

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ
УНІВЕРСИТЕТ

А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун



ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять для студентів денної форми навчання, що навчаються
за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Затверджено методичною
радою університету,
протокол № ___ від _____.

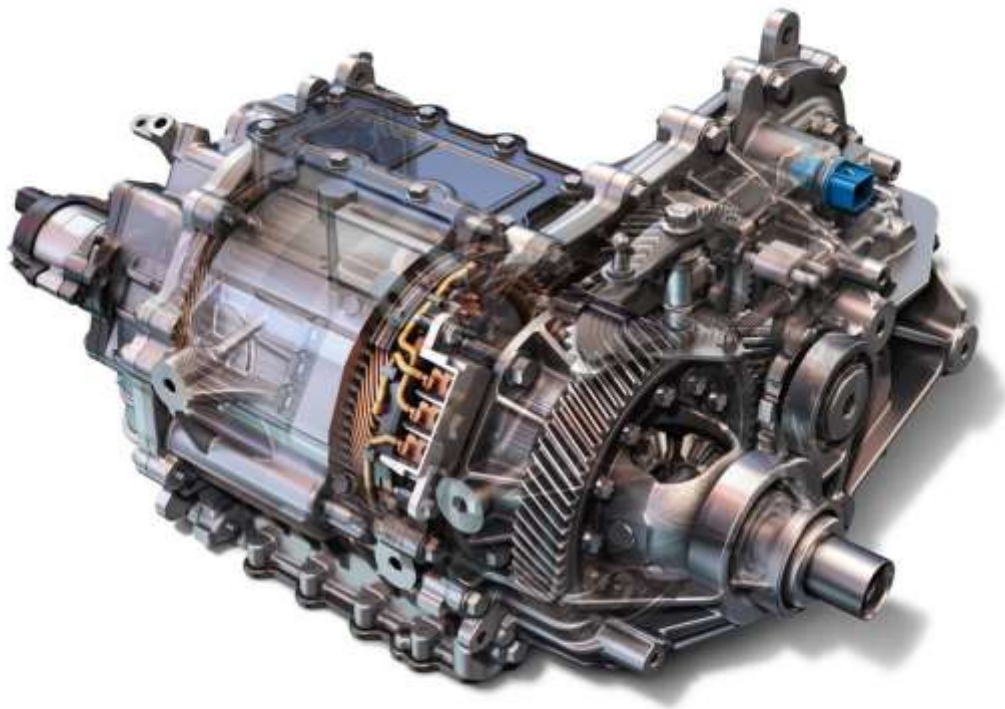
Харків 2020

Теорія електроприводу

Методичні вказівки до практичних занять для студентів денної форми навчання що навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун. – Х.: ХНАДУ, 2020. – 75 с.

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Теорія електроприводу» містять: завдання до практичних занять, задачі до тестових завдань та теоретичний матеріал, необхідний для осмисленого його виконання студентами при вивченні даної дисципліни. Завдання виконуються студентами у відповідності до заданого варіанту.

Ілюстрацій – 13, бібліографія – 35 найменувань



ВСТУП

Електропривод застосовується майже у всіх галузях народного господарства, де електрична енергія перетворюється на механічну для приведення в дію робочих машин і механізмів.

Теорія електроприводу (ТЕП) є теоретичною основою спеціальності «Електричні системи і комплекси транспортних засобів». Вона дає змогу описувати, пояснювати і передбачати явища, що відбуваються в електричному приводі транспортних засобів та відповідних електромеханічних системах.

Основні загальні завдання сучасної ТЕП полягають у з'ясуванні закономірностей, визначення характеристик і робочих режимів електропривода, обґрунтуванні раціонального вибору його елементів, у проектуванні та дослідженні автоматичних (працюють без участі обслуговуючого персоналу) або автоматизованих (працюють з незначною участю обслуговуючого персоналу) електромеханічних систем автоматичного керування. ТЕП широко використовує положення теорії електричних машин, теоретичної механіки і теорії автоматичного керування.

Актуальність видання методичних вказівок обумовлена необхідністю доповнення існуючої навчальної літератури по розрахунку електротехнічних показників електроприводу, а також відсутністю підручників з цієї спеціальності на українській мові.

Ці методичні вказівки є складовою частиною навчальних посібників та підручників, що видаються на кафедрі автомобільної електроніки, і присвячених вивченню дисципліни «Теорія електропривода».

Зміст методичних вказівок відповідає робочій навчальній програмі з дисципліни «Теорія електропривода».

Наявність в методичних вказівках питань для тестових завдань дозволяють перевірити свої знання та усунути пробіли в них.

Загальне редагування виконане доктором технічних наук, професором О.В. Бажиновим.

Автори сподіваються, що запропоновані методичні вказівки допоможуть Вам при вивченні електротехнічних дисциплін та бажають успіху.

1 ТЕОРЕТИЧНИЙ МАТЕРІАЛ

1.1 Приведення моментів і сил опору, інерційних мас і моментів інерції

Звичайно двигун приводить в дію виробничий механізм через систему передач, окремі елементи якої рухаються з різними швидкостями. Зразкова кінематична схема електроприводу з обертальним рухом виконавчого механізму представлена на рис. 1.

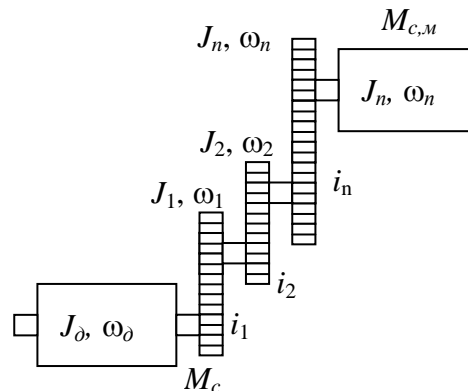


Рисунок 1 – Кінематична схема зв'язку двигуна з виконавчим механізмом

Часто в робочих механізмах один з елементів виконує обертальний рух, інші – поступальне, наприклад в таких машинах, як підйомний (рис. 2), кран, верстат і т.п. Механічна частина електроприводу може бути складним кінематичним ланцюгом з великим числом елементів, що рухаються. Кожний з елементів реального кінематичного ланцюга має пружність, тобто деформується під навантаженням, а в з'єднаннях елементів є повітряні зазори. Якщо враховувати ці чинники, то розрахункова схема механічної частини приводу буде представлена багатомасовою механічною системою з пружними зв'язками і зазорами, розрахунок динаміки якої складає великі труднощі і можливий тільки за допомогою ЕОМ. Проте основні закономірності, рухи таких систем визначаються найбільшими масами і зазорами і якнайменшими жорсткостями зв'язків системи, що дозволяє звести розрахункову схему механічної частини приводу або до трьохмасової, або до двохмасової механічної системи з еквівалентними пружними зв'язками і з сумарним зазором (або без нього), приведеним до кутової швидкості валу двигуна. Але ці розрахункові схеми не використовуються в тих відповідальних випадках, де нехтування пружністю і зазором приведе до великих помилок розрахунку (точні системи стеження радіотелескопів і металоріжучих верстатів; механізми з гнучкими зв'язками, довгими валами, канатами; різкі зміни стану системи і т. п.). Методика розрахунку електроприводів, механічна частина яких містить пружні зв'язки і зазори, розглянута в [1].

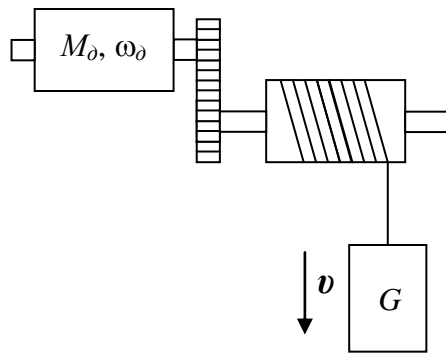


Рисунок 2 – Кінематична схема приводу підйомника

В більшості практичних випадків в інженерних розрахунках при рішенні задач, що не вимагають великої точності, і для механічних ланок, що мають невеликі зазори і незначну пружність (велику жорсткість), можна нехтувати зазорами і пружністю, прийнявши механічні зв'язки абсолютно жорсткими. При цьому допущенні рух одного елемента дає повну інформацію про рух всієї решти елементів, тому рух електроприводу можна розглядати на якому-небудь одному механічному елементі. Звичайно в якості такого елемента приймають вал двигуна.

1.2 Моменти опору, їх види

Розрахункову схему механічної частини приводу, можна звести до однієї узагальненої жорсткої механічної ланки, що має еквівалентну масу з моментом інерції J , на яку впливає електромагнітний момент двигуна M і сумарний приведений до валу двигуна момент опору (статичний момент) M_c , що включає всі механічні втрати в системі, у тому числі механічні втрати в двигуні. Момент опору механізму $M_{c,m}$ (рис. 1), що виникає на валу робочої машини, складається з двох складових, відповідних корисній роботі і роботі тертя.

Корисна робота, яка виконується виробничим механізмом, пов'язана з виконанням відповідної технологічної операцій. Графік корисної роботи може бути побудований на підставі аналітичних розрахунків або за експериментальними даними. Такий графік, наприклад, для верстата, що працює по циклічному закону, представлений на рис. 3. Заштрихована область графіка відповідає корисній роботі, не заштрихована частина графіка відповідає роботі тертя. При здійсненні корисної роботи відбувається деформація матеріалу або змінюється запас потенційної енергії тіл, наприклад в підйомних пристроях. В деяких машинах здійснення корисної роботи пов'язано з незначним перевищенням моменту в порівнянні з моментом тертя (наприклад, друкарська машина, розмельний кульовий млин, кран, що пересувається по горизонтальним направляючим, і т. п.).

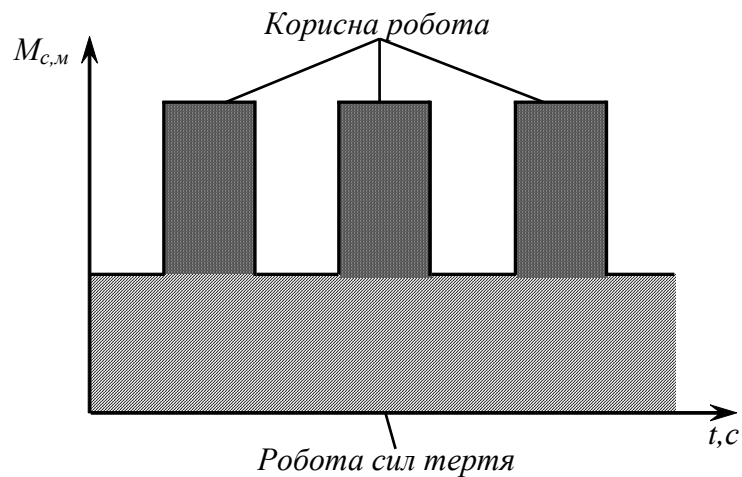


Рисунок 3 – Циклічний графік роботи електроприводу виробничого механізму

Робота сил тертя, яка виконується у виробничому механізмі, враховує звичайно ККД механічних зв'язків приводу. Роботу тертя можна іноді врахувати, користуючись даними, отриманими на підставі досліду. Наприклад, при підйомі вантажу G_1 на висоту h можна вважати, що сили тертя як би збільшують вагу вантажу на деяке додаткове значення G_0 . Тоді робота підйому записується таким чином, Дж:

$$A = h(G_1 + G_0). \quad (1)$$

В насосах втрати можуть враховуватися деякою фіктивною додатковою висотою подачі h_0 . Момент тертя завжди направлений проти рушійного моменту приводу.

Моменти опору можна розділити на дві категорії, а саме:

- 1) реактивні моменти;
- 2) активні або потенційні моменти.

В першу категорію включаються моменти опору від стиснення, різання, моменти тертя і т. п., перешкоджаючі руху приводу і які змінюють свій знак при зміні напрямку обертання. В другу категорію входять моменти від сили тяжіння, а також від розтягування, стиснення і скручування пружних тіл. Ці моменти можуть бути названі потенційними, оскільки вони пов'язані із зміною потенційної енергії окремих елементів приводу. Потенційні моменти можуть гальмувати рух приводу або, навпаки, сприяти його руху. Слід зазначити, що на відміну від реактивного статичного моменту активний момент зберігає свій знак при зміні напрямку обертання приводу. Наприклад, момент, створюваний вантажем підйомного механізму, зберігає свій знак, як при підйомі його, так і при опусканні. Отже, в даному випадку активний статичний момент при підйомі перешкоджає руху, а при опусканні сприяє йому.

Приведення моментів опору від однієї осі обертання до іншої може бути проведено на підставі енергетичного балансу системи. При цьому втрати потужності в проміжних передачах враховуються введенням в розрахунки відповідного ККД – η_n . Позначимо через ω_δ кутову швидкість валу двигуна, а ω_m – кутову швидкість валу виробничого механізму. На підставі рівності потужностей отримаємо:

$$M_{c,m} \omega_m \frac{1}{\eta_n} = M_c \omega_\delta, \quad (2)$$

звідки

$$M_c = M_{c,m} \frac{\omega_m}{\omega_\delta} \frac{1}{\eta_n} = \frac{M_{c,m}}{i \eta_n}, \quad (3)$$

де $M_{c,m}$ – момент опору виробничого механізму, Н·м;

M_c – той же момент опору, приведений до швидкості валу двигуна, Н·м;

$i = \frac{\omega_\delta}{\omega_m}$ – передавальне число.

За наявності декількох передач між двигуном і механізмом (рис. 1) з передавальними числами $i_1, i_2 \dots, i_n$ і відповідними ККД $\eta_{n1}, \eta_{n2} \dots \eta_{nn}$ момент опору, приведений до швидкості валу двигуна, визначається формулою:

$$M_c = M_{c,m} \frac{1}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_n} \frac{1}{\eta_{n1} \eta_{n2} \dots \eta_{nn}}. \quad (4)$$

Приведення сил опору проводиться аналогічно приведенню моментів. Якщо швидкість поступального руху v , м/с, а кутова швидкість валу двигуна ω_δ , рад/с, тоді:

$$F_{c,m} v \frac{1}{\eta_n} = M_c \omega_\delta, \quad (5)$$

де $F_{c,m}$ – сила опору виробничого механізму, Н.

Звідси приведений до швидкості валу двигуна момент опору визначається:

$$M_c = \frac{F_{c,m} v}{\omega_\delta \eta_n}. \quad (6)$$

У разі приведення обертального руху до поступального приведенне зусилля визначається:

$$F_{c,m} = \frac{M_c \omega_\partial \eta_n}{v}, \quad (7)$$

Приведення моментів інерції до однієї осі обертання засновано на тому, що сумарний запас кінетичної енергії частин приводу, що рухаються, віднесений до однієї осі, залишається незмінним. За наявності обертання частин, що мають моменти інерції $J_\partial, J_1, J_2, \dots, J_n$ і кутові швидкості $\omega_\partial, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ (рис. 1), можна замінити їх динамічну дію дією одного моменту інерції, приведенного наприклад, до швидкості валу двигуна. У такому разі можна написати:

$$J \frac{\omega_\partial^2}{2} = J_\partial \frac{\omega_\partial^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + \dots + J_n \frac{\omega_n^2}{2}. \quad (8)$$

Звідки результуючий або сумарний момент інерції, приведений до валу двигуна:

$$J = J_\partial + J_1 \left(\frac{\omega_1}{\omega_\partial} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_\partial} \right)^2 + \dots + J_n \left(\frac{\omega_n}{\omega_\partial} \right)^2, \quad (9)$$

де J_∂ – момент інерції ротора двигуна і інших елементів (муфти, шестерні і т.п.), встановлених на валу двигуна. Іноді в каталогах для двигунів указується значення махового моменту GD^2 , Н·м². В цьому випадку моменти інерції ротора двигуна, кг·м², в системі СІ обчислюються по формулі:

$$J_p = \frac{GD^2}{4g}, \quad (10)$$

$$GD^2 = J_p \cdot 4g,$$

де D – діаметр інерції, м; G – сила тяжіння (вага), Н. Це співвідношення витікає з формули, що визначає момент інерції тіла масою m , кг:

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{4g}, \quad (11)$$

де ρ – радіус інерції, м.

Якщо сила тяжіння виражена в ньютоні, тоді маса тіла визначається:

$$G = mg, \quad (12)$$

де $g = 9,81$ м/с² – прискорення вільного падіння.

Момент інерції суцільного циліндра відносно подовжньої осі обчислюється за формулою:

$$J = \frac{mR^2}{2}, \quad (13)$$

де R – радіус циліндра, м.
Для полого циліндра:

$$GD^2 = 2\pi m_* l (r_2^4 - r_1^4);$$

$$J = \frac{GD^2}{4g} = \frac{2\pi l m_*}{4g} (r_2^4 - r_1^4) = \frac{\pi l m_*}{2g} (r_2^4 - r_1^4); \quad (14)$$

$$m = \frac{\pi l m_* (r_2^2 - r_1^2)}{g}.$$

де m_* – питома вага, кг/м³.

Якщо шестерня обертається навкруги осі, співпадаючої з початком кола, то маховий момент:

$$GD_{u1}^2 = GD_u^2 + 4a^2 G, \quad (15)$$

де a – радіус кола, м.

Приведення мас, що рухаються поступально, здійснюється також на підставі рівності запасу кінетичної енергії:

$$\frac{m v^2}{2} = J \frac{\omega_d^2}{2}. \quad (16)$$

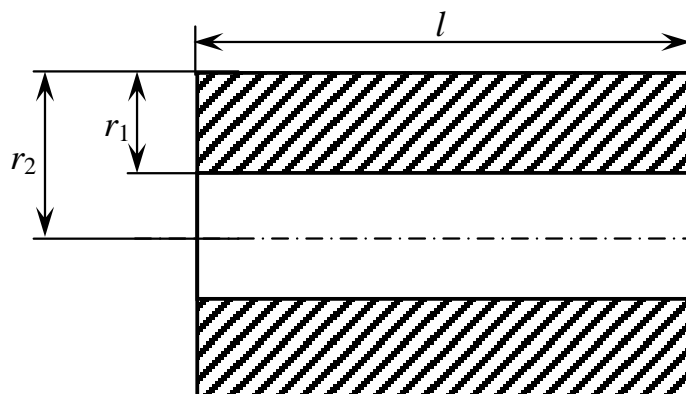


Рисунок. 4 – Полий циліндр

Звідси момент інерції, приведений до валу двигуна визначається:

$$J = m \left(\frac{v}{\omega_\delta} \right)^2. \quad (17)$$

Якщо механізм має елементи, що обертаються і поступально рухаються, то сумарний приведений до валу двигуна момент інерції визначається на підставі (9) і (14)

Якщо ККД не дано:

$$J = J_\delta + J_1 \frac{1}{i_1^2} + J_2 \frac{1}{i_1^2 i_2^2} + \dots + J_n \frac{1}{i_1^2 i_2^2 \dots i_n^2} + m \left(\frac{v}{\omega_\delta} \right)^2 \dots; \quad (18)$$

При розгоні:

$$J_{\text{роз.}} = J_0 + \frac{J_1}{i_1^2 \eta_1} + \frac{J_2}{i_1^2 \cdot i_2^2 \eta_1 \eta_2} + \dots + \frac{J_n}{i_1^2 i_2^2 \dots i_n^2 \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n} + \frac{mv^2}{\omega^2 \eta}; \quad (19)$$

При гальмуванні:

$$J_{\text{мор.}} = J_0 + \frac{J_1 \eta_1}{i_1^2} + \frac{J_2 \eta_1 \eta_2}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \dots + \frac{J_n \eta_n}{i_1^2 i_2^2 \dots i_n^2} + \frac{mv^2 \eta}{\omega^2}. \quad (20)$$

Для приведення моменту інерції до поступального руху потрібно момент інерції замінити приведеною масою, тобто:

$$m = J \left(\frac{\omega_\delta}{v} \right)^2. \quad (21)$$

Рівняння рівноваги моментів для обертаючого руху (рівняння руху приводу) має наступний вигляд:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (22)$$

У разі виконання операції приведення при підйомі вантажу (розрахувати приведений момент навантаження):

$$M_c = \frac{m \cdot g \cdot \rho}{\eta_p \cdot \eta_B}. \quad (23)$$

1.3 Механічні характеристики виробничих механізмів і електричних двигунів

При розгляді роботи електродвигуна, що приводить в дію виробничий механізм, необхідно перш за все виявити відповідність механічних характеристик двигуна характеристиці виробничого механізму. Тому для правильного проектування і економічної експлуатації електроприводу необхідно вивчити ці характеристики.

Залежність між приведеними до валу двигуна швидкістю і моментом опору механізму $\omega = f(M_c)$ називають *механічною характеристикою виробничого механізму*. Різні виробничі механізми мають різні механічні характеристики. Проте, можна отримати деякі узагальнюючі висновки, якщо скористатися наступною емпіричною формулою для механічної характеристики виробничого механізму:

$$M_c = M_0 + (M_{c.ном} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^x, \quad (24)$$

де M_c – момент опору виробничого механізму при швидкості ω ;

M_0 – момент опору тертя в частинах механізму, що рухаються;

$M_{c.ном}$ – момент опору при номінальній швидкості $\omega_{ном}$;

x – показник ступеня, що характеризує зміну моменту опору при зміні швидкості.

Приведена формула дозволяє класифікувати механічні характеристики виробничих механізмів орієнтовно на наступні основні категорії:

1. Не залежна від швидкості механічна характеристика (пряма 1 на рис. 5). При цьому $x = 0$ і момент опору M_c не залежить від швидкості.

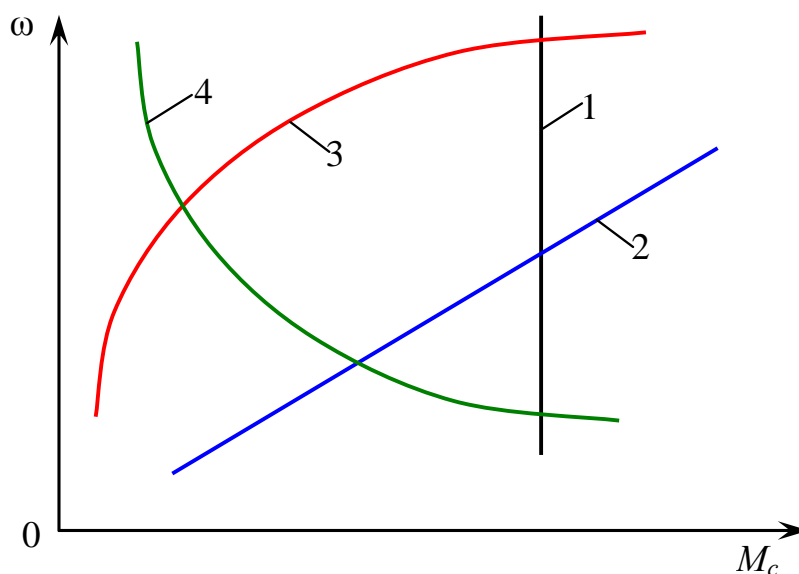


Рисунок 5 – Механічні характеристики виробничих механізмів

Таку характеристику мають, наприклад, підйомні крани, лебідки, механізми подачі металоріжучих верстатів, поршневі насоси при незмінній висоті подачі, конвеєри з постійною масою матеріалу, що пересувається. Сюди ж можуть бути віднесені з відомим наближенням всі механізми, у яких основним моментом опору є момент тертя, оскільки звичайно в межах робочих швидкостей момент тертя змінюється мало.

2. Лінійно-зростаюча механічна характеристика (пряма 2 на рис. 5).

В цьому випадку $x = 1$ і момент опору лінійно залежить від швидкості ω , збільшуючись з її зростанням (для спрощення прийнято $M_0 = 0$). Таку характеристику буде мати, наприклад, привод генератора постійного струму з незалежним збудженням, якщо останній працюватиме на постійний зовнішній резистор.

3. Нелінійно-зростаюча (параболічна) механічна характеристика (крива 3 на рис. 5). Цій характеристиці відповідає $x = 2$; момент опору M_c тут залежить від квадрата швидкості. Механізми, що мають таку характеристику, називають іноді механізмами з моментом вентилятора, оскільки у вентиляторів момент опору залежить від квадрата швидкості. До механізмів, що мають параболічну механічну характеристику, відносяться також відцентрові насоси, гребні гвинти і т.п.

4. Нелінійно-спадаюча механічна характеристика (крива 4 на рис. 5). При цьому $x = -1$ і момент опору M_c змінюється обернено пропорційно до швидкості, а потужність, споживана механізмом, залишається постійною. Таку характеристику мають, наприклад, деякі токарні, розточувальні, фрезерні та інші металоріжучі верстати, моталки в металургійній промисловості і т.п. Ці характеристики не вичерпують всіх практично можливих випадків, але дають уявлення про характеристики деяких типових виробничих механізмів.

Механічною характеристикою електродвигуна називається залежність його кутової швидкості від обертаючого моменту, тобто $\omega = f(M)$. Майже всі електродвигуни мають таку властивість, що їх швидкість є убуваючою функцією моменту двигуна. Це відноситься майже до всіх звичайних електродвигунів, вживаних в промисловості, тобто до двигунів постійного струму незалежного, послідовного і змішаного збудження, а також до асинхронних безколекторних і колекторних двигунів змінного струму. Проте ступінь зміни швидкості із зміною моменту у різних двигунів різний і характеризується так званою *жорсткістю* їх механічних характеристик.

Жорсткість механічної характеристики (β) електроприводу – це відношення різниці електромагнітних моментів, що розвиваються пристроєм з електродвигуном, до відповідної різниці кутових швидкостей електроприводу, тобто:

$$\beta = \frac{M_2 - M_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}. \quad (25)$$

Звичайно на робочих ділянках механічні характеристики двигунів мають негативну жорсткість $\beta < 0$. Лінійні механічні характеристики володіють постійною жорсткістю. У разі нелінійних характеристик їх жорсткість не постійна і визначається в кожній точці як похідна моменту по кутовій швидкості:

$$\beta = \frac{dM}{d\omega}. \quad (26)$$

Поняття жорсткості може бути застосовано і до механічних характеристик виробничих механізмів. Ці характеристики можна оцінювати жорсткістю:

$$\beta_c = \frac{dM_c}{d\omega}. \quad (27)$$

Механічні характеристики електродвигунів можна розділити на чотири основні категорії:

1. *Абсолютно жорстка механічна характеристика* ($\beta = \infty$) – це характеристика, при якій швидкість із зміною моменту залишається незмінною. Таку характеристику мають синхронні двигуни (пряма 1 на рис. 6).

2. *Жорстка механічна характеристика* – це характеристика, при якій швидкість із зміною моменту хоча і зменшується, але в малому ступені. Жорсткою механічною характеристикою володіють двигуни постійного струму незалежного збудження, а також асинхронні двигуни в межах робочої частини механічної характеристики (крива 2 на рис. 6). Для асинхронного двигуна жорсткість в різних точках механічної характеристики різна (рис. 7). Між максимальними (критичними) значеннями моментів в руховому $M_{кр.д}$ і генераторному $M_{кр.г}$ режимах характеристика асинхронного двигуна має порівняно велику жорсткість.

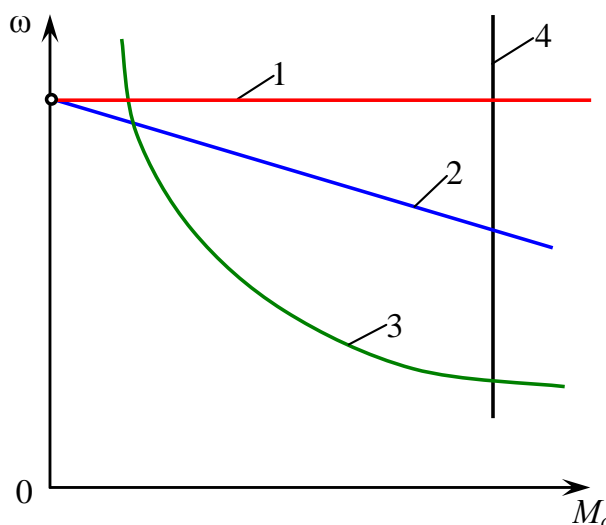


Рисунок 6 – Механічні характеристики електродвигунів

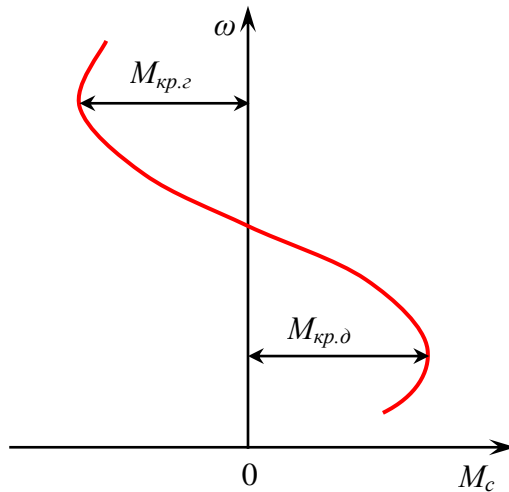


Рисунок 7 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

3. *М'яка механічна характеристика* – це характеристика, при якій із зміною моменту швидкість значно змінюється. Таку характеристику мають двигуни постійного струму послідовного збудження, особливо в зоні малих моментів (крива 3 на рис. 6). Для цих двигунів жорсткість не залишається постійною для всіх точок характеристик. Двигуни постійного струму змішаного збудження можуть бути віднесені до другої або третьої групи залежно від значення жорсткості механічної характеристики.

4. *Абсолютно м'яка механічна характеристика* ($P = 0$) – це характеристика, при якій момент двигуна із зміною кутової швидкості залишається незмінним. Таку характеристику мають, наприклад, двигуни постійного струму незалежного збудження при живленні їх від джерела струму або при роботі в замкнутих системах електроприводу в режимі стабілізації струму якоря (пряма 4 на рис. 6).

1.4 Сталі режими. поняття статичної стійкості електричного приводу

Роботі електричного двигуна і виробничого механізму в сталому режимі відповідає рівновага моменту опору механізму і обертаючого моменту двигуна при певній швидкості, тобто $M=M_c$.

Зміна моменту опору на валу двигуна призводить до того, що швидкість двигуна і момент, який він розвиває, можуть автоматично змінюватися і привід продовжуватиме стійко працювати при іншій швидкості з новим значенням моменту. Для відновлення рівноваги між моментом опору і моментом двигуна, що змінився, у всіх неелектричних двигунах потрібна участь спеціальних регуляторів, які впливають на джерело енергії, збільшуючи або відповідно зменшуючи подачу води, палива або пари. В електричних двигунах роль автоматичного регулятора може виконувати ЕРС двигуна. Ця особливість електродвигунів автоматично підтримувати рівновагу системи при моменті опору, що змінюється, є вельми цінною

властивістю, оскільки у багатьох випадках момент може змінюватися в тому або іншому ступені.

Висловлене ілюструється рис. 8, де приведена механічна характеристика двигуна постійного струму незалежного збудження і дві характеристики 1 і 2 виробничого механізму, наприклад конвеєра, що приводиться в рух цим двигуном.

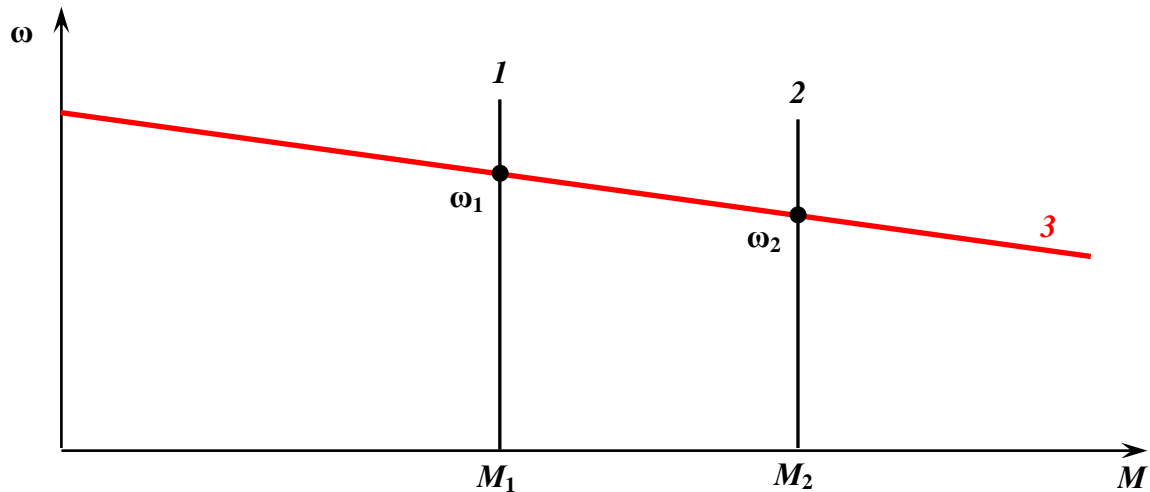


Рисунок 8 – Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження і виконавчого механізму

Характеристика 1 відповідає моменту опору M_1 при холостому ході конвеєра. Характеристика 2 виходить при великому моменті опору M_2 після того, як на конвеєр покладені деталі, які він транспортує. Спочатку при холостому ході конвеєра $M=M_1$ двигун працює з швидкістю ω_1 . Із збільшенням навантаження двигун гальмується, швидкість його знижується, завдяки чому зменшується ЕРС. При зменшенні ЕРС зростають струм в якірному колі двигуна і момент, що розвивається двигуном. Зростання моменту двигуна продовжується до тих пір, поки не наступить рівновага моментів $M = M_2$ (точка ω_2). Ця нова точка також є загальною для механічної характеристики конвеєра (2) і механічної характеристики електродвигуна (3). Розглянуті умови роботи електроприводу в сталому режимі характеризують статичну стійкість приводу, коли зміна в часі швидкості і моменту відбувається відносно поволі на відміну від динамічної стійкості, що має місце при перехідних режимах.

Під *статичною стійкістю* розуміється такий стан сталого режиму роботи приводу, коли при випадковому відхиленні швидкості від сталого значення привід повернеться в точку сталого режиму.

Механічні характеристики виробничого механізму для зручності зображуються в першому квадранті, хоча момент опору має негативний знак. При нестійкому русі будь-яке, навіть найменше, відхилення швидкості від сталого значення приводить до зміни стану приводу – він не повертається в точку сталого режиму.

Привід статично стійкий, якщо в точці сталого режиму виконується умова:

$$\frac{dM}{d\omega} - \frac{dM_c}{d\omega} < 0, \quad (28)$$

або

$$\beta - \beta_3 < 0. \quad (29)$$

Умова (28) означає, що привід статично стійкий, якщо при позитивному прирості кутової швидкості у момент двигуна виявиться менше статичного моменту (моменту опору) і привід внаслідок цього загальмується до колишнього значення швидкості. При негативному прирості кутової швидкості момент двигуна виявиться більше моменту опору і привід внаслідок цього розженеться до колишнього значення швидкості при постійному моменті навантаження (пряма 1 на рис. 8)

Статична стійкість визначатиметься тільки жорсткістю механічної характеристики двигуна, оскільки $\frac{dM_c}{d\omega} = 0$. Якщо вона негативна, то робота в сталому режимі стійка $\frac{dM}{d\omega} - \frac{dM_c}{d\omega} = \frac{dM}{d\omega} < 0$, як це мало місце в розглянутому випадку (рис. 8).

При роботі того ж двигуна на механізм з характеристикою (рис. 9) вентилятора легко довести, що у всіх точках робота буде стійкою.

На рис. 9 приведені механічна характеристика вентилятора 1, механічна характеристика двигуна 2, що приводить вентилятор, і сумісна механічна характеристика агрегату вентилятора 3.

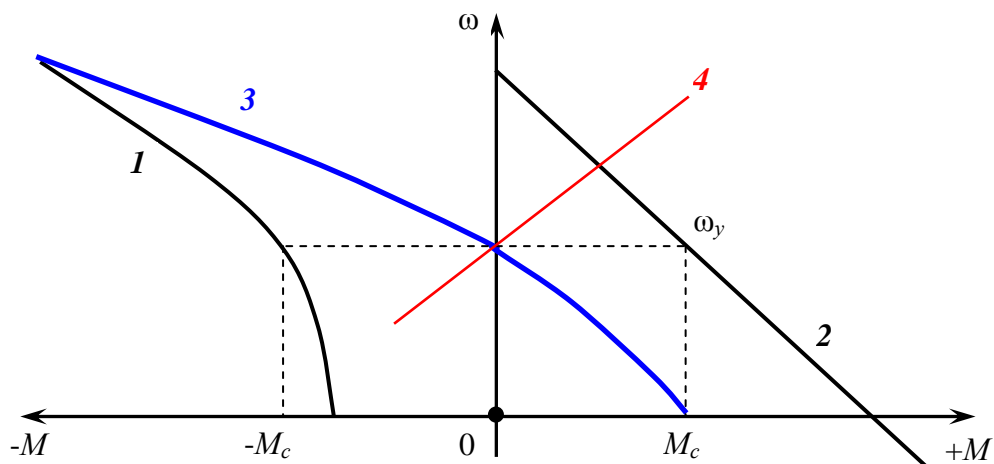


Рисунок 9 – Сумісна механічна характеристика вентиляторного агрегату

При сталій швидкості агрегату ω_{cm} двигун розвиває момент $M=M_c$; в цьому випадку момент сумісної механічної характеристики агрегату буде

рівний нулю. Робота електроприводу при швидкості $\omega_{ст}$ стійка, оскільки із збільшенням швидкості приріст моменту виявляється негативним, а при зменшенні швидкості – позитивним. Крива 3 на рис. 9 є прикладом сумісної характеристики, при якій агрегат працюватиме стійко. Якби сумісна характеристика агрегату мала вигляд 4, то робота була б нестійкою.

Розглянуті умови роботи ЕП в сталому режимі характеризують статистичну стійкість приводу, коли зміна в часі швидкості і моменту відбувається відносно поволі у відмінності від динамічної стійкості, що має місце при перехідних режимах.

Звичайно при проектуванні електроприводу механічна характеристика виробничого механізму є вже заданою. Тому для отримання стійкої роботи в сталому режимі для певних швидкостей і моментів опору виробничих механізмів необхідно підбирати механічну характеристику електродвигуна відповідної форми. Це може бути досягнуто підбором електродвигуна відповідного типу і зміною електричних параметрів його кіл. Іноді для отримання необхідних механічних характеристик доводиться застосовувати спеціальні схеми включення електричних машин і апаратів.

1.5 Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження

Звичайна схема включення двигуна постійного струму незалежного збудження представлена на рис. 10. Якір двигуна M і його обмотка збудження OZ одержують живлення від різних, незалежних один від одного джерел (перетворювачів) напруги U і U_3 , що дозволяє окремо регулювати напругу на якорі двигуна і на обмотці збудження і виконувати їх на різну номінальну напругу. Лише за наявності мережі постійного струму або при нерегульованому перетворювачі в якорному колі обмотка збудження живиться від того ж джерела напруги, що і якір двигуна. Але і в цьому випадку струм збудження I_3 не залежить від струму I якоря двигуна.

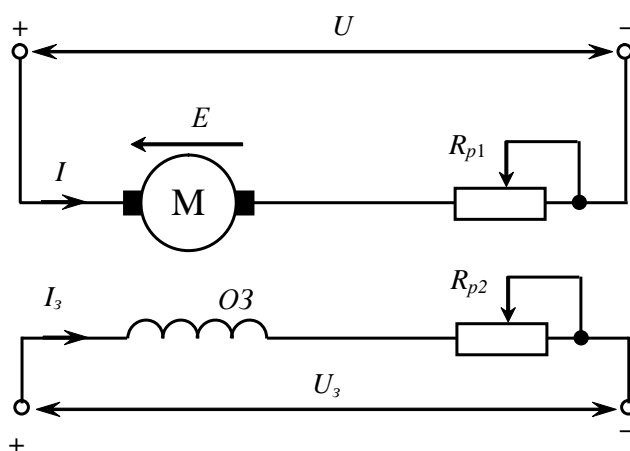


Рисунок 10 – Схема включення двигуна постійного струму незалежного збудження

Напрями струму I і ЕРС обертання двигуна E , показані на рис. 10, відповідають режиму роботи двигуна, коли електрична енергія споживається двигуном з мережі (від джерела напруги) перетворюється в механічну енергію, потужність якої рівна $P = M\omega$. Залежність же між M і ω двигуна визначається його механічною характеристикою.

Аналітичний вираз механічної характеристики двигуна може бути отриманий з рівняння рівноваги напруг, складеного для якірного кола схеми (рис. 10). При сталому режимі роботи двигуна прикладена напруга U , врівноважується падінням напруги в якірному колі IR і наведеної в якорі ЕРС обертання E , тобто:

$$U = IR + E, \quad (30)$$

де I – струм в якірному колі двигуна, А;

R – сумарний опір якірного кола, Ом, який включає зовнішній опір резистора R_p і внутрішній опір якоря двигуна R_a (за наявності додаткових полюсів враховується і їх опір);

$$E = k\Phi\omega, \quad (31)$$

де k – коефіцієнт, залежний від конструктивних даних двигуна, $k = pN / 2\pi a$ (p – число пар полюсів двигуна; N – число активних провідників обмотки якоря; a – число пар паралельних гілок обмотки якоря);

Φ і ω – відповідно магнітний потік, Вб, і кутова швидкість двигуна, рад/с.

Якщо в (30) підставимо значення E з (31), то отримаємо рівняння для швидкості двигуна:

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}. \quad (32)$$

Рівняння (32) є залежністю швидкості двигуна від струму якоря. Таку залежність $\omega = f(I)$ називають *електромеханічною характеристикою двигуна*. Для отримання рівняння механічної характеристики необхідно знайти залежність швидкості від моменту двигуна. Це легко зробити, якщо врахувати, що момент, Н·м, що розвивається двигуном, пов'язаний із струмом якоря і магнітним потоком простою залежністю. Приведеним рівнянням визначається електромагнітний момент двигуна. Момент на валу двигуна буде менше електромагнітного моменту на значення, відповідне втратам в сталі і механічним втратам. Проте для практичних розрахунків можна користуватися рівняннями механічних характеристик, де приводиться електромагнітний момент), а саме:

$$M = k\Phi I. \quad (33)$$

Підставивши в (32) значення струму I , знайдене з (33) отримаємо вираз для механічної характеристики:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - M \frac{R}{k^2\Phi^2}, \quad (34)$$

або

$$\omega = \frac{U}{c} - M \frac{R}{c^2}, \quad (35)$$

де

$$c = k\Phi. \quad (36)$$

Коефіцієнт c приймається постійним, не залежним від навантаження, якщо у двигуна з незалежним збудженням є компенсаційна обмотка. Він може вважатися незмінним, якщо для звичайних двигунів нехтувати реакцією якоря.

Механічна характеристика двигуна при незмінних параметрах U , Φ і R представляється прямою лінією. Нижче показано, що, змінюючи той або інший параметр механічної характеристики, можна при певному моменті опору на валу двигуна одержувати різні швидкості двигуна, тобто регулювати швидкість електроприводу.

1.6 Вплив опору якірного кола на швидкість двигуна електроприводу

Тут же розглянемо вплив лише одного параметра, а саме опору якірного кола, оскільки це необхідно для з'ясування основних визначень, пов'язаних з поняттям про механічну характеристику для різних режимів роботи двигуна.

На рис. 11 представлені механічні характеристики двигуна незалежного збудження для різних опорів якірного кола. Як видно з (34), при $M = 0$ всі характеристики проходять через одну точку, що лежить на осі ординат. Кутова швидкість в цій точці має цілком певне значення, не залежне від опору якірного кола. Ця швидкість носить назву *швидкості ідеального холостого ходу* ω_0 і визначається виразом:

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}. \quad (37)$$

При швидкості ідеального холостого ходу, коли струм в якірному колі дорівнює нулю, ЕРС якоря, направлена назустріч прикладеній напрузі, дорівнює йому по абсолютному значенню. Якщо двигун до прикладення навантаження працював з кутовою швидкістю ω_0 , то при появі на його валу моменту опору кутова швидкість знижуватиметься. Следствием цього буде

зменшення ЕРС обертання E згідно (31) і збільшення струму якоря у відповідності з (30) і моменту двигуна по (33).

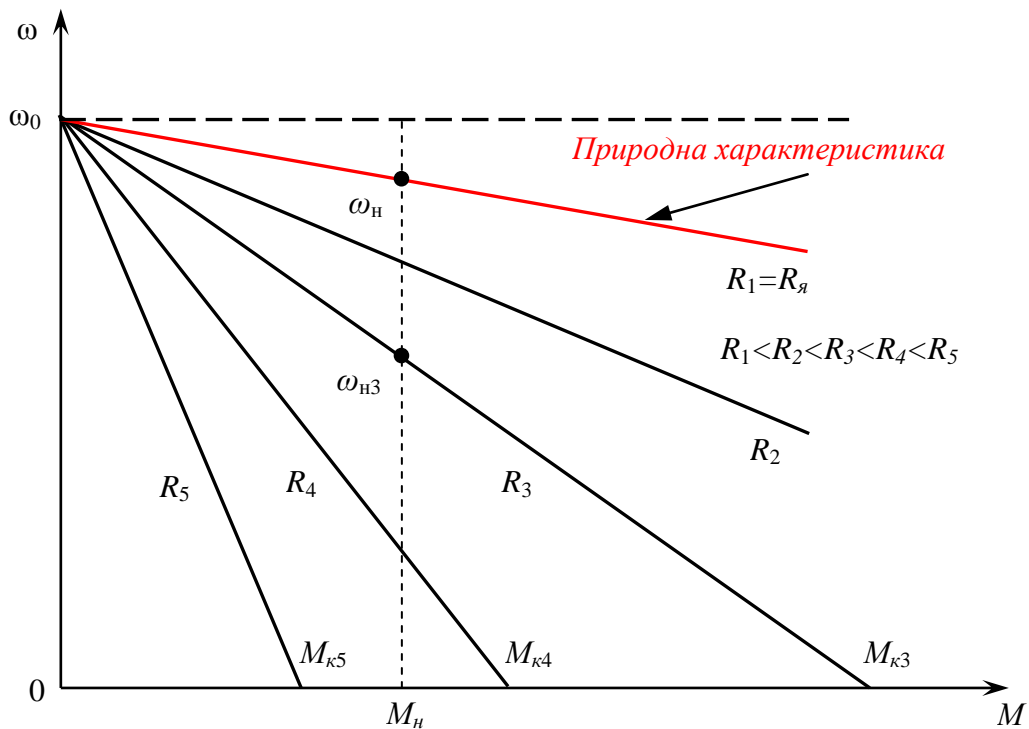


Рисунок 11 – Природна характеристика і сімейство реостатних механічних характеристик двигуна постійного струму незалежного збудження

Кутова швидкість знижуватиметься до тих пір, поки момент двигуна не порівняється з моментом опору. Різниця значень сталих швидкостей електроприводу до і після прикладення заданого статичного навантаження називається *статичним падінням (перепадом) швидкості електроприводу*. Другий член (35) характеризує собою статичне падіння кутової швидкості (перепад) щодо кутової швидкості ідеального холостого ходу:

$$\Delta\omega = M \frac{R}{k^2\Phi^2}. \quad (38)$$

Таким чином, рівняння для швидкості двигуна може бути записано так:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (39)$$

Верхня характеристика з сімейства, приведеного на рис. 11, носить назву природної. *Природною характеристикою* називається така характеристика двигуна, яка виходить за відсутності зовнішніх резисторів в якірному колі і номінальних значеннях напруги і магнітного потоку двигуна. Жорсткість природної характеристики залежить від внутрішнього опору якірного кола двигуна $R_я$. Внутрішній опір якірного кола включає власний

опір якірної обмотки, опір обмотки додаткових полюсів, компенсаційної обмотки і щіток. Відповідно перепад швидкості для природної характеристики:

$$\Delta\omega = M \frac{R_y}{k^2\Phi^2}. \quad (40)$$

По (38) визначається статичне падіння швидкості для будь-якої з характеристик двигуна незалежного збудження, представлених на рис. 11. Наприклад, при додатково включеному реостаті, що має опір R_p , статичне падіння швидкості визначиться із співвідношення:

$$\Delta\omega = M \frac{R_y + R_p}{k^2\Phi^2}. \quad (41)$$

Розділивши (39) на ω_0 , отримаємо статичне падіння швидкості у відносних одиницях:

$$\Delta\omega_* = \Delta\omega / \omega_0 = (\omega_0 - \omega) / \omega_0. \quad (42)$$

Статичне падіння швидкості у відносних одиницях $\Delta\omega_*$ аналогічно ковзанню асинхронного двигуна, хоча ковзання для двигунів постійного струму не має того фізичного сенсу, як у асинхронних двигунів.

Якщо в якірне коло двигуна включений додатковий резистор (реостат), то механічні характеристики, одержувані при цьому, називаються *штучними або реостатними*. Ці характеристики перетинаються всі в одній точці ω_0 . Реостатні характеристики так само лінійні, як і природна характеристика, але мають значно більший нахил до осі моментів, тобто мають меншу жорсткість. Чим більше введене в коло якоря опір резистора, тим крутіше йде характеристика, тим менше її жорсткість.

1.7 Побудова механічних характеристик двигуна постійного струму незалежного збудження

Для побудови механічної характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження, природної або реостатної, достатньо знати лише дві її точки, оскільки всі механічні характеристики теоретично є прямими лініями (рис. 11). Ці дві точки для кожної характеристики можуть бути будь-які, проте побудову природної механічної характеристики зручно проводити по точках, одна з яких відповідає номінальному електромагнітному моменту двигуна і номінальній швидкості ($M = M_{ном}$ і $\omega = \omega_{ном}$), а інша – швидкості ідеального холостого ходу ($M = 0$ і $\omega = \omega_0$). Номінальна швидкість двигуна

визначається за паспортними даними. Номінальний електромагнітний момент обчислюється по формулі:

$$M_{ном} = c \cdot I_{ном} \cdot \quad (43)$$

Швидкість ідеального холостого ходу для природної характеристики може бути отриманий з $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$, якщо чисельник і знаменник її помножити на $\omega_{ном}$ і врахувати, що

$$E_{ном} = k\Phi\omega_{ном} = U_{ном} - I_{ном}R_{я}, \quad (44)$$

тоді

$$\omega_0 = \frac{U}{U - I_{ном}R_{я}} \cdot \omega_{ном}. \quad (45)$$

Оскільки в каталогах внутрішній опір якоря $R_{я}$ звичайно не вказується, то його орієнтовно визначають, приймаючи, що половина всіх втрат в двигуні при номінальному навантаженні пов'язана з втратами в міді якоря.

Тому

$$I_{ном}^2 R_{я} \approx 0,5(1 - \eta_{ном}) \cdot I_{ном} U.$$

Звідси

$$R_{я} \approx 0,5 \cdot (1 - \eta_{ном}) \frac{U}{I_{ном}}. \quad (46)$$

Користуючись природною механічною характеристикою, легко побудувати і реостатну характеристику при будь-якому опорі реостата R_p . Вона також будується по двом точкам: кутової швидкості ідеального холостого ходу $\omega = \omega_0$ (при $M = 0$) і кутової швидкості, відповідної номінальному моменту при заданому опорі резистора R_p , тобто $\omega = \omega_{ном, p}$ (при $M = M_{ном}$). Кутова швидкість $\omega_{ном, p}$ визначається по формулі:

$$\omega_{ном, p} = \omega_0 \left[1 - \frac{I_{ном} (R_{я} + R_p)}{U} \right]. \quad (47)$$

Механічна характеристика може бути побудована також по точці ідеального холостого ходу і точці, відповідній режиму короткого замикання (режимом короткого замикання двигуна називається такий режим його

роботи, при якому кутова швидкість двигуна, підключеного до джерела напруги, рівна нулю) де $M = M_{кз}$, а швидкість $\omega = 0$. Кутову швидкість ω_0 визначаємо по (45), а момент $M_{кз}$, нехтуючи реакцією якоря, – по формулі:

$$M_{кз} = M_{ном} \frac{I_{кз}}{I_{ном}}, \quad (48)$$

де $I_{кз} = U/R$ – струм короткого замикання.

Опір якірного кола $R = R_{я} + R_p$ може бути різним залежно від опору зовнішнього резистора. Відповідно до цього будуть різними для різних реостатних характеристик і струми короткого замикання $I_{кз}$ і моменти короткого замикання $M_{кз}$.

Для природної механічної характеристики значення моменту короткого замикання $M_{кз}$ є найбільшим, оскільки при цьому струм короткого замикання обмежується лише внутрішнім опором обмоток якоря двигуна. З урахуванням сказаного, рівняння механічної характеристики представляється в наступному вигляді:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{M}{M_{кз}} \right). \quad (49)$$

Згідно (49) при $M = 0$ швидкість $\omega = \omega_0$. Якщо в (49) представити $M = M_{кз}$, то швидкість $\omega = 0$. Це будуть (при різних реостатних характеристиках) точки, що лежать на осі абсцис (рис. 11) і визначувані опорами, що обмежують струм і момент короткого замикання. Так, якщо у декількох двигунів механічні характеристики володіють однаковою жорсткістю, то вказані характеристики, виражені у відносних одиницях, будуть для всіх цих двигунів представлені однією і тією ж прямою.

1.8 Побудова механічної характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження у відносних одиницях

Рівняння характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження у відносних одиницях легко може бути отримано з $\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}$, якщо виразити його таким чином:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{IR}{U} \right). \quad (50)$$

Розділивши потім ліву і праву частини на ω_0 , отримаємо:

$$\omega_* = 1 - \frac{IR}{U}, \quad (51)$$

після перетворень

$$\omega_* = 1 - I_* R_*, \quad (52)$$

або відповідно (при $\Phi = \Phi_{ном} = const$)

$$\omega_* = 1 - M_* R_*, \quad (53)$$

де $\omega_* = \frac{\omega}{\omega_0}$; $I_* = \frac{I}{I_{ном}}$; $M_* = \frac{M}{M_{ном}}$ – відповідно кутова швидкість, струм і

момент двигуна у відносних одиницях;

$R_* = \frac{R}{R_{ном}}$ – опір у відносних одиницях;

$R_{ном} = \frac{U}{I_{ном}}$ – номінальний опір двигуна.

Номінальним опором двигуна постійного струму називається такий опір, який при нерухомому якорі і номінальній напрузі обмежує струм в якорі до номінального значення.

В (52) і (53) другий член правої частини є перепадом (статичне падіння) кутової швидкості, вираженим у відносних одиницях і рівний:

$$\Delta\omega_* = I_* R_* = M_* R_*. \quad (54)$$

Остання рівність дозволяє за відомих умов значно спростити розрахунок механічних характеристик. Дійсно, якщо розглядати точки механічних характеристик, що відповідають номінальному моменту, то для них $I_* = 1$ і $M_* = 1$ і, отже, рівність (54) приймає вигляд:

$$\Delta\omega_* = R_*. \quad (55)$$

Це означає, що при номінальному моменті відносний перепад кутової швидкості двигуна чисельно рівний відносному опору якорного кола двигуна.

Проведемо тепер як приклад побудову механічних характеристик двигуна незалежного збудження, схема включення якої представлена на рис. 12. Процес пуску двигуна полягає в тому, що спочатку замикається вимикач K , потім через деякі проміжки часу в міру збільшення кутової швидкості замикаються послідовно вимикачі K_1 , K_2 і K_3 . Коли ж всі контакти замкнуться і пусковий резистор виявиться повністю зашунтованим, двигун

почне працювати з певною кутовою швидкістю на природній механічній характеристиці.

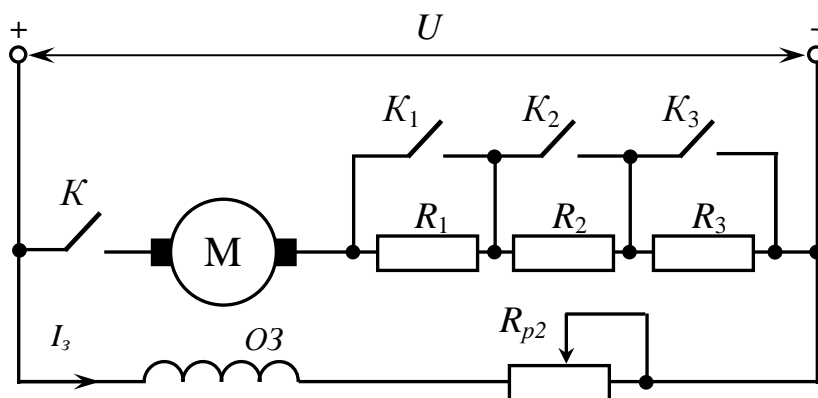


Рисунок 12 – Схема включення двигуна постійного струму незалежного збудження при пуску

Природна характеристика у відносних одиницях легко може бути побудована, якщо прийняти згідно (52) і (53):

$$\omega_* = \omega_{0*} = 1 \text{ і } \Delta\omega_* = R_* \text{ при } M_* = 1.$$

Координати однієї точки характеристики:

$$\omega_* = 1, M_* = 0;$$

Іншої

$$\omega_{ном*} = 1 - \Delta\omega_{ном*}, M_* = 1.$$

Проведена через ці дві точки пряма і буде природною механічною характеристикою. Вказана побудова проведена на рис. 13. Там же дана побудова реостатних характеристик і графічне визначення опорів.

Побудова реостатних характеристик і розрахунок опорів резисторів мають значення при проектуванні схем автоматизованого пуску двигуна. Для побудови реостатних характеристик прийнято, що момент і струм двигуна при пуску змінюються в межах від M_{1*} до M_{2*} і від I_{1*} до I_{2*} . Значення M_{1*} (I_{1*}) при номінальному потоці двигуна звичайно приймається за умов комутації рівним 2 – 2,5. Що стосується значення M_{2*} (I_{2*}), то його потрібно прийняти принаймні на 10 – 20 % більше моменту опору механізму.

Відповідно до характеристики 1 – 2 двигун збільшує кутову швидкість до значення, визначеного положенням точкою 2, потім повинен бути зашунтований перший ступінь резистора (замикається вимикач K_1 схеми на рис. 13). Кутова швидкість двигуна через інерційність електроприводу не може змінитися відразу, а момент, якщо нехтувати індуктивністю якоря, зростає миттєво до значення M_{1*} , тому перехід на нову характеристику здійснюється по лінії 2 – 3, паралельної осі абсцис.

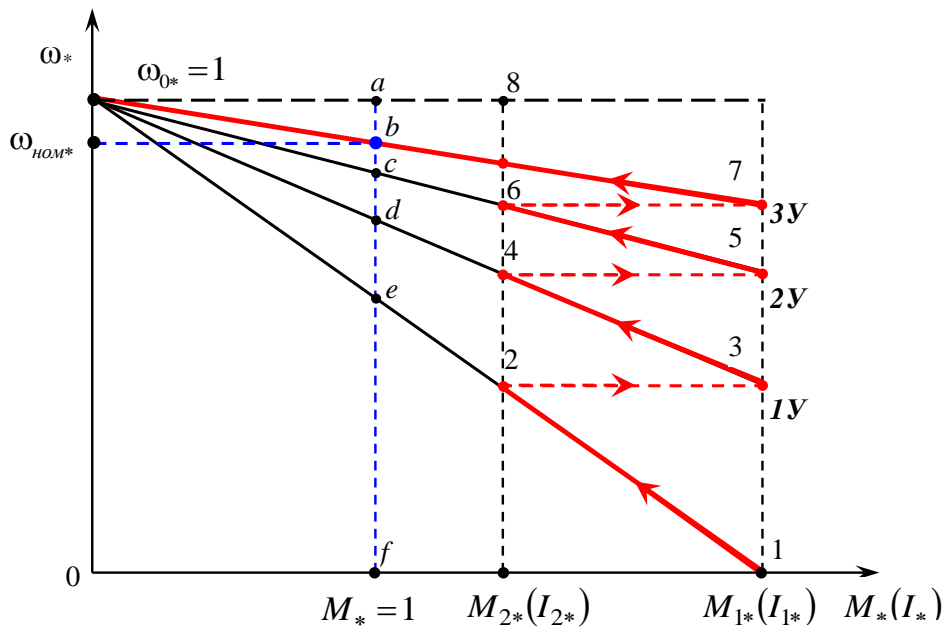


Рисунок 13 – Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження у відносних одиницях

Далі двигун збільшуватиме кутову швидкість відповідно прямій 3 – 4 до точки 4, і коли замкнеться вимикач K_2 , відбудеться перехід на наступну характеристику. Після замикавання вимикача K_3 наступає перехід на природну характеристику (6–7). Якщо при пуску, навантаження на валу двигуна відповідає номінальному моменту, то двигун після закінчення пуску працює на природній характеристиці з швидкістю, відповідною $\omega_{ном*}$.

Згідно (55) вертикальні відрізки на лінії, проведеній через точку $M_* = 1$, відповідають окремим ступеням опору якірного кола у відносних одиницях (рис. 13). Ордината af у відносних одиницях рівна номінальному опорі, тобто $R_{ном*} = 1$. Ординати ae , ad , ac , ab рівні відповідно відносним опорам окремих ступенів якірного кола двигуна. Якщо з вказаних відносних величин відняти відносний внутрішній опір двигуна, відзначений відрізком ab , то вийдуть відносні опори окремих ступенів реостата (відповідні ординатам be , bd і bc). Окремі секції реостата R_1 , R_2 і R_3 (рис. 12) мають відносні опори R_{1*} , R_{2*} і R_{3*} , відповідні відрізкам de , cd і bc (рис. 13).

Для переходу від опорів, виражених у відносних одиницях, до значень опорів в Омах, проводиться відповідний перерахунок по виразу:

$$R = R_* \cdot R_{ном} . \quad (56)$$

2 ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ

2.1 Практичні завдання на VI семестр

Практичне завдання № 1

Задача №1. Визначити момент інерції і маховий момент шестерні, зображеної на **рис. 14**, відносно її осі. Матеріал шестерні – сталь з питомою вагою $m_* = 7,8 \text{ т/м}^3$. Які будуть момент інерції і маховий момент шестерні відносно осі, яка проходить паралельно геометричній осі і співпадає з початковою окружністю? При розрахунку можна приблизно вважати, що поверхня шестерні не зубчата, а гладка і співпадає з початковою окружністю шестерні.

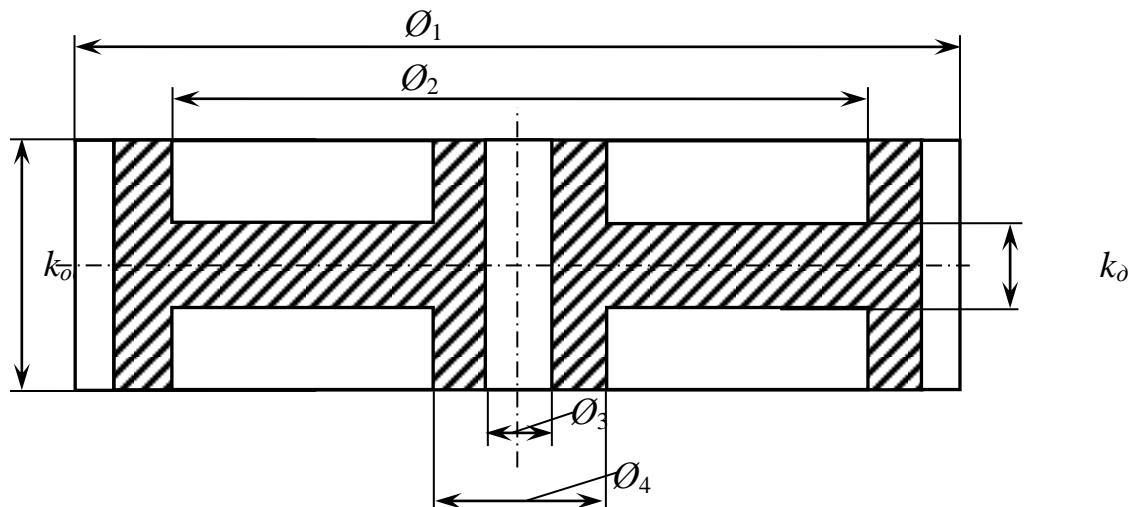


Рисунок 14 – Шестерня

Розв'язання

Шестерню слід розбити на три елементарних геометричних тіла: обід, ступицю і диск, який з'єднує ступицю з обідом. Кожне з цих тіл являє собою полий циліндр, вісь якого співпадає з віссю шестерні, тому момент інерції може бути визначений по формулі

$$J = \frac{\pi l m_*}{2} (r_2^4 - r_1^4) \cdot 1000, \quad 1)$$

прискорення вільного падіння (коефіцієнт $g = 9,81$) не будемо враховувати, тому що він в подальших розрахунках скорочується. 1000 – з'явилася через розмірності $m_* = 7,8 \text{ т/м}^3$. Це переведення в кг (в системі СІ).

Для обіда:

$$J_{об} = \frac{\pi l m_*}{2} (r_{2об.}^4 - r_{1об.}^4) \cdot 1000, \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Для ступиці:

$$J_{cm} = \frac{\pi l m_*}{2} (r_{2cm.}^4 - r_{1cm.}^4) \cdot 1000, \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Для диска:

$$J_{disc} = \frac{\pi l m_*}{2} (r_{2disc.}^4 - r_{1disc.}^4) \cdot 1000, \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Загальний момент інерції шестерні

$$J = J_{об} + J_{cm} + J_{disc}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Маховий момент визначається, як

$$GD_{ui}^2 = J_{ui} \cdot 4g \text{ Н} \cdot \text{м}^2$$

Якщо шестерня обертається навкруги осі, яка співпадає з початковою окружністю, то маховий момент

$$GD_{ui1}^2 = GD_{ui}^2 + 4a^2G,$$

где a – найбільший радіус інерції, m ;

$$G_{ui} = \left[\pi (r_{2об.}^2 - r_{1об.}^2) k_{об.} \cdot m_* + \pi (r_{2cm.}^2 - r_{1cm.}^2) k_{cm.} \cdot m_* + \pi (r_{2disc.}^2 - r_{1disc.}^2) k_{disc.} \cdot m_* \right] \times \\ \times 1000 \cdot g, \text{ Н}.$$

Тут ми не враховуємо g , тому що цей коефіцієнт скорочується (див. формулу (1)).

$$GD_{ui1}^2 = GD_{ui}^2 + 4a^2G, \text{ Н} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції відносно цієї осі буде

$$J_{ui1} = \frac{GD_{ui1}^2}{4g} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Варіанти для рішення наведені в табл. 1

Номер варіанта студента відповідає порядковому номеру в списку журналу успішності (відомості).

Таблиця 1

Варіант	$\varnothing_1, мм$	$\varnothing_2, мм$	$\varnothing_3, мм$	$\varnothing_4, мм$	$k_{об}, мм$	$k_д, мм$
1.	200	160	10	60	50	16
2.	220	170	15	64	68	18
3.	230	180	20	68	70	20
4.	240	190	24	70	75	15
5.	250	200	28	72	78	18
6.	260	230	30	74	80	22
7.	270	240	34	84	84	20
8.	280	250	36	76	86	24
9.	290	250	38	80	88	28
10.	300	240	40	76	90	30
11.	320	260	42	72	92	40
12.	340	270	44	80	94	44
13.	360	280	40	82	96	42
14.	380	300	42	84	98	46
15.	410	320	30	78	100	48
16.	420	340	32	84	105	50
17.	430	360	34	86	104	48
18.	450	380	36	88	110	55
19.	470	400	30	78	115	60
20.	480	390	28	82	120	65
21.	487	400	40	87	119	63
22.	502	413	41	88	122	65
23.	517	425	42	89	125	68
24.	531	437	42	90	128	71
25.	546	450	43	91	131	73
26.	561	462	44	92	133	76
27.	576	475	45	93	136	79
28.	591	487	46	94	139	81
29.	606	499	47	95	142	84
30.	621	512	47	96	145	86

Практичне завдання № 2

Задача №1. Підйомний пристрій має кінематичну схему (рис. 1) і наступні дані: швидкість двигуна $n = \dots$ об/хв, $J_0 = \dots$ кг·м², $J_1 = \dots$ кг·м², $J_2 = \dots$ кг·м², $i_1 = i_2 = \dots$; ККД кожної пари шестерень $\eta = \dots$, $D = \dots$ м. Визначити момент інерції для випадку розгону і уповільнення при підйомі вантажу в \dots т.

Варіанти для рішення наведені в табл. 1

Номер варіанта студента відповідає порядковому номеру в списку журналу успішності (відомості).

Таблиця 1

Варіант	n , об/хв	J_0 , кг·м ²	J_1 , кг·м ²	J_2 , кг·м ²	i_1	i_2	η	D , м	m , кг
1	980	0,5	2	25	4	4	0,95	0,7	1000
2	980	0,8	3	22	4	2	0,95	0,6	1100
3	1000	0,5	5	20	3	2	0,95	0,7	900
4	950	0,6	3	27	4	3	0,95	0,8	1200
5	1500	0,7	4	30	3	2	0,95	0,9	1030
6	950	0,5	5	22	2	4	0,95	0,7	1050
7	980	0,8	6	23	3	3	0,95	0,6	980
8	1000	0,5	7	24	4	2	0,95	0,7	900
9	1100	0,6	8	25	5	2	0,95	0,8	1110
10	1200	0,7	9	26	4	3	0,95	0,9	1000
11	1300	0,5	10	27	4	2	0,95	0,7	1200
12	1400	0,8	2	28	3	4	0,95	0,6	1300
13	1500	0,5	3	29	4	5	0,95	0,7	980
14	900	0,6	5	30	3	4	0,95	0,8	990
15	950	0,7	3	31	2	5	0,95	0,9	1030
16	980	0,5	4	32	3	4	0,95	0,7	1000
17	1000	0,8	5	33	4	5	0,95	0,6	1100
18	1100	0,5	6	20	5	3	0,95	0,7	900
19	1200	0,6	7	23	4	2	0,95	0,8	1200
20	1300	0,7	8	21	4	5	0,95	0,9	1030
21	1400	0,5	9	25	3	5	0,95	0,7	1050
22	1500	0,8	10	26	4	5	0,95	0,6	980
23	900	0,5	2	24	3	4	0,95	0,7	900
24	950	0,6	3	25	2	5	0,95	0,8	1110
25	980	0,7	5	23	3	3	0,95	0,9	1000
26	1000	0,5	3	28	4	3	0,95	0,7	1200
27	1100	0,8	4	27	5	3	0,95	0,6	1300
28	1200	0,5	5	21	3	4	0,95	0,7	980
29	1300	0,6	6	23	4	2	0,95	0,8	990
30	1400	0,7	7	29	5	3	0,95	0,9	1030

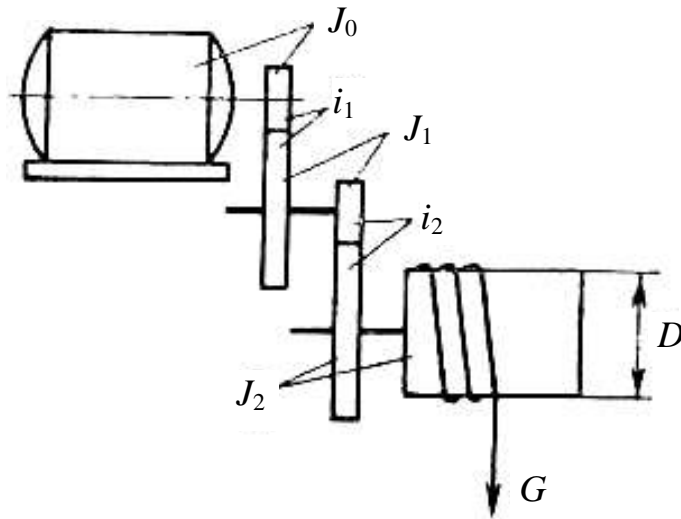


Рисунок 1 – Схема підйомного пристрою

Розв'язання

Щоб визначити приведений момент інерції, треба знати швидкість підйому вантажу, відповідну заданій швидкості двигуна. Цю швидкість, нехтуючи товщиною каната, можна вважати рівній окружній швидкості барабана

$$v_6 = \frac{\pi D n}{60 i_1 i_2}, \text{ м/с.}$$

Кутова швидкість двигуна

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \text{ рад/с.}$$

При розгоні

$$J_{\text{роз.}} = J_0 + \frac{J_1}{i_1^2 \eta_1} + \frac{J_2}{i_1^2 \cdot i_2^2 \eta_1 \eta_2} + \frac{m v^2}{\omega^2 \eta^2}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

При гальмуванні

$$J_{\text{гальм.}} = J_0 + \frac{J_1 \eta_1}{i_1^2} + \frac{J_2 \eta_1 \eta_2}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \frac{m v^2 \eta}{\omega^2}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Задача №2. Для схеми на рис. 2 а виконати операцію приведення у випадку підйому вантажу (розрахувати наведений момент навантаження та момент інерції) при наступних параметрах кінематичної схеми: див. табл. 2 (ККД редуктора η_p , ККД лебідки η_b).

Номер варіанта студента відповідає порядковому номеру в списку журналу успішності (відомості).

Таблиця 2

Варіант	R_0 , м	J_0 , кг·м ²	J_1 , кг·м ²	J_2 , кг·м ²	Z_1	Z_2	η_p	m , кг	η_b
1	0,15	0,1	0,02	2	14	86	0,97	1000	0,96
2	0,14	0,15	0,03	2,5	15	86	0,95	1100	0,98
3	0,13	0,16	0,04	1,9	18	87	0,96	900	0,97
4	0,12	0,17	0,04	1,5	13	89	0,98	1200	0,95
5	0,11	0,18	0,05	2	17	85	0,94	1030	0,96
6	0,16	0,13	0,08	2,3	12	87	0,95	1050	0,98
7	0,17	0,14	0,09	4	15	84	0,96	980	0,87
8	0,18	0,18	0,1	3,5	16	85	0,98	900	0,9
9	0,19	0,16	0,024	2,5	18	87	0,97	1110	0,96
10	0,15	0,2	0,12	2,6	15	85	0,96	1000	0,95
11	0,14	0,21	0,03	2,7	14	86	0,97	1200	0,94
12	0,13	0,18	0,04	2,8	16	89	0,95	1300	0,93
13	0,12	0,15	0,02	2,3	12	86	0,96	980	0,97
14	0,11	0,13	0,03	6	13	85	0,98	990	0,98
15	0,16	0,12	0,04	2,9	15	84	0,94	1030	0,96
16	0,17	0,14	0,04	2	16	82	0,95	1000	0,98
17	0,18	0,18	0,05	2,5	17	83	0,96	1100	0,97
18	0,19	0,14	0,08	1,9	19	89	0,98	900	0,95
19	0,15	0,2	0,09	1,5	18	90	0,97	1200	0,96
20	0,14	0,21	0,1	2	15	91	0,96	1030	0,98
21	0,13	0,13	0,024	2,3	14	97	0,97	1050	0,87
22	0,12	0,16	0,12	4	16	95	0,95	980	0,9
23	0,11	0,15	0,03	3,5	15	94	0,96	900	0,96
24	0,16	0,18	0,04	2,5	12	89	0,98	1110	0,95
25	0,17	0,14	0,02	2,6	13	96	0,94	1000	0,94
26	0,18	0,15	0,03	2,7	19	94	0,95	1200	0,93
27	0,19	0,16	0,04	2,8	18	95	0,96	1300	0,97
28	0,15	0,17	0,04	2,3	117	85	0,98	980	0,98
29	0,14	0,12	0,05	6	16	86	0,97	990	0,97
30	0,13	0,15	0,08	2,9	15	87	0,96	1030	0,94

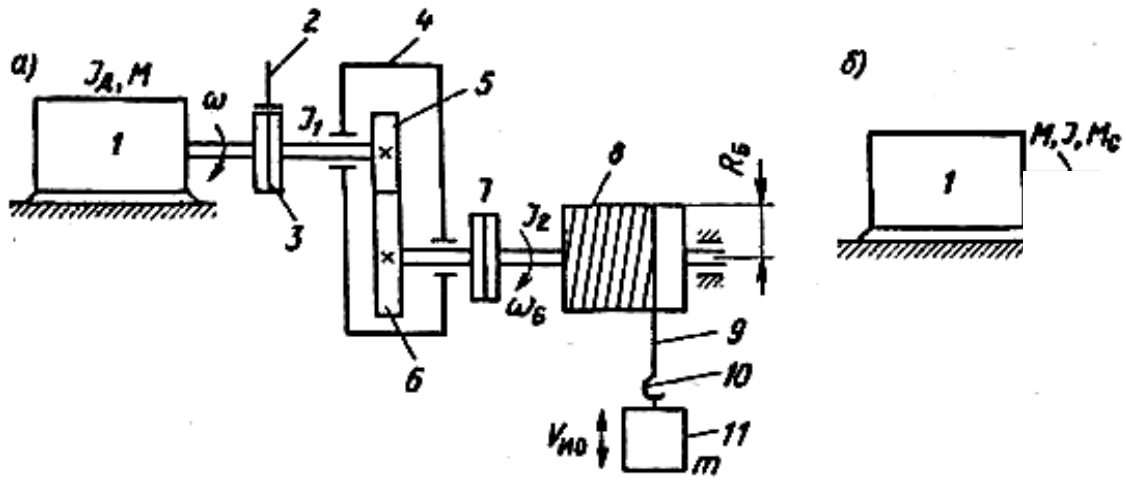


Рисунок 2 – Кінематична (а) і розрахункова (б) схеми піднімальної лебідки

Розв'язання

Визначимо передаточне число редуктора та радіус приведення кінематичної схеми, а по формулі $J = J_D + J_1 + \frac{J_2}{i^2} + m\rho^2$ момент інерції.

$$i = \frac{z_2}{z_1}; \quad \rho = \frac{R_B}{i}, \text{ м};$$

$$J = J_D + J_1 + \frac{J_2}{i^2} + m\rho^2, \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Розрахуємо наведений момент навантаження:

$$M_c = \frac{m \cdot g \cdot \rho}{\eta_p \cdot \eta_B}, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Практичне завдання №3

Задача № 1. Для двигуна постійного струму незалежного збудження типу П51 побудувати природну швидкісну характеристику.

Паспортні дані двигуна: див. табл. 1.

Номер варіанта студента відповідає порядковому номеру в списку журналу успішності (відомості).

Таблиця 1

Варіант	$P_{ном},$ кВт	$U_{ном},$ В	$I_{ном},$ А	$n_{ном},$ об/хв	Варіант	$P_{ном},$ кВт	$U_{ном},$ В	$I_{ном},$ А	$n_{ном},$ об/хв
1	11	220	59	3000	16	26	380	75	2950
2	12	220	57	3100	17	27	380	78	2850
3	13	380	56	3200	18	28	380	80	2750
4	14	380	57	3000	19	29	380	82	2650
5	15	380	55	2900	20	30	380	84	2600
6	16	380	54	2800	21	31	380	88	2550
7	17	380	53	2700	22	32	380	92	2500
8	18	380	52	2500	23	33	380	93	2450
9	19	380	61	2400	24	34	380	97	2400
10	20	380	62	3000	25	35	380	100	2350
11	21	380	63	3100	26	36	380	104	2300
12	22	380	64	3200	27	37	380	105	3100
13	23	380	68	3300	28	38	380	110	3090
14	24	380	70	3150	29	39	380	115	3200
15	25	380	72	3200	30	40	380	120	3120

Розв'язання

Номінальний опір двигуна

$$R_{ном} = \frac{U_{ном}}{I_{ном}}, \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт корисної дії двигуна при номінальному навантаженні

$$\eta_{ном} = \frac{1000 \cdot P_{ном}}{U_{ном} I_{ном}}.$$

Опір якоря двигуна

$$R_{я} \approx 0,5(1 - \eta_{ном}) \frac{U_{ном}}{I_{ном}} \approx 0,5(1 - \eta_{ном}) R_{ном}, \text{ Ом.}$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна

$$\omega_0 = \frac{U_{ном}}{U_{ном} - I_{ном} R_{я}} \cdot \omega_{ном}, \text{ рад/с.}$$

$$\omega_{ном} = \frac{2\pi n_{ном}}{60}, \text{ рад/с.}$$

Природна характеристика являє собою пряму лінію, що проходить через точки $\omega_0 = \dots$ рад/с, $I = 0$ і $\omega_{ном} = \dots$ рад/с, $I_{ном} = \dots$ А.

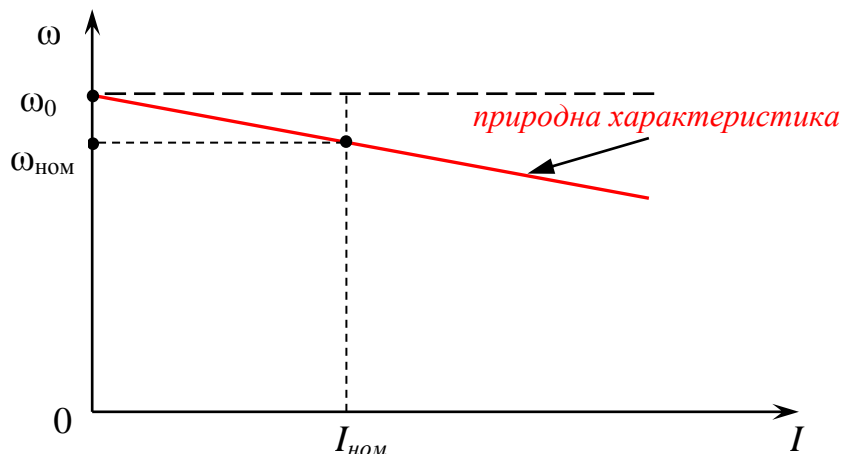


Рисунок 1 – Природна швидкісна характеристика двигуна постійного струму незалежного збудження типу П51

Задача № 2. Для двигуна постійного струму незалежного збудження типу П91 з паспортними даними див. табл. 2, $R_{я} = 0,049 R_{ном}$ потрібно вибрати пусковий реостат. Пуск двигуна виробляється в чотири сходинки.

Варіанти для рішення наведені в табл. 2.

Номер варіанта студента відповідає порядковому номеру в списку журналу успішності (відомості).

Таблиця 2

Варіант	$P_{ном},$ кВт	$U_{ном},$ В	$I_{ном},$ А	$n_{ном},$ об/хв	Варіант	$P_{ном},$ кВт	$U_{ном},$ В	$I_{ном},$ А	$n_{ном},$ об/хв
1	32,5	220	172	1000	16	43,5	380	187	1300
2	33	220	173	1100	17	44	380	188	1350
3	34	220	174	1200	18	44,5	380	189	1400
4	35	220	175	1150	19	45	380	190	1450
5	36	220	176	1250	20	45,5	380	191	1500
6	37	220	177	1300	21	46	380	192	1000
7	38	220	180	1350	22	46,5	380	193	1100
8	39	220	189	1400	23	47	380	194	1200
9	40	380	180	1450	24	47,5	380	195	1150

Варіант	$P_{ном},$ кВт	$U_{ном},$ В	$I_{ном},$ А	$n_{ном},$ об/хв	Варіант	$P_{ном},$ кВт	$U_{ном},$ В	$I_{ном},$ А	$n_{ном},$ об/хв
10	40,5	380	181	1500	25	48	380	196	1250
11	41	380	182	1000	26	48,5	380	197	1300
12	41,5	380	183	1100	27	49	380	198	1350
13	42	380	184	1200	28	49,5	380	199	1400
14	42,5	380	185	1150	29	50	380	200	1450
15	43	380	186	1250	30	51	380	201	1500

Розв'язання

Побудуємо у відносних одиницях природну механічну характеристику, провівши пряму через дві точки з координатами:

Перша точка: $\omega_{0*} = 1, M_* = 0$;

Друга точка: $\omega_{ном*} = 1 - 0,049 = 0,951, M_* = 1$.

Прийmemo максимальний пусковий момент $M_{1*} = 2$

Характеристику, що відповідає повністю включеному реостату, одержимо, з'єднавши прямою точки $\omega_{0*}, 0$ і $0, M_{1*}$.

Підберемо величину мінімального пускового моменту M_{2*} так, щоб, виконавши графічну побудову згідно рис. 2, одержати чотири пускові сходишки. З побудови знаходимо $M_{2*} = 1,1$.

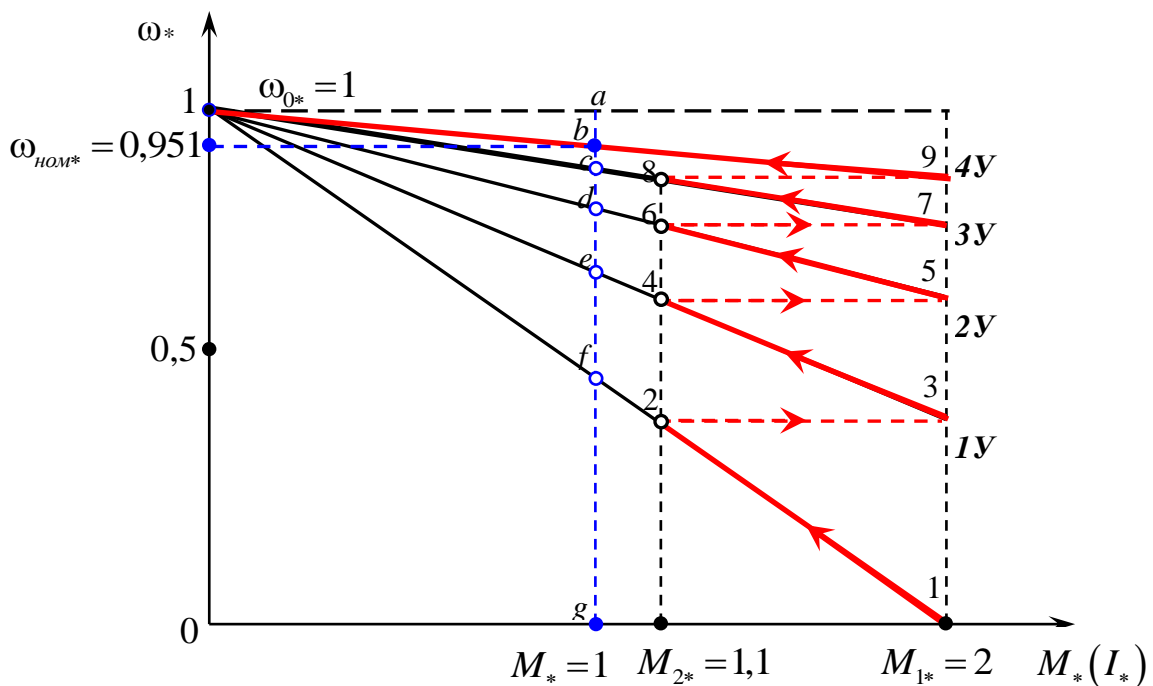


Рисунок 2 – Побудова механічної характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження у відносних одиницях

Відрізок ag відповідає номінальному опору двигуна

$$R_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}}, \text{ Ом.}$$

Опір сходинок пускового реостата

$$R_1 = \frac{ef}{ag} R_{\text{ном}}, \text{ Ом,} \quad R_2 = \frac{de}{ag} R_{\text{ном}}, \text{ Ом,}$$

$$R_3 = \frac{cd}{ag} R_{\text{ном}}, \text{ Ом,} \quad R_4 = \frac{bc}{ag} R_{\text{ном}}, \text{ Ом.}$$

Повний опір пускового реостата

$$R_p = \frac{bf}{ag} R_{\text{ном}}, \text{ Ом.}$$

Практичне завдання №4

Задача № 1. Дано двигун типу П91, з паспортними даними $P_{\text{ном}} = \dots$ кВт, $U = \dots$ В, $I_{\text{ном}} = \dots$ А, $n_{\text{ном}} = \dots$ об/хв. $R_{\text{я}} = 0,049 R_{\text{ном}}$

1. Двигун працює в режимі динамічного гальмування зі швидкістю, рівній половині номінальної, і номінальним струмом якоря.

Знайти величину додаткового опору, включеного в якірне коло, і момент на валу двигуна.

2. Двигун працює в режимі противовмикання зі швидкістю $n = 600$ об/хв. при струмі якоря $I = 110$ А.

Визначити: величину додаткового опору, включеного в коло якоря; момент на валу двигуна; потужності: споживану з мережі, що підводиться з валу, що поглинається в опорах якірного кола.

3. Двигун працює в генераторному режимі з віддачею енергії в мережу.

Визначити: швидкість обертання якоря, якщо струм якоря $I = 140$ А та $R_p = 0$.

Номер варіанта студента відповідає порядковому номеру в списку журналу успішності (відомості).

Таблиця 1

Варіант	$P_{ном},$ кВт	$U_{ном},$ В	$I_{ном},$ А	$n_{ном},$ об/хв	Варіант	$P_{ном},$ кВт	$U_{ном},$ В	$I_{ном},$ А	$n_{ном},$ об/хв
1	32	220	172	1000	16	39,5	220	223	2500
2	32,5	220	182	1100	17	40	220	225	2600
3	33	220	181	1200	18	40,5	220	230	2700
4	33,5	220	183	1300	19	41	220	231	2800
5	34	220	180	1400	20	41,5	220	233	2900
6	34,5	220	184	1500	21	42	220	235	3000
7	35	220	185	1600	22	42,5	220	236	2300
8	35,5	220	195	1700	23	43	220	238	2400
9	36	220	193	1800	24	43,5	220	239	2500
10	36,5	220	196	1900	25	44	220	241	2600
11	37	220	203	2000	26	44,5	220	244	2700
12	37,5	220	217	2100	27	45	220	255	2800
13	38	220	218	2200	28	45,5	220	257	2900
14	38,5	220	219	2300	29	46	220	261	3000
15	39	220	221	2400	30	46,5	220	263	3100

Розв'язання

1. Режим динамічного гальмування.

Опір якоря двигуна:

$$R_{я} = 0,049 R_{ном}, \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт c :

$$c = \frac{U_{ном} - I_{ном} R_{я}}{\omega_{ном}}, \text{ В} \cdot \text{с/рад},$$

$$\text{де } \omega_{ном} = \frac{2\pi n_{ном}}{60} \text{ рад/с.}$$

Електромагнітний момент двигуна при номінальному струмі:

$$M = c \cdot I_{ном}, \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Номінальний момент на валу двигуна:

$$M = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{\omega_{ном}}, \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Момент втрат холостого ходу:

$$M_0 = M - M_{ном}, \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Момент на валу двигуна:

$$M_e = M + M_0, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Загальний опір якірного кола (*швидкість дорівнює половині номінальної*):

$$R = \frac{c^2 \omega}{M}, \text{ Ом.}$$

Додатковий опір:

$$R_p = R - R_{я}, \text{ Ом.}$$

2. Режим противовмикання.

Загальний опір якірного кола:

$$R = \frac{U_{ном} + c\omega}{I}, \text{ Ом,}$$

де $\omega = \frac{2\pi n}{60}$, рад/с.

Додатковий опір:

$$R_p = R - R_{я}, \text{ Ом.}$$

Електромагнітний момент двигуна:

$$M = c \cdot I, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Момент на валу двигуна:

$$M_e = M + M_0, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Потужність, що споживається з мережі:

$$P = U \cdot I, \text{ кВт.}$$

Потужність, що поглинається в опорах якірного кола:

$$P_{я} = I^2 \cdot R, \text{ кВт.}$$

Потужність, що підводиться з валу (без урахування втрат холостого ходу):

$$P_2 = P_{\text{я}} - P, \text{ кВт.}$$

3. Генераторний режим з віддачею енергії в мережу.

Швидкість обертання якоря:

$$\omega = \frac{U_{\text{ном}}}{c} + \frac{IR_{\text{я}}}{c}, \text{ рад/с.}$$

$$n = \frac{\omega}{\pi} \cdot 30, \text{ об/хв.}$$

Практичне завдання № 5

Задача №1. Побудувати природну характеристику для двигуна постійного струму послідовного збудження типу ДП41. Паспортні дані двигуна наведені в табл. 1.

Знайти також величини додаткових опорів, які включені у коло якоря для зниження швидкості при $I = I_n$ до 400 об/хв ($\omega_{\text{рн1}}=41,8$ рад/с) та 200 об/хв ($\omega_{\text{рн2}}=20,9$ рад/с). Побудувати реостатні характеристики при включенні знайдених опорів

Номер варіанта студента відповідає порядковому номеру в списку журналу успішності (відомості).

Таблиця 1

Варіант	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В	$I_{\text{ном}}$, А	$n_{\text{ном}}$, об/хв	Варіант	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В	$I_{\text{ном}}$, А	$n_{\text{ном}}$, об/хв
1	17	220	94	630	16	26	380	75	630
2	20	220	98	640	17	27	380	78	640
3	15	380	50	650	18	28	380	80	650
4	16	380	55	660	19	29	380	82	660
5	17	380	57	670	20	30	380	84	670
6	18	380	59	680	21	31	380	88	680
7	19	380	60	690	22	32	380	92	690
8	20	380	62	700	23	33	380	93	700
9	19	380	61	710	24	34	380	97	710
10	20	380	62	720	25	35	380	100	720
11	21	380	63	730	26	36	380	104	730
12	22	380	64	740	27	37	380	105	740
13	23	380	68	750	28	38	380	110	750
14	24	380	70	760	29	39	380	115	760
15	25	380	72	770	30	40	380	120	770

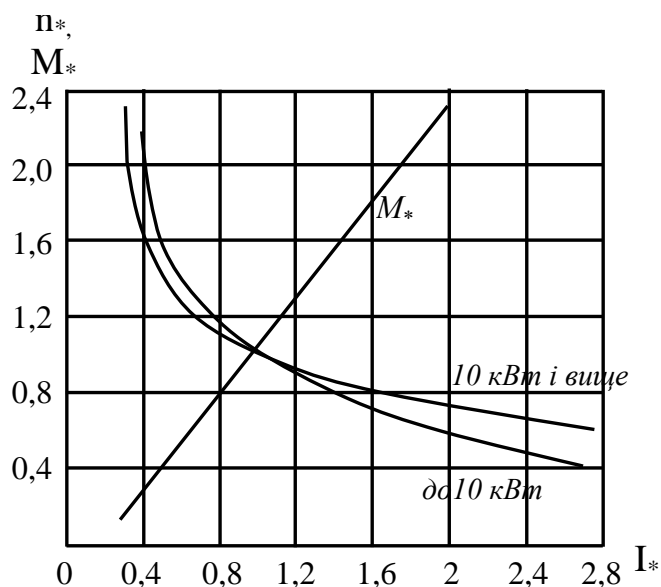


Рисунок 1 – Залежність моменту та швидкості від струму якоря двигуна послідовного збудження (у відносних одиницях)

Розв'язання

Природну характеристику розраховуємо, користуючись кривими, наведеними на рис. 1. При цьому $I_{H*} = 1$, $I_H = 94 \text{ A}$, $n_{H*} = 1$, $n_H = \underline{\text{див. таблицю об/хв}}$ ($\omega_H = \dots \text{ рад/с}$), тоді

$$I = I_H I_*; \omega_e = \omega_H \omega_*; n = n_H n_*.$$

Результати розрахунків зведені в табл. 2.

Таблиця 2

I_*	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$I, \text{ A}$
n_*
$\omega_e, \text{ рад/с}$
$n, \text{ об/хв}$

Природна характеристика за даними цієї таблиці побудована на рис. 2. Номінальний опір двигуна

$$R_H = \frac{U_H}{I_H}, \text{ Ом}$$

Коефіцієнт корисної дії двигуна при номінальному навантаженні

$$\eta_n = \frac{1000 \cdot P_n}{U_n \cdot I_n}$$

Опір обмотки якоря

$$R_{я} \approx 0,5(1 - \eta_{ном}) \frac{U_{ном}}{I_{ном}} \approx 0,5(1 - \eta_{ном}) R_{ном}, \text{ Ом}$$

Опір послідовної обмотки збудження приблизно дорівнює:

$$R_{п.з.} = 0,5 \cdot R_{я}, \text{ Ом}$$

Внутрішній опір двигуна

$$R_0 = R_{п.з.} + R_{я}, \text{ Ом}$$

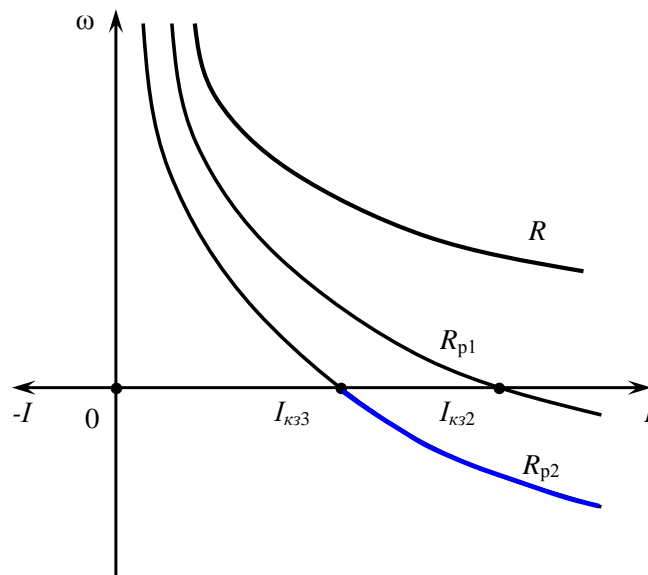


Рисунок 2 – Природна ($R_p = 0$) і реостатні (R_{p1}, R_{p2}) характеристики двигуна послідовного збудження.

Поклавши в рівнянні $\omega = \omega_e \frac{U - I(R_D + R_P)}{U - IR_D}$ $I = I_n$ і вирішивши його відносно R_p , отримаємо:

$$R_p = \left(1 - \frac{\omega_{pn}}{\omega_n}\right) (R_n - R_0).$$

Додатковий опір, який необхідний для зниження швидкості до 41,8 рад/с
 $R_{p1} = \dots$

Додатковий опір, який необхідний для зниження швидкості до 20,9 рад/с
 $R_{p2} = \dots$

Розрахунок реостатних характеристик зробимо по формулі:

$$\omega = \omega_e \frac{U - I(R_D + R_P)}{U - IR_D},$$

де ω_e – радіальна швидкість, яка обумовлена для даного струму по природній характеристиці. Результати розрахунків зведені в табл. 3.

За даними табл. 3 на рис. 2 побудовані реостатні характеристики двигуна.

Таблиця 3

I, А									
ω_e , рад/с									
ω (для R_{p1}), рад/с									
ω (для R_{p2}), рад/с									

Практичне завдання № 6

Задача №1. Для двигуна послідовного збудження типу ДП41 розрахувати пусковий реостат. Пуск двигуна виконується в три сходинок.

Паспортні дані двигуна наведені в табл. 1

Номер варіанта студента відповідає порядковому номеру в списку журналу успішності (відомості).

Таблиця 1

Варіант	$R_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, А	$n_{ном}$, об/хв	Варіант	$R_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, А	$n_{ном}$, об/хв
1	17	220	94	630	16	26	380	75	630
2	20	220	98	640	17	27	380	78	640
3	15	380	50	650	18	28	380	80	650
4	16	380	55	660	19	29	380	82	660
5	17	380	57	670	20	30	380	84	670
6	18	380	59	680	21	31	380	88	680
7	19	380	60	690	22	32	380	92	690
8	20	380	62	700	23	33	380	93	700
9	19	380	61	710	24	34	380	97	710
10	20	380	62	720	25	35	380	100	720
11	21	380	63	730	26	36	380	104	730
12	22	380	64	740	27	37	380	105	740
13	23	380	68	750	28	38	380	110	750
14	24	380	70	760	29	39	380	115	760
15	25	380	72	770	30	40	380	120	770

Розв'язання

Природна характеристика двигуна побудована в завданні №1. Вибираємо значення максимального пускового струму $I_I = 2I_n$, А. Значення струму перемикання $I_2 = 1,34I_n$, А визначається після декількох попередніх проб.

Тоді

$$R_I = \frac{U}{I_I}, \text{ Ом.}$$

$$R_{II} = \frac{U}{I_{II}}, \text{ Ом.}$$

Проводимо допоміжні прямі $\omega = f(R)$ при $I = I_I = \text{const}$ та при $I = I_2 = \text{const}$ (рис. 1).

Величини опорів сходинок пускового реостата та значення швидкостей перемикання визначаються графічно.

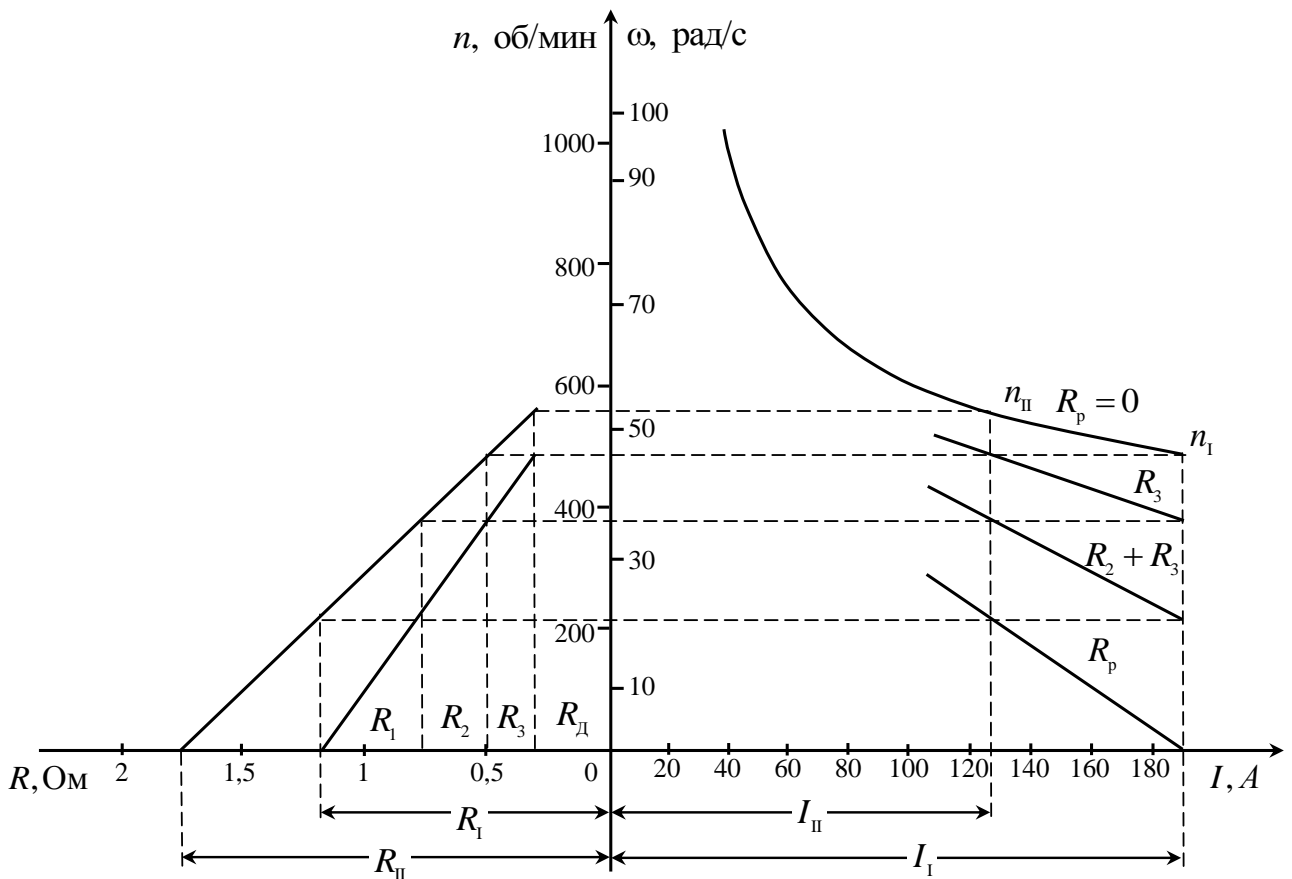


Рисунок 1 – До розрахунку пускового реостата двигуна послідовного збудження

Опір першої сходинки

$$R_1 = \dots, \text{ Ом.}$$

Опір другої сходинки

$$R_2 = \dots, \text{ Ом.}$$

Опір третьої сходинки

$$R_3 = \dots, \text{ Ом.}$$

Повний опір пускового реостата

$$R_p = R_1 + R_2 + R_3, \text{ Ом.}$$

Практичне заняття № 7

Задача № 1. Двигун ДП41, паспортні дані якого наведені в табл. 1, повинен працювати, спускаючи вантаж, у режимі противовмикання при $I = 1,51I_n$ і швидкостях обертання в одному випадку 20,9 рад/с, а в іншому 41,8 рад/с. Визначити величини додаткових опорів у колі якоря двигуна та побудувати відповідні характеристики.

Номер варіанта студента відповідає порядковому номеру в списку журналу успішності (відомості).

Таблиця 1

Варіант	$P_{ном},$ кВт	$U_{ном},$ В	$I_{ном},$ А	$n_{ном},$ об/хв	Варіант	$P_{ном},$ кВт	$U_{ном},$ В	$I_{ном},$ А	$n_{ном},$ об/хв
1	17	220	94	630	16	26	380	75	630
2	20	220	98	640	17	27	380	78	640
3	15	380	50	650	18	28	380	80	650
4	16	380	55	660	19	29	380	82	660
5	17	380	57	670	20	30	380	84	670
6	18	380	59	680	21	31	380	88	680
7	19	380	60	690	22	32	380	92	690
8	20	380	62	700	23	33	380	93	700
9	19	380	61	710	24	34	380	97	710
10	20	380	62	720	25	35	380	100	720
11	21	380	63	730	26	36	380	104	730
12	22	380	64	740	27	37	380	105	740
13	23	380	68	750	28	38	380	110	750
14	24	380	70	760	29	39	380	115	760
15	25	380	72	770	30	40	380	120	770

Розв'язання

По природній характеристиці двигуна ДП41 (див. вище) знайдемо значення швидкості ω при струмі $I = 1,51I_n$, А. $\omega = \dots$ рад/с.

Відповідно

$$k\Phi = \frac{U - IR_d}{\omega}, \text{ В}\cdot\text{с/рад}$$

Електрорушійна сила якоря в режимі противовмикання при струмі якоря $I = 1,51I_n$, А.

$$E = k\Phi\omega_T,$$

де ω_T – швидкість обертання якоря.

Струм якоря.

$$I = \frac{U + E_y}{R_d + R_p},$$

Звідки

$$R_p = \frac{U + E_y}{I} - R_d.$$

При спуску вантажу зі швидкістю $\omega = 20,9$ рад/с.

$$R_p = \dots \text{ Ом.}$$

Таблиця 1

I, А	37,4	56,4	75	94	113	131	150	169	188
ω_e , рад/с									
$\omega (R_{p1})$, рад/с									
$\omega (R_{p2})$, рад/с									

Розрахунок характеристик двигуна, що відповідає знайденим значенням R_p , зробимо по формулі, аналогічній $\omega = \omega_e \frac{U - I(R_d + R_p)}{U - IR_d}$.

Результати розрахунків зведені в табл. 2. За даними табл. 2 на рис. 1 побудовані характеристики.

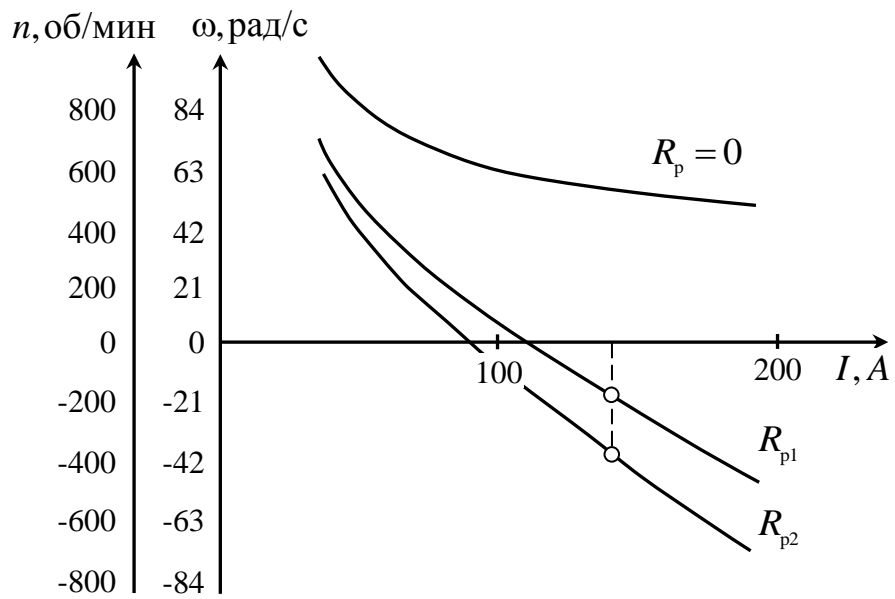


Рисунок 1 – Природна ($R_p = 0$) та реостатні (R_{p1} , R_{p2}) характеристики двигуна послідовного збудження

2.2 Практичні завдання на VII семестр

Практичне заняття № 1

Задача №1. Побудувати природну механічну характеристику для асинхронного двигуна з контактними кільцями типу МТ-63-10 в руховому і генераторному режимах роботи.

Номер варіанта студента відповідає порядковому номеру в списку журналу успішності (відомості).

Варіант	$P_{ном},$ кВт	$n_{ном},$ об/хв	$n_1,$ об/хв	$U_{л},$ В	З'єднання обмоток	$E_{2к},$ В,	$I_{2ном},$ А	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$X_1,$ Ом	$X_2,$ Ом
1	60	577	600	380	Y/Y	253	160	0,0549	0,0332	0,16	0,0704
2	60	577	600	380	Y/Y	252	160	0,0548	0,033	0,15	0,0706
3	60	577	600	380	Y/Y	251	160	0,0547	0,0329	0,14	0,0708
4	60	577	600	380	Y/Y	250	160	0,0546	0,0327	0,17	0,071
5	60	577	600	380	Y/Y	249	160	0,0545	0,0325	0,18	0,0712
6	60	577	600	380	Y/Y	248	160	0,0544	0,0323	0,13	0,0714
7	60	577	600	380	Y/Y	247	160	0,0543	0,0321	0,12	0,0716
8	60	577	600	380	Y/Y	246	160	0,0542	0,032	0,19	0,0702
9	60	577	600	380	Y/Y	245	160	0,0541	0,0332	0,11	0,072
10	60	577	600	380	Y/Y	244	160	0,054	0,033	0,16	0,0754
11	60	577	600	380	Y/Y	243	160	0,0538	0,0329	0,15	0,0764
12	60	577	600	380	Y/Y	242	160	0,0536	0,0327	0,14	0,0724
13	60	577	600	380	Y/Y	241	160	0,0535	0,0325	0,17	0,0734
14	60	577	600	380	Y/Y	240	160	0,0532	0,0323	0,18	0,0744
15	60	577	600	380	Y/Y	253	160	0,053	0,0321	0,13	0,0764
16	60	577	600	380	Y/Y	252	160	0,0528	0,032	0,12	0,0774
17	60	577	600	380	Y/Y	251	160	0,0526	0,0332	0,19	0,0784
18	60	577	600	380	Y/Y	250	160	0,0524	0,033	0,11	0,0736
19	60	577	600	380	Y/Y	249	160	0,052	0,0329	0,16	0,0792
20	60	577	600	380	Y/Y	248	160	0,051	0,0327	0,15	0,0721
21	60	577	600	380	Y/Y	247	160	0,0548	0,0325	0,14	0,0704
22	60	577	600	380	Y/Y	246	160	0,0547	0,0323	0,17	0,0706
23	60	577	600	380	Y/Y	245	160	0,0546	0,0321	0,18	0,0708
24	60	577	600	380	Y/Y	244	160	0,0545	0,032	0,13	0,071
25	60	577	600	380	Y/Y	243	160	0,0544	0,033	0,12	0,0712
26	60	577	600	380	Y/Y	242	160	0,0543	0,0329	0,19	0,0714
27	60	577	600	380	Y/Y	241	160	0,0542	0,0327	0,11	0,0716
28	60	577	600	380	Y/Y	240	160	0,0541	0,0325	0,16	0,0702

Розв'язання

Коефіцієнт трансформації від статора до ротора

$$k = \frac{E_1}{E_{2\kappa}}.$$

Приведені опори:

$$R'_2 = R_2 \cdot k^2, \text{ Ом};$$

$$X'_2 = X_2 \cdot k^2, \text{ Ом};$$

$$X_\kappa = X_1 + X'_2, \text{ Ом}.$$

Значення критичного ковзання

$$s_\kappa = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}.$$

$$as_\kappa = \frac{R_1}{R'_2} \cdot s_\kappa.$$

Кутова синхронна швидкість

$$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60} \text{ рад/с}.$$

Критичний момент в режимі двигуна (кН·м – кілоньютометри)

$$M_\kappa = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]}, \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Критичний момент в генераторному режимі

$$M_{\kappa.z} = M_{\kappa.d} \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_\kappa^2}}{R_1 - \sqrt{R_1^2 + X_\kappa^2}}, \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Рівняння природної механічної характеристики:

$$M = \frac{\pm 2M_\kappa (1 \pm as_\kappa)}{\frac{s}{\pm s_\kappa} + \frac{\pm s_\kappa}{s} \pm 2as_\kappa} = \frac{\pm Q}{\frac{s}{\pm s_\kappa} + \frac{\pm s_\kappa}{s} \pm 2as_\kappa}.$$

а) режим двигуна

$$M_{\delta} = \frac{Q}{\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s} + 2as_{\kappa}};$$

б) генераторний режим

$$M_{\zeta} = \frac{Q}{\frac{s}{-s_{\kappa}} + \frac{-s_{\kappa}}{s} - 2as_{\kappa}}.$$

Результати розрахунків зведені в таблиці 1.

Таблиця 1

s	0	$\pm 0,038$	$\pm 0,1$	$\pm 0,18$	$\pm 0,22$	$\pm 0,25$	$\pm 0,4$	$\pm 0,75$	$\pm 1,0$
M_{δ} , кН·м									
M_{ζ} , кН·м									

За даними таблиці 1 побудована природна характеристика двигуна (рис. 1).

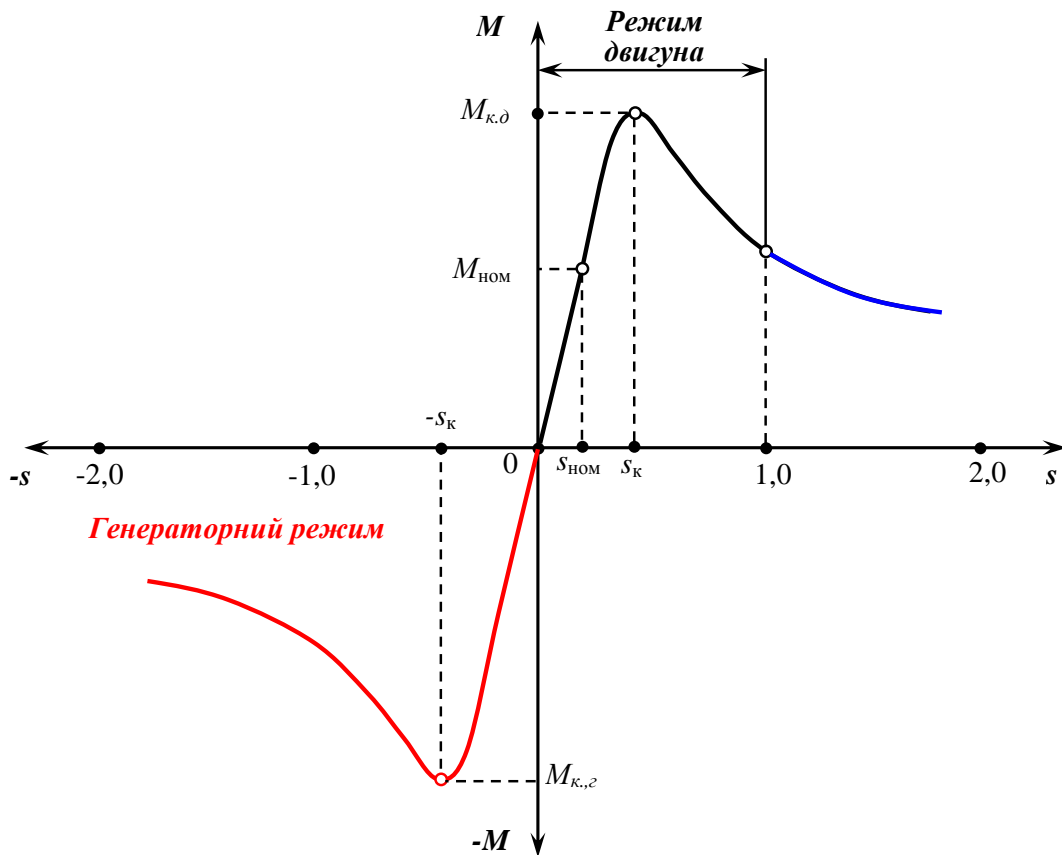


Рисунок 1 – Природна механічна характеристика асинхронного двигуна з фазним ротором

Практичне заняття № 2

Задача №1. Вибрати пусковий реостат для асинхронного двигуна з контактними кільцями типу АК-51-6.

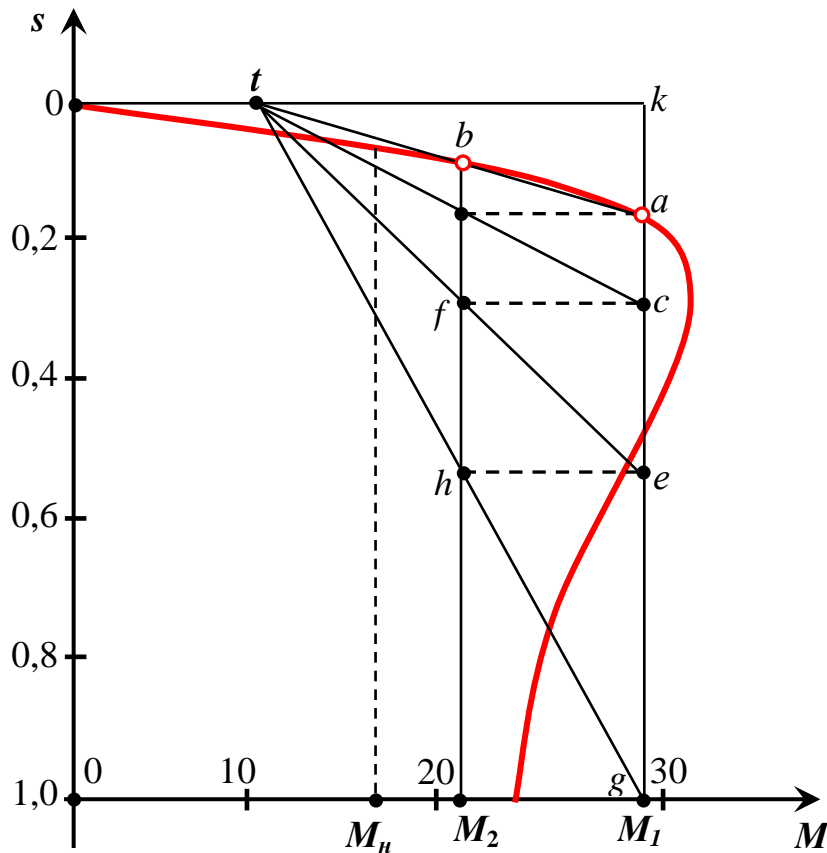


Рисунок 1 – До розрахунку пускового реостата асинхронного двигуна

Паспортні дані двигуна: $P_n = 1,7$ кВт, $n_n = 905$ об/хв, $E_{2K} = 57$ В,
 $I_{2n} = 20,2$ А, $\lambda = 2,0$, $R_2 = 0,155$ Ом.

Кутова номінальна швидкість

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} \text{ рад/с.}$$

Момент статичного навантаження на валу двигуна дорівнює його номінальному моменту:

$$M_c = M_n = \frac{P_n}{\omega_n} \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Природна механічна характеристика двигуна наведена на рис. 1. Найбільший пусковий момент двигуна з фазним ротором приймається рівним:

$$M_1 = 0,85M_{к.д.} = 0,85\lambda M_n \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Момент перемикання

$$M_2 = 1,2M_c \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Графічне рішення. Через точки a та b природної механічної характеристики, що відповідають значенням моментів M_1 і M_2 (рис. 1), проводиться пряма до перетинання з лінією синхронної швидкості ($s = 0$) у точці t . Із точки t проводяться прямі tg , te , tc аналогічно викладеному в прикладі 2 (практика № 3, задача №2 VI семестр).

Опір пускових сходинок визначається з виразів:

$$R_{p1} = \frac{eg}{ak} R_2 \text{ Ом.}$$

$$R_{p2} = \frac{ce}{ak} R_2 \text{ Ом.}$$

$$R_{p3} = \frac{ac}{ak} R_2 \text{ Ом.}$$

Повний опір пускового реостата

$$R_p = \frac{ag}{ak} R_2 \text{ Ом}$$

Практичне заняття № 3

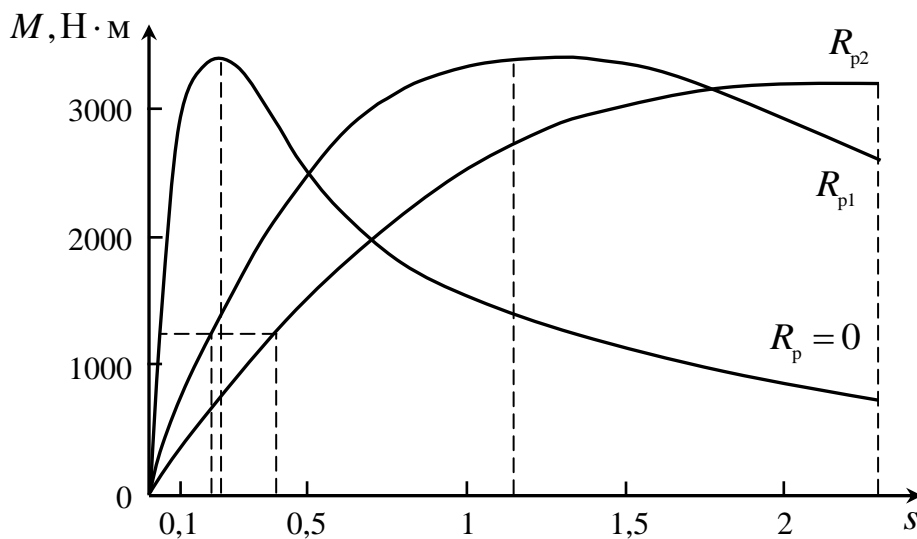
Задача № 1. Для двигуна типу МТ-63-10, паспортні дані (див. п.з. № 1): $P_{ном} = \dots$ кВт, $n_{ном} = \dots$ об/хв, ($n_1 = \dots$ об/хв, $p = \dots$) $U = \dots$ В, з'єднання обмоток Y/Y . Дані ротора: $E_{2к} = \dots$ В, $I_{2ном} = \dots$ А. Крім того, використовуються наступні заводські розрахункові дані двигуна: $R_1 = \dots$ Ом; $R_2 \dots$ Ом; $X_1 = \dots$ Ом; $X_2 = \dots$ Ом.

Розрахувати додаткові опори, при включенні яких у коло ротора реостатні характеристики будуть проходити при номінальному навантаженні через точки $s_{p1.ном} = \dots$ і відповідно $s_{p2.ном} = \dots$. Побудувати ці характеристики для режиму двигуна та гальмівного (протиповмиканням) режиму.

Номер варіанта студента відповідає порядковому номеру в списку журналу успішності (відомості).

Таблиця 1

Варіант	s_{p1}	s_{p2}	Варіант	s_{p1}	s_{p2}
1.	0,1	0,3	11.	0,3	0,5
2.	0,12	0,32	12.	0,32	0,52
3.	0,14	0,34	13.	0,34	0,54
4.	0,16	0,36	14.	0,36	0,56
5.	0,18	0,38	15.	0,38	0,58
6.	0,2	0,4	16.	0,4	0,6
7.	0,22	0,42	17.	0,15	0,35
8.	0,24	0,44	18.	0,25	0,45
9.	0,26	0,46	19.	0,35	0,55
10.	0,28	0,48	20.	0,42	0,52

Рисунок 1 – Природна ($R_p = 0$), реостатні (R_{p1} R_{p2}) характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором

Розв'язання

Тому що при тому самому моменті відношення ковзань дорівнює відношенню опорів роторного кола, то можна визначити величину необхідного додаткового опору R_p при заданих M та s :

$$R_p = R_2 \left(\frac{s_{p.ном}}{s_e} - 1 \right).$$

Значення електромагнітного моменту при номінальному ковзанні знайдемо по природній характеристиці двигуна (рис.1. Ми знайшли цю механічну характеристику на п.з. № 1).

При

$$s = s_{ном} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad M = \frac{2M_{к.д.} (1 + as_{к})}{\frac{s}{s_{к}} + \frac{s_{к}}{s} + 2as_{к}}$$

$$M_{к.д.} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}$$

$M(\text{при } s=s_{ном}) = \dots \text{ кН}\cdot\text{м}$ (див. п.з. № 1)

Додатковий опір для одержання $s_{p1} = \dots$ при $M = \dots \text{ кН}\cdot\text{м}$

$$R_{p1} = R_2 \left(\frac{s_{p1,ном}}{s_e} - 1 \right), \text{ Ом.}$$

Теж саме для $s_{p2} = \dots$:

$$R_{p2} = R_2 \left(\frac{s_{p2,ном}}{s_e} - 1 \right), \text{ Ом.}$$

Побудову реостатних характеристик зручно провести, користуючись формулами:

$$s_{p1} = s_{e1} \frac{R_2 + R_{p1}}{R_2}, \quad s_{p2} = s_{e1} \frac{R_2 + R_{p2}}{R_2}.$$

де s_{e1} – ковзання, яке обумовлене для моменту M_1 по природній характеристиці;

s_{p1} (s_{p2}) – ковзання, що відповідає тому ж значенню моменту M_1 для першої (другої) реостатної характеристики.

$$R_2 + R_{p1} = \dots \text{ Ом.}$$

$$R_2 + R_{p2} = \dots \text{ Ом.}$$

Таблица 2

$M,$ кН·м	0	...	...	...	...	...	...	...
s_e	0	0,0383	0,1	0,18	0,22	0,25	0,3	0,4
s_{p1}	0	...	...	...	...	...	...	...
s_{p2}	0	...	...	...	...	...	...	...

Результати розрахунку зведені в табл. 2.

За даними цієї таблиці побудовані реостатні характеристики двигуна (рис. 1)

Практичне заняття № 4

Задача № 1. Побудувати механічну характеристику в координатних площинах $M = f(s)$ для робочої ділянки ($0 < s < 1$), гальмування противовмиканням ($1 < s < 2$) і генераторного гальмування ($-1 < s < 0$) і $\omega = f(M)$ для асинхронного короткозамкненого двигуна. Паспортні дані наведені в табл. 1 відповідно до варіанта.

Номер варіанта студента відповідає порядковому номеру в списку журналу успішності (відомості).

Таблиця 1

Варіант	$P_{ном}$ кВт	$n_{ном}$ об/хв	$k_m max$ (λ)	Статор		Ротор	
				$R_1, Ом$	$X_1, Ом$	$R_2', Ом$	$X_2', Ом$
1	3	690	2.6	0.51	0.645	0.8	0.555
2	6	680	2.3	0.98	0.843	1.01	0.645
3	9	680	2.5	0.337	0.431	0.478	0.356
4	12	875	3.0	2.62	1.7	2.82	1.425
5	14	900	2.9	1.61	1.14	2.19	1.12
6	16	680	3.2	0.835	0.88	1.4	0.88
7	18	875	3	0.133	0.197	0.236	0.25
8	20	875	2.8	0.202	0.313	0.326	0.27
9	22	900	2.8	0.164	0.232	0.307	0.464
10	24	680	3	0.534	0.529	0.64	0.42
11	30	890	2.8	0.219	0.271	0.328	0.346
12	33	875	3.0	0.352	0.507	0.507	0.409
13	36	875	2.7	0.15	0.2	0.241	0.243
14	40	895	2.9	2.1	1.3	2.3	1.11
15	42	670	3.0	0.55	0.6	0.83	0.61
16	44	915	3.2	0.4	0.3	0.41	0.31
17	46	690	3.0	0.15	0.2	0.31	0.364
18	48	916	2.6	0.11	0.16	0.241	0.341
19	50	680	2.4	0.25	0.21	0.41	0.41
20	55	920	3.3	0.103	0.172	0.237	0.366
21	3.5	890	2.8	2.62	1.7	2.82	1.425
22	5.3	875	3.0	1.61	1.14	2.19	1.12
23	8.2	875	2.6	0.835	0.88	1.4	0.88
24	13	895	2.8	0.51	0.645	0.8	0.555
25	9	670	2.9	0.98	0.843	1.01	0.645
26	17.5	915	3.1	0.337	0.431	0.478	0.356
27	13	690	2.8	0.534	0.529	0.64	0.42
28	27	916	2.4	0.219	0.271	0.328	0.346
29	18	680	2.3	0.352	0.507	0.507	0.409
30	36	920	3.1	0.133	0.197	0.236	0.25

Розв'язання

Порядок розрахунку механічної характеристики:

1. Визначаємо значення критичного ковзання $s_{кр}$:

$$s_{кр} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}.$$

2. Визначаємо номінальне ковзання двигуна $s_{ном}$:

$$s_{кр} = s_{ном} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}).$$

звідки, враховуючи, що $\lambda = \frac{M_{max}}{M_{ном}}$ виразимо $s_{ном}$: $s_{ном} = \frac{s_{кр}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}}$.

3. Визначаємо значення швидкості холостого ходу n_0 (синхронної швидкості асинхронного двигуна)

оскільки $s = \frac{n_0 - n}{n_0} \Rightarrow s_{ном} \frac{n_0 - n_{ном}}{n_0}$, $n_0 = \frac{n_{ном}}{1 - s_{ном}}$.

4. Визначаємо значення номінального моменту $M_{ном}$

$$M_{ном} = \frac{9550 \cdot P_{ном}}{n_{ном}}.$$

5. Визначаємо значення критичного (максимального) моменту M_{max} :

$$M_{max} = M_{ном} \cdot \lambda.$$

6. Побудова графіка механічної характеристики двигуна (рис. 1) здійснюється на підставі використання формули Клосса:

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

Задаємося s , знаходимо M . Наприклад, для режиму двигуна $0 < s < 1$ необхідно підставляти значення $s = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$.

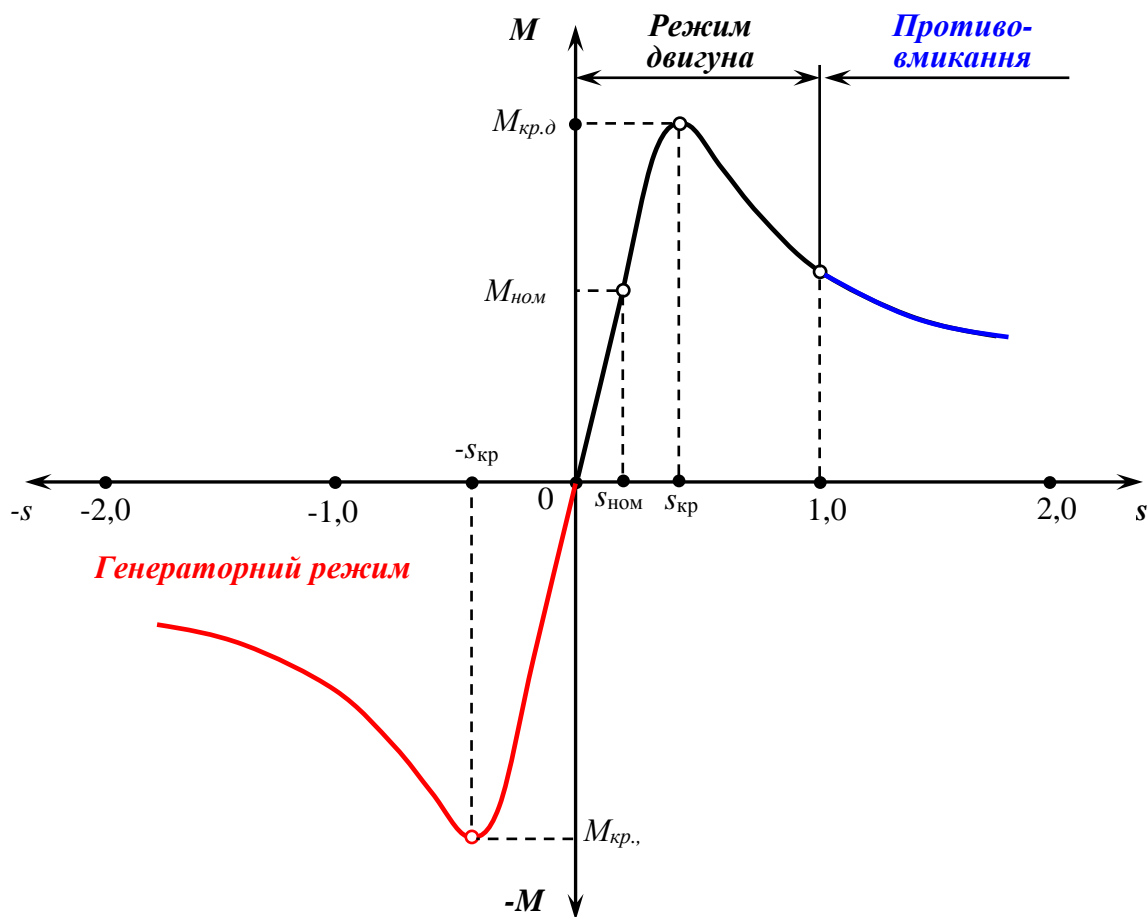


Рисунок 1 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

7. Визначаємо значення кутової частоти (по заданим s):

$$\omega = \omega_0(1 - s).$$

Будуємо механічну характеристику асинхронного двигуна в координатах $\omega = f(M)$. M уже знайдено в пункті б, для певного значення s .

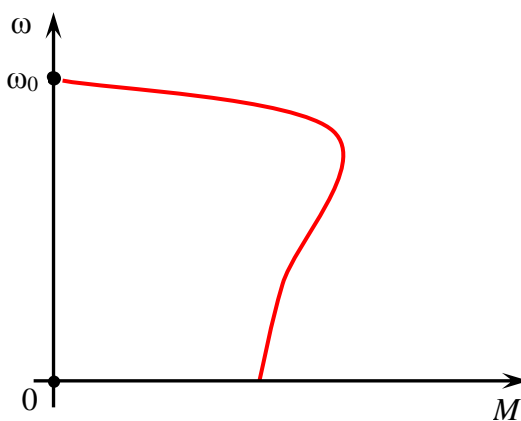


Рисунок 2 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

Практичне заняття №5

Задача № 1. Визначити час пуску приводу вентилятора та побудувати графік $\omega = f(t)$, використовуючи метод площ. Привід здійснюється від короткозамкненого двигуна типу А2-72-2, $P_{ном} = 40$ кВт, $\omega_{ном} = 305$ рад/с, ($n_{ном} = 2900$ об/хв), $J = \underline{\hspace{2cm}}$ кг·м².

Таблиця 1

Варіант	$J, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	Варіант	$J, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	Варіант	$J, \text{кг}\cdot\text{м}^2$
1.	0,1	11.	0,3	21.	0,5
2.	0,12	12.	0,32	22.	0,52
3.	0,14	13.	0,34	23.	0,54
4.	0,16	14.	0,36	24.	0,56
5.	0,18	15.	0,38	25.	0,58
6.	0,2	16.	0,4	26.	0,6
7.	0,22	17.	0,42	27.	0,35
8.	0,24	18.	0,44	28.	0,45
9.	0,26	19.	0,46	29.	0,55
10.	0,28	20.	0,48	30.	0,52

Механічні характеристики двигуна $\omega = f(M)$ і вентилятора $\omega = f_1(M_c)$ представлені на рис. 1.

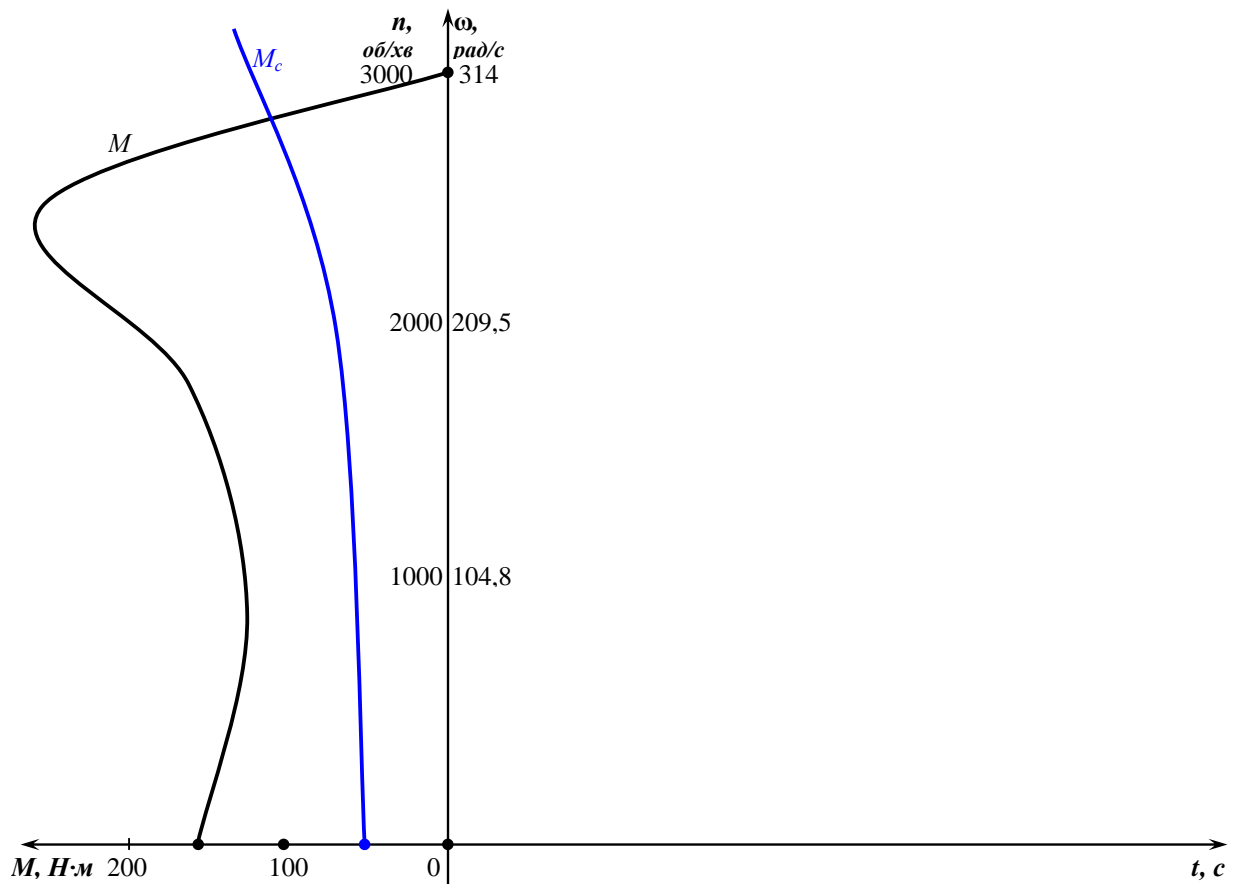


Рисунок 1 – Механічні характеристики двигуна $\omega = f(M)$ і вентилятора $\omega = f_1(M_c)$

Розв'язання

Для інтегрування рівняння руху застосуємо метод площ. Побудуємо криву динамічного моменту $M_{\text{дин}} = M - M_c$. Замінімо криву динамічного моменту $M_{\text{дин}}$ ступінчастим графіком, коли час пуску i -ої ділянки:

$$\Delta t = J \frac{\Delta \omega}{M - M_c} = J \frac{\Delta \omega}{M_{\text{дин}}}$$

Повний час пуску: $t = \sum_{i=1}^{i=16} (\Delta t_i)$

Таблиця 2

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\Delta \omega, \text{rad/c}$																
$\omega, \text{rad/c}$																
$M_{\text{дин}}, \text{H}\cdot\text{м}$																
$\Delta t_i, \text{с}$																
$t, \text{с}$																

Практичне заняття №6

Задача № 1. Двигун постійного струму незалежного збудження типу П51 з параметрами: $P_{\text{ном}} = 11$ кВт, $U = 220$ В, $I_{\text{ном}} = 59$ А, $n_{\text{ном}} = 3\,000$ об/хв., $J = 0,0873$ кг·м², $\eta_{\text{ном}} = 0,845$ пускається за допомогою двоступінчастого пускового реостата.

Розрахувати та побудувати криві $\omega = f(t)$ та $i = f(t)$ при пуску, якщо $M_c = x \cdot M_{\text{ном}}$ і відповідно струм статичного навантаження $I_c = x \cdot I_{\text{ном}}$.

Таблиця 1

Варіант	x	Варіант	x
1	0,4	15	0,56
2	0,42	16	0,57
3	0,44	17	0,58
4	0,45	18	0,59
5	0,46	19	0,6
6	0,47	20	0,4
7	0,48	21	0,42
8	0,49	22	0,44
9	0,5	23	0,45
10	0,51	24	0,46
11	0,52	25	0,47
12	0,53	26	0,48
13	0,54	27	0,49
14	0,55	28	0,5

Розв'язання

Номинальний опір двигуна

$$R_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}}, \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт корисної дії двигуна при номінальному навантаженні

$$\eta_{\text{ном}} = \frac{1000 \cdot P_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}}.$$

Опір якоря двигуна

$$R_{\text{я}} \approx 0,5(1 - \eta_{\text{ном}}) \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} \approx 0,5(1 - \eta_{\text{ном}}) R_{\text{ном}}, \text{ Ом.}$$

Пусковий опір розраховуємо графічним методом (рис. 1). Задаємося максимальним пусковим струмом:

$$I_1 = I_{\text{max}} = 2I_{\text{ном}}, \text{ А.}$$

Для пуску у дві сходинки графічно підбираємо мінімальний пусковий струм:

$$I_2 = I_{\text{min}} = 0,7 \dots 0,8 I_{\text{ном}}, \text{ А.}$$

З побудови, виконаного на рис. 1, визначаємо опори пускового реостата:

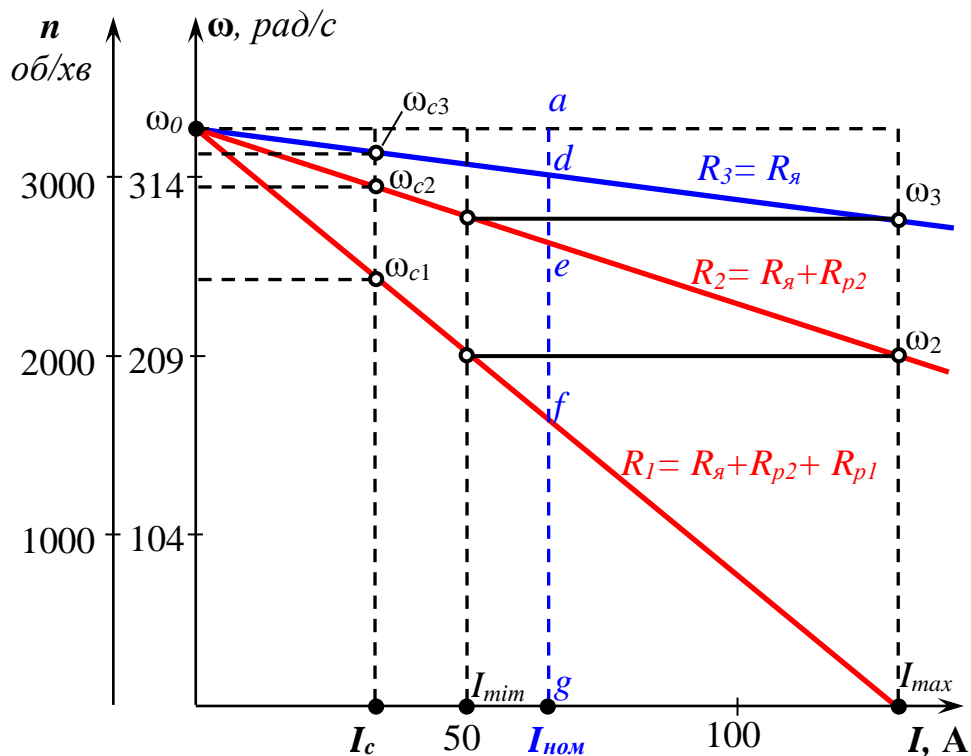


Рисунок 1 – До розрахунку пускового реостата

$$R_{p1} = \frac{ef}{ab} R_{ном}, \text{ Ом.} \quad R_{p2} = \frac{de}{ab} R_{ном}, \text{ Ом.}$$

Номинальна швидкість двигуна:

$$\omega_{ном} = \frac{2\pi n_{ном}}{60}, \text{ рад/с.}$$

Коефіцієнт двигуна

$$c = \frac{U_{ном} - I_{ном} R_{я}}{\omega_{ном}}, \text{ В} \cdot \text{рад/с.}$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна

$$\omega_0 = \frac{U_{ном}}{c}, \text{ рад/с.}$$

Розрахунок кривих перехідного процесу виконується по рівняннях:

$$\omega = \omega_c + (\omega_{нач} - \omega_c) e^{-\frac{t}{T_M}} \quad \text{та} \quad i = I_c + (I_{нач} - I_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}.$$

Для першої сходінки пуску:

$$\omega = \omega_{c1} + (0 - \omega_{c1}) e^{-\frac{t}{T_{M1}}};$$

$$i = I_c + (I_1 - I_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_{M1}}}.$$

Повний опір кола якоря

$$R_1 = R_{я} + R_{p1} + R_{p2} \text{ Ом.}$$

Електромеханічна постійна часу:

$$T_{M1} = \frac{J R_1}{c^2}, \text{ с.}$$

Стала швидкість, що відповідає струму

$$I_c = x \cdot I_{ном}, \text{ А}$$

згідно рис. 1 $\omega_{c1} = \dots$ рад/с. Розрахункові формули для першої сходинки пуску приймуть вид (приблизно):

$$\omega = \omega_{c1} + (0 - \omega_{c1})e^{-\frac{t}{T_{M1}}}, \quad \omega = \omega_0 + (0 - \omega_0) \cdot e^{-\frac{t}{0.39}};$$

$$i = I_c + (I_1 - I_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_{M1}}}.$$

Час пуску на першій сходинці:

$$t_1 = T_{M1} \ln \frac{I_1 - I_c}{I_2 - I_c}, \text{ с.}$$

Підставляючи в розрахункові формули ряд значень t від $t = 0$ до $t_1 = \text{с}$, одержуємо:

Таблиця 1

$t, \text{ с}$							
$\omega, \text{ рад/с}$							
$I, \text{ А}$							

Для другої сходинки пуску рівняння перехідного процесу:

$$\omega = \omega_{c2} + (\omega_2 - \omega_{c2})e^{-\frac{t}{T_{M2}}};$$

$$i = I_c + (I_1 - I_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_{M2}}}.$$

Опір кола якоря

$$R_2 = R_{\text{я}} + R_{\text{п2}}, \text{ Ом.}$$

Електромеханічна постійна часу

$$T_{M2} = \frac{JR_2}{c^2}, \text{ с.}$$

Стала швидкість $\omega_{c2} = \dots$ рад/с. Час пуску на другій сходинці

$$t_2 = T_{M2} \ln \frac{I_1 - I_c}{I_2 - I_c} \text{ с.}$$

Розрахункові формули для другої сходинки пуску

$$\omega = \omega_{c2} + (\omega_2 - \omega_{c2}) e^{-\frac{t}{T_{M2}}};$$

$$i = I_c + (I_1 - I_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_{M2}}}.$$

У цих формулах значення t змінюються від $t = 0$ до $t_2 = \dots$ с. Результати розрахунку наведені в табл. 2.

Таблиця 2

$t, \text{с}$						
$\omega, \text{рад/с}$						
$I, \text{А}$						

Аналогічно виконується розрахунок для третьої сходинки пуску (по природній характеристиці):

$$R_3 = R_{\text{я}} \text{ Ом.}$$

$$T_{M3} = \frac{JR_3}{c^2} \text{ с.}$$

$$\omega = \omega_{c3} + (\omega_3 - \omega_{c3}) e^{-\frac{t}{T_{M3}}};$$

$$t_3 \approx 4T_{M3}, \text{ с.}$$

$$i = I_c + (I_1 - I_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_{M3}}}.$$

Дані розрахунку зведені в табл. 3.

Таблиця 3

$t, \text{с}$						
$\omega, \text{рад/с}$						
$I, \text{А}$						

За даними таблиць на рис. 2 побудовані криві $\omega = f(t)$ та $i = f(t)$.

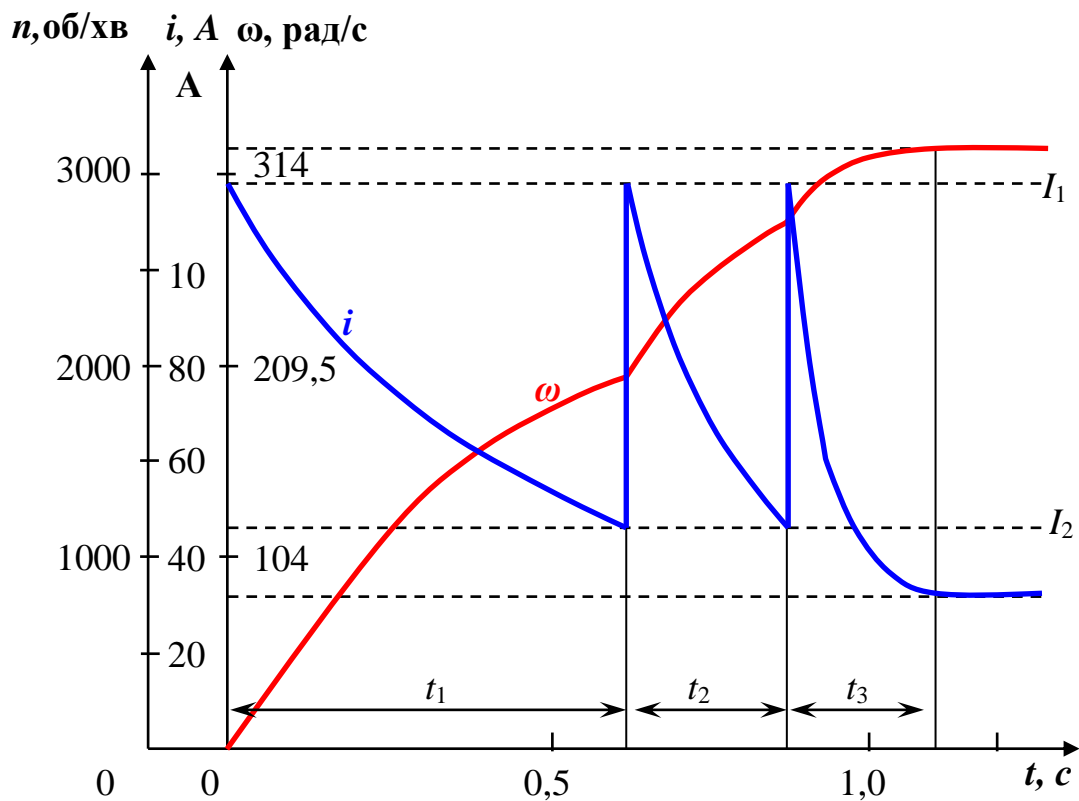


Рисунок 2 – Криві $\omega = f(t)$ та $i = f(t)$ при пуску двигуна незалежного збудження

Практичне заняття №7

Задача № 1. Двигун постійного струму типу П-81 з параметрами: $P_{ном} = 32$ кВт, $U = 220$ В, $I_{ном} = 170$ А, $n_{ном} = 1500$ об/хв., $R_{я} = 0,067$ Ом, $GD_{\delta}^2 = 2,8$ кг·м², максимальний момент при пуску $M_{\delta 1} = 2,2M_{ном}$.

Момент опору $M_c = 0,89M_{ном}$, маховий момент піднімального механізму $GD_m^2 = 4$ кг·м². Пуск виконується в 4 сходинок. Величини M_c та GD_m^2 наведені до вала двигуна. Двигун переводиться в режим динамічного гальмування зі швидкості $n_{нач} = n_{ном}$ при $M_c = xM_{ном}$ и $M_{нач} = yM_{ном}$ (значення x та y див. у табл. 1).

Визначити величину опору при динамічному гальмуванні та час динамічного гальмування, а також розрахувати і побудувати криві перехідних процесів $n = f(t)$ та $M = f(t)$ (див. рис. 2 та 3) для випадку підйому вантажу. Побудувати механічну характеристику двигуна при динамічному гальмуванні.

Таблиця 1

Варіант	x	y	Варіант	x	y
1	0,8	1,2	13	0,72	1,36
2	0,81	1,22	14	0,73	1,29
3	0,82	1,23	15	0,74	1,27
4	0,83	1,35	16	0,75	1,27
5	0,84	1,34	17	0,76	1,26
6	0,85	1,33	18	0,77	1,25
7	0,86	1,32	19	0,78	1,24
8	0,87	1,31	20	0,79	1,21
9	0,88	1,3	21	0,69	1,19
10	0,9	1,19	22	0,68	1,18
11	0,7	1,18	23	0,67	1,17
12	0,71	1,17	24	0,66	1,16

Розв'язання

Величина добутку:

$$c\Phi = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_{\text{я}}}{n_{\text{ном}}}$$

Величина добутку:

$$k\Phi = 0,975c\Phi.$$

Електромагнітний момент двигуна:

$$M_{\text{ном.э.м.}} = -k\Phi_{\text{ном}} I_{\text{ном}}, \text{ кг}\cdot\text{м.}$$

Номинальний момент на валу двигуна:

$$M_{\text{ном.}} = 975 \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}}, \text{ кг}\cdot\text{м.}$$

Момент опору:

$$M_c = 0,89M_{\text{ном}}, \text{ кг}\cdot\text{м.}$$

Максимальний момент:

$$M_1 = 2,2M_{\text{ном}} \text{ кг}\cdot\text{м.}$$

Повний опір якріного кола визначають із рівняння механічної характеристики двигуна при динамічному гальмуванні:

$$n = -\frac{MR}{ck\Phi^2},$$

$$R = -\frac{n_{нач} ck\Phi^2}{M_1}, \text{ Ом.}$$

Опір динамічного гальмування:

$$R_m = R - R_y \text{ Ом.}$$

Електромеханічна постійна часу:

$$GD^2 = GD_0^2 + GD_m^2, \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$$

$$T_M = \frac{GD^2 R}{375 ck\Phi^2} \text{ с.}$$

Стала швидкість наприкінці процесу гальмування:

$$n_c = -\frac{M_c R}{ck\Phi^2} \text{ об/хв.}$$

На підставі цих значень на рис. 1 побудована механічна характеристика в режимі динамічного гальмування.

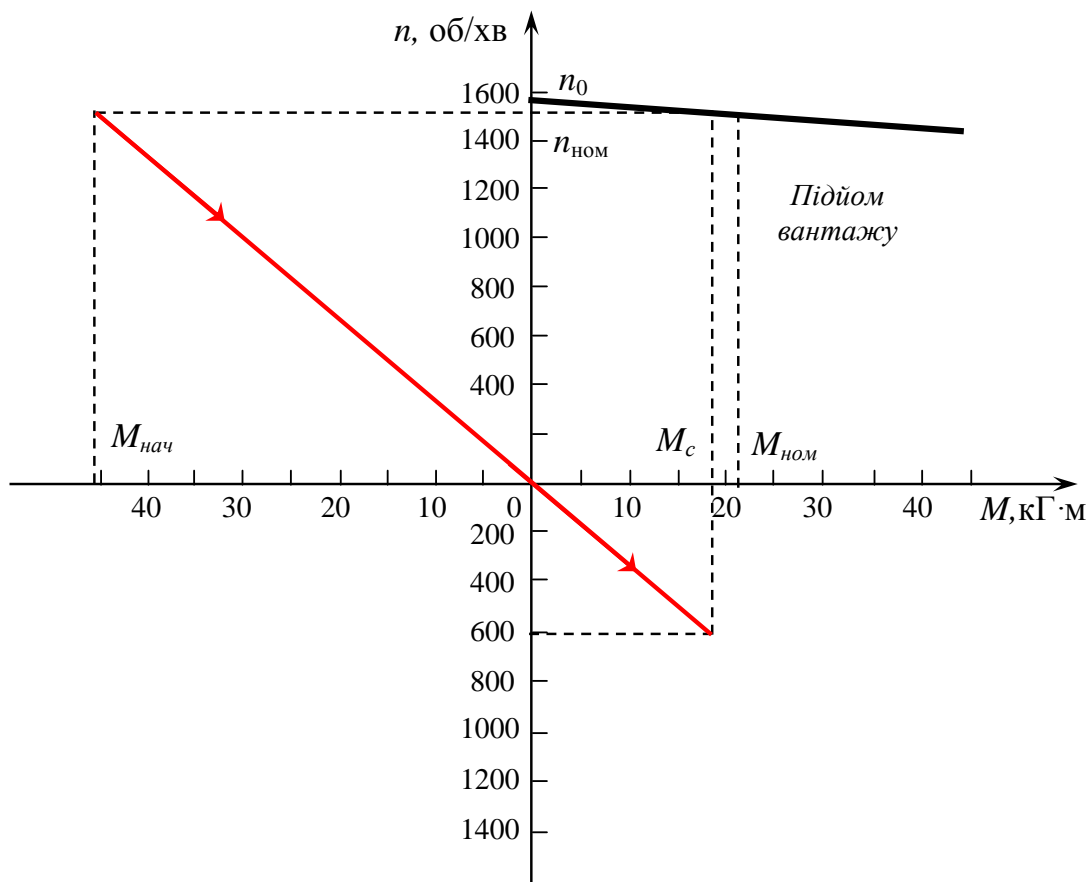


Рисунок 1 – Механічна характеристика в режимі динамічного гальмування

Для побудови кривих перехідного процесу $n = f(t)$ и $M = f(t)$ скористаємося рівняннями швидкості та моменту.

$$n = n_c \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + n_{нач} e^{-\frac{t}{T_M}} ;$$

$$M = M_c \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + M_{нач} e^{-\frac{t}{T_b}} .$$

Задаючись значеннями t , результати обчислень заносять а табл. 2. Час гальмування при динамічному гальмуванні з активним моментом опору теоретично дорівнює нескінченності. Практично час гальмування можна вважати рівним $3T_M$, тобто:

$$t_m = 3T_M \text{ с.}$$

Таблиця 2

$t, \text{ с}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,5	2,0
$n, \text{ об/мин}$															
$M, \text{ кг}\cdot\text{м}$															

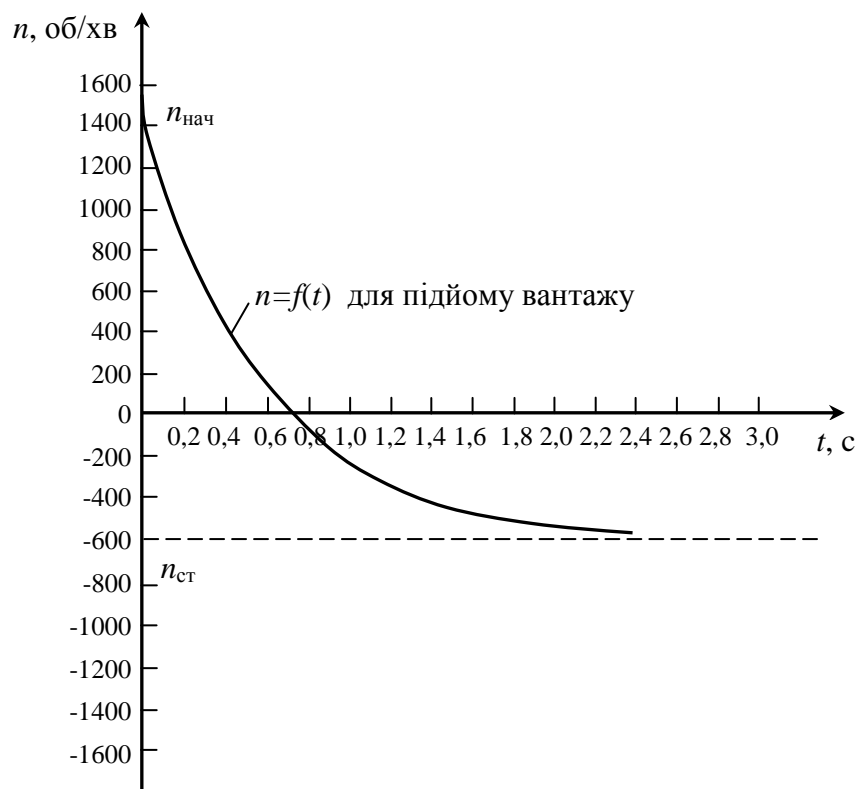


Рисунок 2 – Залежність швидкості обертання від часу $n = f(t)$ при динамічному гальмуванні

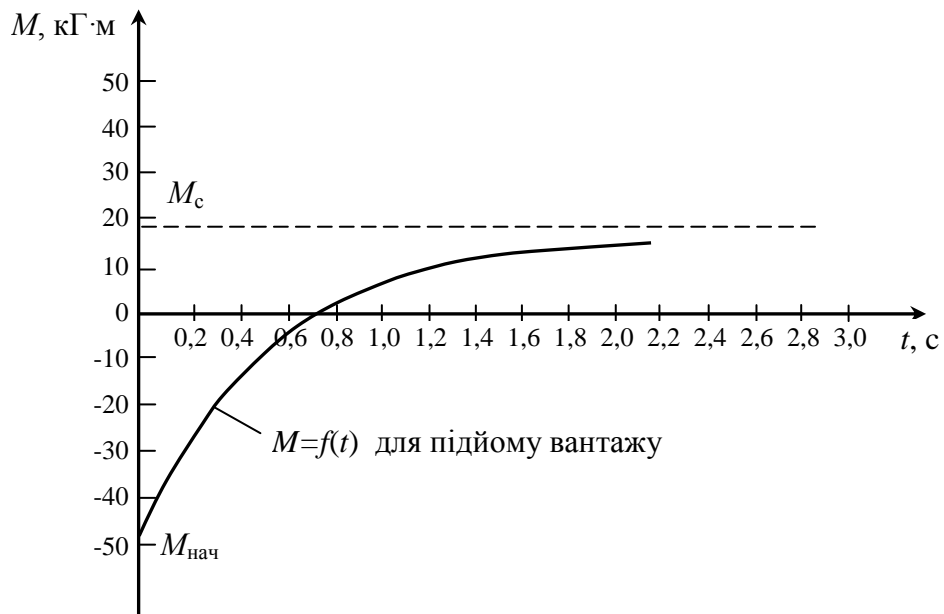


Рисунок 3 – Залежність моменту двигуна від часу $M = f(t)$ при динамічному гальмуванні

3. ЗАДАЧІ ДО ТЕСТОВИХ ЗАВДАНЬ

3.1 Практичні завдання до першого тесту

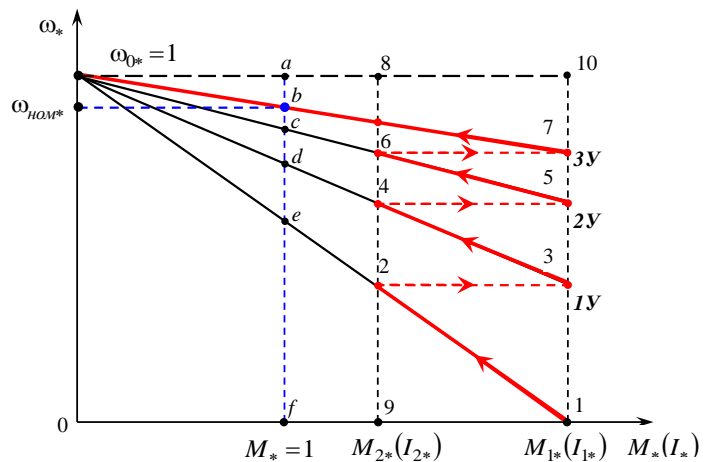
1. Визначити електромагнітний момент на валу двигуна, якщо динамічний

момент $M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt} = 10 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а момент опору $M_c = 10 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

- а) $M = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$; б) $M = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}$; в) $M = 10 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
 г) $M = 20 \text{ Н}\cdot\text{м}$; д) $M = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}$ е) $M = 30 \text{ Н}\cdot\text{м}$;

2. На наведеній механічній характеристиці ДПС НЗ у відносних одиницях, указати, яка пряма характеризує значення опору другої сходинки реостата.

- а) $d - e$
 б) $e - f$
 в) $1 - 10$
 г) $\omega_0 - 10$
 д) $a - f$
 е) $8 - 9$
 є) $b - c$
 ж) $c - d$
 з) $1 - 2$
 и) $2 - 3$



3. Визначити моменти інерції ротора двигуна електропривода, (розмірність $\text{кг}\cdot\text{м}^2$), якщо маховий момент $GD^2 = 1220, \text{ Н}\cdot\text{м}^2$.

- а) $\sim 12 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ б) $\sim 32 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ в) $\sim 4,7 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
 г) $\sim 3,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ д) $\sim 5,6 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ е) $\sim 9,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$

4. Визначити жорсткість механічної характеристики ДПС НЗ, якщо $M_1 = 10 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $M_2 = 30 \text{ Н}\cdot\text{м}$ і $\omega_1 = 20 \text{ рад/с}$, $\omega_2 = 10 \text{ рад/с}$.

- а) 30 б) -8 в) -2 г) 4 д) 2 е) 6 ж) 18

5. Визначити електромагнітний момент що розвиває ДПС НЗ, якщо прикладена напруга живлення $U = 150 \text{ В}$; опір якорного кола $R = 10 \text{ Ом}$; електротехнічний коефіцієнт $c = 2$;

- а) $160 \text{ Н}\cdot\text{м}$ б) $12 \text{ Н}\cdot\text{м}$ в) $8 \text{ Н}\cdot\text{м}$ г) $162 \text{ Н}\cdot\text{м}$ д) $30 \text{ Н}\cdot\text{м}$ е) $80 \text{ Н}\cdot\text{м}$

6. Визначити наведену в якорі ДПС НЗ ЕРС обертання E , якщо струм у якорному колі $I = 15 \text{ А}$, $R_a = 2 \text{ Ом}$; $R_p = 3 \text{ Ом}$, а прикладена напруга живлення $U = 140 \text{ В}$.

- а) 65 В б) $5,8 \text{ В}$ в) 100 В г) 30 В д) $7,5 \text{ В}$ е) $10,5 \text{ В}$

3.2 Практичні завдання до другого тесту

1. Знайти значення I , що віддає в мережу при роботі ДПС НЗ в режимі гальмування з віддачею енергії в мережу, якщо $R_{я}=1$ Ом; $R_{р}=2$ Ом; $U=120$ В; $c=2$; $\omega=150$ рад/с.

- а) -1А; б) -2А; в) -3А; г) -6А;
 д) -60А; е) -10А; ж) -30А; з) -100А;

2. Знайти значення струму, що протікає по якорному колу ДПС НЗ в режимі динамічного гальмування, якщо $R_{я}=3$ Ом; $R_{р}=7$ Ом; $c=2$; $\omega=100$ рад/с.

- а) -1А; б) -1,5А; в) -15А; г) -150А;
 д) -10А; е) -5А; ж) -6А; з) -20А;

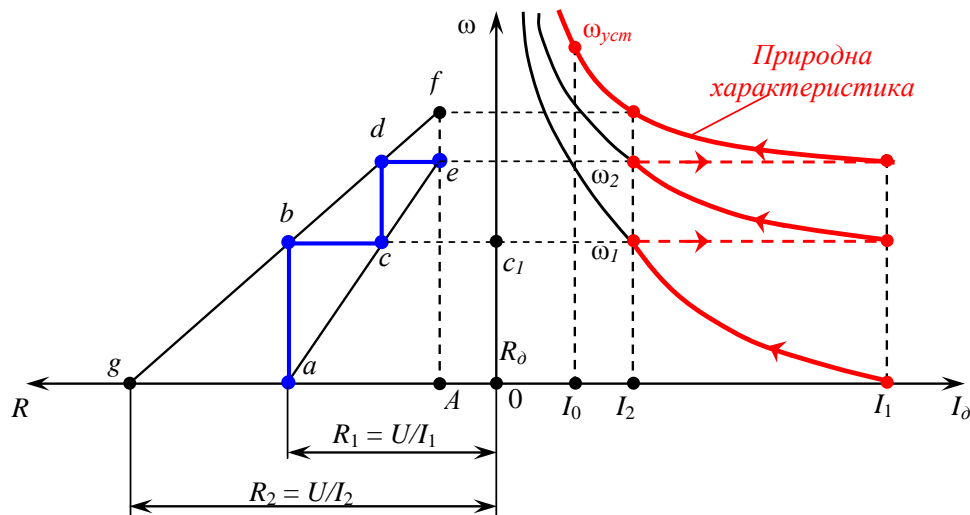
3. Визначити M_T (гальмівний момент) при динамічному гальмуванні ДПС НЗ, якщо $c=2$; $\omega=90$ рад/с; $R_{я}=3$ Ом; $R_{р}=15$ Ом.

- а) 1 Н·м; б) 18 Н·м; в) 1,5 Н·м; г) 20 Н·м;
 д) -20 Н·м; е) 15 Н·м; ж) -30 Н·м; з) - 1,5 Н·м;

4. Визначити опір якоря $R_{я}$ ДПС НЗ, якщо $P_H=12$ кВт; $U_{ном}=220$ В; $I_{ном}=70$ А.

- а) 3,14 Ом; б) 0,34 Ом; в) 18,3 Ом; г) 0,07 Ом;
 д) 2,41 Ом; е) 2,18 Ом; ж) 0,25 Ом; з) 2,5 Ом;

5. Визначити опір 1-ої сходинки реостата (за графіком) при запуску ДПС послідовного збудження, якщо 1 см = 10 Ом.



- а) $a-b=2$ см \rightarrow 20 Ом; б) $b-c=1,5$ см \rightarrow 15 Ом;
 в) $c-d=1,2$ см \rightarrow 12 Ом; г) $d-c=1$ см \rightarrow 10 Ом;
 д) $c-f=0,5$ см \rightarrow 5 Ом; е) $f-h=0,3$ см \rightarrow 3 Ом;

ж) $\sigma-A=0,5 \text{ см} \rightarrow 5 \text{ Ом};$

з) $\sigma-a=3,5 \text{ см} \rightarrow 35 \text{ Ом};$

и) $\sigma-d=0,6 \text{ см} \rightarrow 60 \text{ Ом};$

к) $a-d=2,5 \text{ см} \rightarrow 25 \text{ Ом}$

6. Визначити значення максимального (критичного) моменту для АД з короткозамкненим ротором серії 4 А, якщо $M_{ном}=205 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а його перевантажувальна здатність $\lambda=2$.

а) $207 \text{ Н}\cdot\text{м};$

б) $102,5 \text{ Н}\cdot\text{м};$

в) $7,65 \text{ Н}\cdot\text{м};$

г) $33,3 \text{ Н}\cdot\text{м};$

д) $564 \text{ Н}\cdot\text{м};$

е) $120 \text{ Н}\cdot\text{м};$

ж) $30 \text{ Н}\cdot\text{м};$

з) $410 \text{ Н}\cdot\text{м};$

4. ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ

Практичне завдання повинно бути виконане на протязі одного тижня з моменту його отримання.

Практичне завдання виконується згідно варіанту з обов'язковим розкриттям всіх питань у відповідності з поставленим завданням.

Виконане завдання оформлюється у відповідності з типовими задачами технічних дисциплін, тобто записується зміст завдання, після чого приводиться хід його вирішення з кінцевою відповіддю.

Розрахункову частину роботи рекомендується виконувати в середовищі пакета "MathCAD" або Microsoft Office Excel.

Графічні побудови проводити на міліметровому папері розміру А4 та А3 з відповідною рамкою та основним надписом. Графічний матеріал додається до матеріалу розрахунків у вигляді додатків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Теорія електроприводу транспортних засобів: підручник / [А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун, І.С. Трунова]. – Х.: ХНАДУ, 2016 – 292 с.
2. Cyber-Physical Systems for Clean Transportation: підручник / [Nadezhda Kunicina, Anatolijs Zabasta, Jelena Pečerska, Andrej Romanov, Andrii Hnatov, Arhun Shchasiana Dziubenko Oleksandr, Kateryna Danylenko, Joan Peuteman, Natalia Morkun, Iryna Zavsiehdashnia, Vladimir Sistuk, Yurii Monastyrskiy, Sergey Ruban, Vitaliy Tron]. – Riga: RTU, 2021 – 370 p.
3. Control methods for critical infrastructure and Internet of Things (IoT): підручник / [Leonids Ribickis, Nadezhda Kunicina, Ojars Kruminis, Anatolijs Zabasta, Andrejs Romanovs, Anastasija Zhiravecka, Igors Uteshevs, Rasa Bruzgiene, Joan Peuteman, Jelena Caiko, Kaspars Kondratjevs, Alina Galkina, Konstantins Kunicins, Jaroslavs Agofonovs, Antons Patlins, Damir Shodiev, Andrei Derushev, Andrii Hnatov]. – Riga: RTU, 2021 – 131 p.
4. Моделирование электроприводов: Навч. посібник / Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. - Львів: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка», 2004.- 404 с.
5. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. Основы электропривода. Теория та практика. Часть 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.
6. Теорія електроприводу: [метод. вказів. до лаб. робіт та самостійної роботи] / А. В. Гнатов, Щ.В. Аргун. – Х. : ХНАДУ, 2021 – 65 с.
7. Hayes J. G., Goodarzi G. A. Electric powertrain: energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles. – 2018.
8. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. Учебник для вузов. Изд. 5-е доп. и переработ. – М.: Энергия, 1971. – 432 с.
9. Теорія електроприводу. Методичні вказівки до курсового проекту "Розрахунок робочих параметрів і характеристик режимів пуску і гальмування електропривода з асинхронним двигуном" для студентів спеціальності 7.092206 і 7.092501. / А.В. Гнатов, В.І. Калмиков, – Х.: ХНАДУ, 2008. – 31 с.
10. Башарин А.В., Голубев Ф.Н., Кепперман В.Г. Примеры расчета автоматизированного электропривода. – Л.: Энергия, 1971. – 440 с.
11. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
12. Дьяконов В.И. Расчет электроприводов с линейными асинхронными двигателями. – Иваново, 1973. – 141 с.
13. Елементи автоматизованого електропривода / М.Г. Попович, В.А. Гаврилюк, О.В. Ковальчук, В.І. Теряєв. – К.: УМК ВО, 1990. – 260 с.
14. Сен П. Тиристорные электроприводы постоянного тока / Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.
15. Сиротин А.А. Автоматическое управление электроприводами. – М.: Энергия, 1969. – 560 с.

16. Системы управления электроприводами: Учеб. Пособие / А.П. Голубь, Б.И. Кузнецов, И.А. Попрышко. – К.: УМК ВО, 1992. – 376 с.
17. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева, А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
18. Теория автоматизированного электропривода: Учеб. Пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
19. Трехов В.И. Элементы автоматизированного электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.
20. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.
21. Миллер Е.В. Основы теории электропривода. – М.: Высшая школа, 1968. – 408 с.
22. Кацман М.М. Электрические машины и электропривод автоматических устройств: Учебник для электротехнических специальностей техникумов. – М.: Высшая школа, 1987. – 335 с.
23. Самойленко Б.Ф., Кононов Б.Т. и др. Системы управления электроснабжением и электроприводом. – МО СССР, 1990. – 415 с.
24. В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин Основы электропривода. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.
25. А.И. Иванченко, Л.Н. Кобылкин, А.М. Шингели Электросиловое оборудование. Руководство к лабораторным работам. Часть 2. – Х.: ХВВКУ, 1975. – 60 с.
26. Основы автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин и др. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.
27. Теорія електропривода. Під ред. М.Г.Поповича. – Київ: Вища школа, 1993 – 493 с.
28. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
29. Москаленко В.В. Электрический привод. – М.: Высшая школа, 1991. – 430 с.
30. Иванов А.А. Справочник по электротехнике. Изд. 5-е, перераб. и доп. – К.: "Вища школа" Головное издательство, 1984. – 304 с.
31. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / Под ред. Круповича В.И. – М.: Энергоиздат, 1982. – 364 с.
32. Автоматизированный электропривод / Под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.
33. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общин курс электропривода: Учебник для вузов. М.: Энергоатомпздяг, 1992. – 532 с.
34. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: Учеб. пособие для вузов. - 2-е изд., перегиб, и доп. – М.: Наука, 1989. – 452 с.
35. Кацман М.М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу. – М.: Высшая школа, 1983. – 335 с.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1 ТЕОРЕТИЧНИЙ МАТЕРІАЛ.....	4
1.1 Приведення моментів і сил опору, інерційних мас і моментів інерції.....	4
1.2 Моменти опору, їх види.....	5
1.3 Механічні характеристики виробничих механізмів і електричних двигунів.....	11
1.4 Сталі режими. Поняття статичної стійкості електричного приводу.....	14
1.5 Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження.....	17
1.6 Вплив опору якорного кола на швидкість двигуна електроприводу.....	19
1.7 Побудова механічних характеристик двигуна постійного струму незалежного збудження.....	21
1.8 Побудова механічної характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження у відносних одиницях.....	23
2 ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	27
2.1 Практичні завдання на VI семестр.....	27
2.2 Практичні завдання на VII семестр.....	48
3. ЗАДАЧІ ДО ТЕСТОВИХ ЗАВДАНЬ.....	69
3.1 Практичні завдання до першого тесту.....	69
3.2 Практичні завдання до другого тесту.....	70
4. ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ.....	72
ЛІТЕРАТУРА.....	73