2	75,0	0,79	3,8	76,5	0,78	3,2	77,5	0,73

Закінчення таблиці 2.5

Тип двигуна	$M_{П*}$	M_{max*}	$S_{НОМ}$ %	ПВ = 25%			ПВ = 40%			ПВ = 60%			ПВ = 100%		
				$P_{НОМ}$ кВт	η , %	$\cos\varphi$	$P_{НОМ}$ кВт	η , %	$\cos\varphi$	$P_{НОМ}$ кВт	η , %	$\cos\varphi$	$P_{НОМ}$ кВт	η , %	$\cos\varphi$
4AC132S6Y3	1,9	2,1	6,4	7,5	77,5	0,84	6,3	79,0	0,80	6,0	80,0	0,79	4,5	81,0	0,72
4AC132M6Y3	1,9	2,1	5,8	10,0	77,5	0,84	8,5	80,0	0,80	7,5	80,5	0,78	6,3	81,0	0,74
4AC160S6Y3	1,9	2,1	7,7	14,0	80,0	0,86	12,0	82,5	0,85	11,0	83,5	0,84	10,0	84,0	0,83
4AC160M6Y3	1,9	2,1	7,8	19,0	81,5	0,86	16,0	84,0	0,85	15,0	84,5	0,84	13,0	85,5	0,83
4AC180M6Y3	1,9	2,1	7,6	20,0	83,0	0,90	19,0	84,5	0,90	17,0	85,0	0,89	16,0	85,5	0,89
4AC200M6Y3	1,9	2,1	7,3	25,0	82,0	0,92	22,0	83,5	0,92	20,0	84,5	0,92	18,0	85,5	0,91
4AC200L6Y3	1,9	2,1	6,2	33,5	83,5	0,92	28,0	85,5	0,91	25,0	86,0	0,92	23,0	86,5	0,91
4AC225M6Y3	1,9	2,1	6,9	35,0	85,5	0,92	33,5	81,0	0,91	28,0	87,5	0,91	25,0	88,0	0,90
4AC25086Y3	1,9	2,1	5,4	45,0	88,0	0,90	40,0	89,0	0,90	36,0	89,5	0,90	33,5	90,0	0,89
4AC250M6Y3	1,9	2,1	3,8	53,0	88,0	0,89	45,0	86,5	0,88	40,0	89,0	0,86	36,0	89,5	

Таблиця 2.6

Тип двигуна	Номинальна потужність $P_{\text{НОМ}}$, кВт	Максимальна частота обертання ослабленим полем, об/хв., при номінальній напрузі				Маховий момент, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$	Маса, кг
		110	220	340	440		
$n_{\text{НОМ}}=3000$ об/хв							
2ПБ100М	1,2	4000	4000	3600	—	0,011	36
2ПБ110М	1,4	4000	4000	4000	4000	0,014	47
2ПБ112L	2,0	4000	4000	5000	4000	0,017	56
2ПБ132М	4,5	4000	4000	4000	4000	0,0375	86
2ПБ160М	7,1	4000	4000	4000	4000	0,0835	147
2ПБ160L	8,1	—	4000	4000	4000	0,104	159
2ПО132М	5,5	4000	4000	4000	4000	0,0375	100
2ПО132L	6,7	4000	4000	4000	4000	0,0468	110
2ПО160М	9,5	4000	4000	4000	4000	0,0835	151
2ПН90М	1,0	4000	4000	3600	—	0,004	24
2ПН90L	1,3	4000	4000	3600	—	0,005	27
2ПН100L	2,2	4000	4000	3600	—	0,012	39
2ПН112М	3,6	4000	4000	4000	4000	0,014	47
2ПН112L	5,3	4000	4000	4000	4000	0,017	56
2ПФ132М	7,5	4000	4000	4000	4000	0,0375	98
$n_{\text{НОМ}}=1500$ об/хв							
2ПБ112L	1,0	4000	4000	3750	3750	0,068	56
2ПБ132М	2,4	4000	4000	3750	3750	0,15	86
2ПБ132L	3,2	4000	4000	3750	3750	0,187	96
2ПБ160М	4,2	4000	4000	3750	3750	0,334	141
2ПБ160L	5,3	4000	4000	3750	3750	0,416	159
2ПБ180М	7,1	3500	3500	3500	3500	0,8	213
2ПБ180L	8,5	3500	3500	3500	3500	0,916	234
2ПО160М	6,0	4000	4000	3750	3750	0,334	161
2ПО160L	7,1	4000	4000	3750	3750	0,416	169
2ПО180М	10,0	1500	3500	3500	3500	0,8	235
$n_{\text{НОМ}}=1000$ об/хв							
2ПН112L	1,25	4000	3500	2500	2500	0,068	56
2ПН132М	2,5	4000	3000	2500	2500	0,15	86
2ПН132L	3,0	4000	3000	2500	2500	0,187	96
2ПН160М	4,5	4000	3000	2500	2500	0,334	141

Закінчення таблиці 2.6

Тип двигуна	Номіна- льна потужніс- ть $P_{\text{НОМ}}$, кВт	Максимальна частота обертання ослабленим полем, об/хв., при номінальній напрузі				Маховий момент, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$	Маса, кг
		110	220	340	440		
$n_{\text{НОМ}}=1000$ об/хв							
2ПН160L	6,3	4000	3000	2500	2500	0,416	159
2ПН180M	8,0	3500	3000	2500	2500	0,8	213
2ПН180L	10,0	3500	3000	2500	2500	0,916	234
2ПБ132M	1,6	4000	3000	2500	2500	0,15	86
2ПБ132L	1,9	4000	3000	2500	2500	0,187	96
2ПБ160M	2,5	4000	3000	2500	2500	0,334	141
2ПБ160L	3,2	4000	3000	2500	2500	0,416	152
2ПБ180M	4,5	3500	3000	2500	2500	0,8	213
2ПБ180L	5,5	3500	3000	2500	2500	0,916	242
2ПО132L	2,2	4000	3000	2500	2500	0,187	110
2ПО160M	3,2	4000	3000	2500	2500	0,334	151
2ПО160L	4,0	4000	3000	2500	2500	0,418	169
2ПО180M	6,3	3500	3000	2500	2500	0,8	235
$n_{\text{НОМ}}=750$ об/хв							
2ПН132M	1,6	3000	2500	2000	1850	0,15	86
2ПН132L	1,9	3000	2500	2000	1850	0,187	96
2ПН160M	3,0	3000	2500	2000	1850	0,334	141
2ПН160L	4,0	3000	2500	2000	1850	0,416	159
2ПН180M	5,6	3000	2500	2000	1850	0,8	213
2ПО160L	3,2	3000	500	2000	1850	0,416	169
2ПО180M	4,5	3000	2500	2000	1850	0,800	235
2ПН180L	7,1	3000	2500	2000	1850	0,916	234
2ПН180M	5,6	3000	2500	2000	1850	0,8	213
2ПН200M	8,5	3000	2500	2000	1850	1,0	282

Література:

1. Брускин Д.Э. Электрические машины и микромашины: учебник / Д.Э.Брускин, А.Е.Зорохович, В.С.Хвостов. - М.: Высшая школа, 1991. – 475с.
2. Борисов Ю.М. Электротехника: учебник / Ю.М.Борисов, Д.Н.Липатов, Ю.Н.Зорин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 551с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины: учебник / А.И.Вольдек. – М.: Энергия, 1978. – 832с.
4. Герасимов В.Г. Электротехника: учебник / В.Г.Герасимов, Х.Э.Зайдель, И.В.Сильванский. – М.: Высшая школа, 1983. – 478с.
5. Иванов И.И. Электротехника: учебник / И.И.Иванов, В.С.Равдоник. – М.: Высшая школа, 1984. – 375с.
6. Касаткин А.С. Электротехника: учебник / А.С.Касаткин, М.В.Немцов. - М.: Высшая школа, 2003. – 542с.
7. Кацман М.М. Электрические машины: учебник / М.М.Кацман. – М.: Академия, 1996. – 376с.
8. Лябук М.Н. Електричні машини: навч. посіб. / М.Н.Лябук. – Луцьк.: ЛДТУ, 2005. – 445с.
9. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник / В.В.Москаленко. – М.: Высшая школа, 2001. – 596с.
10. Паначевний Б.Г. Загальна електротехніка: підручник / Б.Г.Паначевний, Ю.Ф.Свергун. – К.: Каравела, 2013. – 296с.
11. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода: ученик / М.Г.Чиликин, А.С.Сандлер. – М.: Энергоатомиздат, 1981.-473 с.

Зміст

Передмова	3
Вступ	6
Розділ 1. Основи електромеханіки	13
1.1. Трансформатор	13
1.1.1. Основні теоретичні положення	13
1.1.2. Основні розрахункові співвідношення	22
1.1.3 Типові розв'язані задачі	31
1.1.4. Задачі для самостійного розв'язання	57
1.1.5. Завдання на індивідуальну розрахунково-графічну роботу	63
1.2. Асинхронні двигуни	66
1.2.1. Основні теоретичні положення	66
1.2.2. Основні розрахункові співвідношення	78
1.2.3 Типові розв'язані задачі	84
1.2.4. Задачі для самостійного розв'язання	108
1.2.5. Завдання на індивідуальну розрахунково-графічну роботу	114
1.3. Синхронні машини	118
1.3.1 Основні теоретичні положення	118
1.3.2. Основні розрахункові формули і рівняння	130
1.3.3. Типові розв'язані задачі	133
1.3.4. Задачі для самостійного розв'язання	155
1.3.5. Завдання на індивідуальну розрахунково-графічну роботу	158
1.4. Машини постійного струму	160
1.4.1. Основні теоретичні положення	160

1.4.2. Основні розрахункові співвідношення	173
1.4.3. Типові розв'язані задачі	178
1.4.4. Задачі для самостійного розв'язання	204
1.4.5. Завдання на індивідуальну розрахунково-графічну роботу	210
Розділ 2. Основи електроприводу	214
2.1. Основні теоретичні положення механіки електроприводу	214
2.1.1. Рівняння руху електроприводу	214
2.1.2. Статична стійкість електроприводу	215
2.1.3. Приведення моментів статичного навантаження і моментів інерції до валу двигуна	220
2.1.4. Поняття про динамічні режими	223
2.2. Вибір типу та потужності двигуна	227
2.2.1. Загальні положення вибору типу електродвигуна	227
2.2.2. Основні режими роботи двигунів	231
2.2.3. Визначення потужності двигуна. Вибір двигуна за каталогом	240
2.2.4. Особливості розрахунку потужності двигуна в залежності від теплового режиму роботи	250
2.3. Основні розрахункові співвідношення	256
2.4. Типові розв'язані задачі	261
2.5. Задачі для самостійного розв'язання	275
2.6. Завдання на індивідуальну розрахункову роботу	279
Література	288